

УДК 355:623

Модель оценивания устойчивости системы управления воздушно-космической обороной в конфликте со средствами воздушно-космического нападения

Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В.

Актуальность. Актуальность вопросов повышения устойчивости системы управления (СУ) воздушно-космической обороной (ВКО) обусловлена все большим возрастанием военно-политической напряженности между Российской Федерацией и странами коллективного Запада. На случай перерастания напряженности в вооруженный конфликт в США разработана оперативно-стратегическая концепция «Быстрый глобальный удар» (БГУ), предполагающая быстрый одновременный удар большого количества средств поражения высокоточного оружия (ВТО), прежде всего, крылатыми ракетами (КР) морского и воздушного базирования, по выбранным целям, административным и военным центрам, в том числе и по пусковым установкам межконтинентальных баллистических ракет (МБР). При этом первой эшелон БГУ будет состоять из средств воздушно-космического нападения (СВКН), ориентированных на поражение элементов системы ВКО с целью снижения ее эффективности при отражении удара СВКН последующих эшелонов БГУ. То есть задача повышения устойчивости системы ВКО в условиях удара СВКН первого эшелона БГУ является актуальной. **Целью работы** является разработка модели оценивания устойчивости СУ ВКО в конфликте со СВКН. **Материал статьи** в дальнейшем планируется к использованию для разработки и исследования моделей развития и прогнозирования результатов конфликтного взаимодействия СВКН противника и системы ВКО, а также для исследования устойчивости системы ВКО при нанесении противником БГУ. **Результаты и их новизна.** Новизной разработанной модели, отличающей ее от известных работ, является: введение интегрального показателя устойчивости СУ ВКО, как средней вероятности устойчивости информационного направления (ИН) в СУ ВКО между ее элементами, являющейся сверткой структурных и временных параметров устойчивости отдельных ИН в СУ ВКО; введение в состав структурных параметров устойчивости ИН параметров, в формализованном виде учитывающих возможности радио- и радиотехнической и оптико-электронной разведки противника при вскрытии элементов СУ ВКО, а также параметров, учитывающих возможности СВКН по физическому и функциональному поражению элементов СУ ВКО, радиоэлектронному подавлению каналов связи и радиолокационных станций (РЛС); введение в состав временных параметров устойчивости ИН параметров, которые в формализованном виде учитывают возможности восстановления управления системой ВКО за счет реконфигурации путей передачи данных информационного обеспечения и команд боевого управления в СУ ВКО, переключения на резервные пути передачи в составе ИН при выходе из строя элементов системы ВКО в результате воздействия СВКН, а также длительность переходных режимов восстановления управления в СУ ВКО при изменении ее структуры. **Практическая значимость.** Представленная в работе модель будет полезна научным работникам и соискателям, ведущим научные исследования в области исследования информационных конфликтов, повышения боевой эффективности системы ВКО и повышения устойчивости ее системы управления при нанесении противником БГУ.

Ключевые слова: устойчивость, радиоэлектронная разведка, радиоэлектронное подавление, радиоэлектронная борьба, средства воздушно-космического нападения, средства воздушного напа-

Библиографическая ссылка на статью:

Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Модель оценивания устойчивости системы управления воздушно-космической обороной в конфликте со средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 227-266. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-227-266

Reference for citation:

Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S. V. Model for assessing the stability of an aerospace defense control system in conflict with aerospace attack means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 227-266 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-227-266

дения, система управления, противовоздушная оборона, воздушно-космическая оборона, конфликт, боевое противоборство, огневое поражение.

Введение

Актуальность вопросов повышения устойчивости системы управления (СУ) воздушно-космической обороной (ВКО) обусловлена все большим возрастанием военно-политической напряженности между Российской Федерацией (РФ) и странами коллективного Запада. На случай перерастания напряженности в масштабный вооруженный конфликт в США разработана оперативно-стратегическая концепция «Быстрый глобальный удар» (БГУ), предполагающая одновременный удар большого количества средств поражения высокоточного оружия (ВТО), прежде всего крылатыми ракетами (КР) морского (КРМБ) и воздушного базирования (КРВБ), по выбранным целям, административным и военным центрам, в том числе и по пусковым установкам межконтинентальных баллистических ракет (МБР). При этом в составе первого эшелона БГУ будут средства воздушно-космического нападения (СВКН), ориентированные на поражение именно элементов системы ВКО с целью снижения ее эффективности при отражении удара СВКН последующих эшелонов БГУ. Последующие эшелоны БГУ составляют СВКН, предназначенные для поражения объектов системы государственного и военного управления, объектов критической инфраструктуры государства, в том числе и пусковых установок МБР, в условиях уже подавленной системы ВКО [1].

Таким образом, повышение устойчивости ВКО в целом, и ее СУ, в частности, в условиях удара СВКН является важной военно-прикладной задачей, а разработка соответствующей модели оценивания устойчивости – актуальным направлением исследований. Решение этой задачи осложняется высокими требованиями к готовности всех элементов системы ВКО, особенно в условиях функционирования их в неблагоприятной среде, а именно – в условиях физического поражения элементов СУ ВКО ударными СВКН и функционального поражения средствами радиоэлектронного подавления (РЭП) противника.

Направлением исследований авторов является формирование моделей развития и прогнозирования результатов конфликта «СВКН – система ВКО» и исследование устойчивости СУ ВКО при нанесении противником удара СВКН. Говоря о «конflikте», а не о «противоборстве», авторы хотели бы акцентировать внимание не на военных аспектах взаимодействия «СВКН – система ВКО», а на общетеоретических, рассматривая его в рамках теории конфликтов.

Целью настоящей статьи является разработка модели оценивания устойчивости СУ ВКО в конфликте со СВКН, а также формализация показателя устойчивости СУ ВКО.

Материал статьи декомпозирован на следующие подразделы.

1. Постановка задачи на моделирование.
2. Основные термины и определения.
3. Обоснование и формализация показателя устойчивости СУ ВКО.

4. Формализация структурных параметров информационных направлений (ИН) в СУ ВКО с учетом дестабилизирующих воздействий различного типа на ее отдельные элементы.
5. Формализация структурных параметров устойчивости СУ ВКО с учетом ведения противником разведки, применения против отдельных элементов системы различных средств огневого и функционального поражения и постановки различных типов помех.
 - 5.1. Формализация факторов разведки.
 - 5.2. Фактор разведки пространственных параметров (местоположения).
 - 5.3. Фактор разведки энергетических, временных и структурных параметров сигналов.
 - 5.4. Формализация фактора физического поражения элемента СУ ВКО с учетом разведки его пространственных параметров (местоположения).
 - 5.5. Формализация фактора радиоэлектронного подавления элемента СУ ВКО с учетом разведки энергетических, временных и структурных параметров его сигналов.
6. Формализация временных параметров устойчивости СУ ВКО с учетом длительности восстановления управления после дестабилизирующих воздействий.
7. Итоговая схема оценивания устойчивости СУ ВКО в конфликте со СВКН.
8. Итоговые выводы и новизна модели.

Данная статья продолжает цикл работ авторов [1-7], посвященных исследованию эффективности системы ВКО, анализу стратегии нанесения БГУ и боевого опыта отражения атак СВКН, а также формированию обобщенных моделей различных подсистем, средств и комплексов в составе ударных эшелонов СВКН потенциального противника.

1. Постановка задачи на моделирование

Общие вопросы развития системы ВКО РФ рассмотрены в работах В.Н. Минаева [8], И.Р. Ашурбейли [9], С.Н. Бориско, С.А. Горемыкина [10], А.Г. Лузана [11], А.Б. Палицына, Д.Б. Жиленко [12], В.В. Барвиненко [13], Б.Д. Казахова [14], С.Ф. Боева [15], С.Н. Зинакова [16]. Военно-технические аспекты формирования системы ВКО, проблемные вопросы формирования высоких эксплуатационных показателей соответствующих образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) рассмотрены в работах С.В. Ягольников [17], П.А. Созинова [18], С.Ф. Боева [15, 19-21], А.А. Рахманова [20-22], А.В. Тимошенко [22, 25], А.А. Кочкарова [22-24], И.В. Чеботаря [19], Н.А. Лешко [25], Д.М. Петроченкова [23, 25], а также в работах других специалистов. Вопросы создания технических средств управления системы ВКО – комплексов средств автоматизации (КСА) и автоматизированных систем управления (АСУ), а также проблемы управления силами и сред-

ствами ВКО при отражении ударов СВКН рассмотрены в работах: Я.В. Безеля [26], И.В. Грудина [27-31], С.В. Суrowикина [27, 28], Д.Г. Майбуrowa [29-32], В.Л. Ляковскогo [33], О.В. Воронина, С.В. Потетенко, С.В. Кругликова [34], В.А. Моренкова [35], Е.М. Воронова [36, 37], Н.А. Куприянова [38], а также в работах других ученых.

Вместе с тем несмотря на большое количество вышеуказанных работ, связанных с развитием эффективности различных аспектов ВКО, такое направление исследований, как повышение устойчивости СУ ВКО в условиях массированного удара СВКН, не получило глубокого развития. В большинстве исследований совершенствование ВКО рассматривается через повышение эффективности уже существующих образцов ВВСТ: радиолокационных станций (РЛС), АСУ, КСА, зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) и зенитно-ракетных систем (ЗРС). К исследованиям, в которых ранее уже рассматривались вопросы повышения устойчивости системы ВКО или ее частных компонентов, стоит отнести работы В.Н. Дыбова, Ю.Д. Подгорных [39], И.В. Грудина, С.В. Суrowикина [27, 28], И.В. Грудина, Д.Г. Майбуrowa [31], Д.А. Пальгуева [40-43]. Однако в этих работах не достаточно четко выделяются основные дестабилизирующие факторы, негативно влияющие на элементы СУ ВКО, не проведена их формализация с учетом возможности поражения командных пунктов (КП) и узлов связи (УС) системы управления ударными средствами физического поражения (ФП) и функционального поражения электромагнитным излучением (ФП ЭМИ) (которые в дальнейшем авторы не будут разделять по характеру воздействия, а объединят общим понятием «ударные средства»), а также радиоэлектронного подавления каналов связи (КС) и РЛС. Не введен единый показатель устойчивости СУ ВКО. На устранение именно этих недостатков вышеуказанных работ ориентирована модель, разрабатываемая в этой работе. Отличительной чертой данной модели, которая составляет ее научную новизну, является учет не только структурных параметров устойчивости, но и длительности переходных режимов восстановления управления в СУ ВКО при изменении ее структуры вследствие негативного влияния дестабилизирующих факторов в виде удара СВКН и ведения РЭП противником. Именно эти черты отличают данную модель от уже известных вышеуказанных работ в области оценивания устойчивости СУ ВКО. Модель построена в формализме теории графов. Данная модель основана на переработке и дополнении моделей, представленных в работах [44, 45].

В основу модели положена формализация пространственно-распределенной структуры СУ ВКО в виде графа сети, на которую «накладываются» параметры пространственной конфигурации средств разведки и дестабилизирующих воздействий (СВКН и РЭП). Именно эта информация с учетом ударных, энергетических и частотно-временных возможностей соответствующих СВКН позволяет сформировать исходные данные о возможностях ведения разведки и поражения элементов СУ ВКО, формализованных в виде узлов и ребер графа сети.

Для формализации параметров СУ ВКО при формировании модели введем следующие обозначения:

π – значение элемента множества A ;

A – множество;

a – элемент множества A ;

B – множество;

b – элемент множества B ;

b_u – показатель посредничества вершины u в графе G ;

C_{av} – абсолютная пропускная способность (пакетов в секунду) v -го элемента j -го пути информационного направления (ИН);

$D(G)$ – диаметр графа G – длина максимального из кратчайших путей d_{ij} , которые можно сформировать между всеми вершинами графа G ;

d_{ij} – количество участков сети («хопов») между узлом, обнаружившим отказ пути (узел i), и узлом, ответственным за переключение путей в ИН (узел j);

E – эффективность сети;

E_z – эффективность сети после удаления из ее состава z -го элемента (узла или линии связи);

$F(\delta_i)$ – функция распределения степеней вершин графа G , определяемая вероятностью того, что вершина u_i в графе G имеет степень δ_i ;

g – количество средств поражения в наряде;

$G(u, v)$ – граф, формализующий сеть СУ ВКО в виде множеств вершин $\{u\}$ и соединяющих их ребер $\{v\}$;

g_i – количество средств поражения i -го типа;

$G_{\text{ИН}}$ – подграф, образованный из графа G элементами (вершинами и ребрами), входящими в конкретное ИН;

H_z – показатель уязвимости сети относительно удаления z -го элемента СУ ВКО (узла или ребра сети);

i – счетчик;

j – счетчик;

K – требования к количеству путей в ИН, в которых должно обеспечиваться требуемое качество обслуживания трафика;

k_i – количество работоспособных путей в i -ом ИН;

k_{QoS} – количество работоспособных путей на заданном ИН, обеспечивающих заданное качество обслуживания QoS;

K_{Γ} – коэффициент готовности СУ ВКО;

$K_{\Gamma i}$ – коэффициент готовности i -го ИН;

m – количество ребер в графе;

$M(\bullet)$ – математическое ожидание случайной величины;

m_j – количество линий связи в j -ом пути в составе ИН;

m_{pv} – количество независимых параметров v -го элемента СУ ВКО, требуемых для организации дестабилизирующего воздействия;

n – количество вершин в графе;

N – количество ИН в СУ ВКО;

n_j – количество узлов в j -ом пути в составе ИН;

$N_{\text{тип}}$ – количество типов средств поражения;

$P_{\text{бп.пор } i, \nu}$ – вероятность боевого применения против ν -го элемента СУ ВКО средства поражения i -го типа;

$P_{\text{отк } i}$ – вероятность отказа i -го ИН вследствие естественных внутренних дестабилизирующих процессов, описываемых теорией надежности;

$P_{\text{отк } \nu}$ – вероятность отказа ν -го элемента ИН (ребра или узла) вследствие естественных внутренних дестабилизирующих процессов, описываемых теорией надежности;

$P_{\text{пор } \nu}$ – вероятность физического или функционального поражения ν -го элемента СУ ВКО;

$P_{\text{пор.1 } i, \nu}$ – вероятность физического или функционального поражения ν -го элемента СУ ВКО одним средством поражения i -го типа;

$P_{\text{раб } j}$ – вероятность работоспособного состояния j -го пути в составе ИН;

$P_{\text{раб.эл. } \nu}$ – вероятность работоспособного состояния ν -го элемента ИН;

$P_{\text{рз } \nu}$ – вероятность разведки противником параметров ν -го элемента СУ ВКО;

$P_{\text{рз } \nu i}$ – вероятность разведки противником i -го параметра ν -го элемента СУ ВКО;

$P_{\text{рз.вр } \nu}$ – вероятность вскрытия временных параметров ν -го элемента СУ ВКО при ведении разведки;

$P_{\text{рз.инф } \nu}$ – вероятность вскрытия информационных параметров ν -го элемента СУ ВКО при ведении разведки;

$P_{\text{рз.пр } \nu}$ – вероятность вскрытия местоположения ν -го элемента СУ ВКО в пространстве при ведении разведки;

$P_{\text{рз.пр.РРТР } \nu}$ – вероятность вскрытия местоположения ν -го элемента СУ ВКО в пространстве средствами радио- и радиотехнической разведки (РРТР);

$P_{\text{рз.пр.ОЭР } \nu}$ – вероятность вскрытия местоположения ν -го элемента СУ ВКО в пространстве средствами оптико-электронной разведки (ОЭР);

$P_{\text{рз.ст } \nu}$ – вероятность вскрытия структурных параметров ν -го элемента СУ ВКО при ведении разведки;

$P_{\text{рз.э } \nu}$ – вероятность успешного приема сигналов и вскрытия энергетических параметров ν -го элемента СУ ВКО при ведении разведки;

$P_{\text{РЭП } i}$ – вероятность подавления количества линий связи i -го ИН большего, либо равного величине реберной связности x_{ν} подграфа $G_{\text{ин } i}$;

$P_{\text{РЭП } \nu}$ – вероятность отказа ν -го элемента ИН (ребра или узла) вследствие РЭП;

$P_{\text{РЭП } \nu}^*$ – вероятность подавления ν -го элемента СУ ВКО средствами РЭП при условии его успешной разведки и вскрытия энергетических, временных и структурных параметров, т.е. при $P_{\text{рз.э } \nu} = 1$, $P_{\text{рз.вр } \nu} = 1$ и $P_{\text{рз.ст } \nu} = 1$;

$P_{\text{св}}$ – вероятность связности ИН;

$P_{\text{св } i}$ – вероятность связности i -го ИН в условиях воздействия на его элементы различных дестабилизирующих факторов;

$P_{\text{скр } \nu i}$ – вероятность скрытности i -го параметра ν -го элемента СУ ВКО;

$P_{\text{скр.вр } \nu}$ – вероятность обеспечения временной скрытности ν -го элемента СУ ВКО;

$P_{\text{скр.инф } v}$ – вероятность обеспечения информационной скрытности v -го элемента СУ ВКО;

$P_{\text{скр.пр.РРТР } v}$ – пространственная скрытность местоположения v -го элемента СУ ВКО по отношению к средствами РРТР;

$P_{\text{скр.пр.ОЭР } v}$ – пространственная скрытность местоположения v -го элемента СУ ВКО по отношению к средствами ОЭР;

$P_{\text{скр.ст } v}$ – вероятность обеспечения структурной скрытности v -го элемента СУ ВКО;

$P_{\text{скр.э } v}$ – вероятность обеспечения энергетической скрытности v -го элемента СУ ВКО;

$P_{y i}$ – устойчивость i -го ИН в СУ ВКО;

$P_{y \text{ ср}}$ – средняя вероятность устойчивости ИН в СУ ВКО;

$P_{\text{ФП } i}$ – вероятность физического поражения узлов связи i -го ИН большего, либо равного величине вершинной связности x_u подграфа $G_{\text{ИН } i}$;

$P_{\text{ФП } v}$ – вероятность отказа v -го элемента ИН (ребра или узла) вследствие его физического поражения;

$P_{\text{ФП } v}^*$ – вероятность физического поражения v -го элемента СУ ВКО при условии его успешной разведки и вскрытия местоположения, т.е. при $P_{\text{рз.пр } v} = 1$;

$P_{\text{ФП.1 } v}^*$ – условная вероятность поражения v -го элемента СУ ВКО одним средством поражения i -го типа, при условии успешной разведки и вскрытия местоположения этого элемента, т.е. $P_{\text{рз.пр } v} = 1$;

Q_k – качество обслуживания, обеспечиваемое путями (путем) на заданном ИН;

$Q^{\text{треб}}$ – требуемый уровень качества обслуживания;

$T_{\text{В } i}$ – время восстановления i -го ИН;

$T_{\text{диагн } i}$ – время диагностики отказа i -го ИН;

$T_{\text{зад } v}$ – время задержки пакета в v -ом элементе j -го пути ИН;

$T_{\text{О } i}$ – время между отказами в i -ом ИН;

$T_{\text{ож } i}$ – время ожидания восстановления связи (удержания конфигурации) i -го ИН;

$t_{\text{отк } i}$ – время отказа i -го ИН, заключающегося в утрате свойства связности;

$T_{\text{перекл } i}$ – время переключения информационных потоков с активных путей на резервные пути в составе i -го ИН;

T_p – среднее время передачи пакета между отдельными узлами в СУ ВКО;

$T_{\text{рек } i}$ – длительность реконфигурации путей или активации резервных путей в i -ом ИН;

$T_{\text{увед } i}$ – время уведомления узла, ответственного за изменение конфигурации путей в i -ом ИН;

u – вершина графа G ;

v – ребро графа G ;

x_u – показатель вершинной связности графа G ;

x_v – показатель реберной связности графа G ;

Y_u – коэффициент кластеризации вершины u ;

z_j – количество элементов j -го пути в составе ИН;

α_i – коэффициент важности i -го ИН в сети;

δ_{min} – минимальная степень вершины;
 δ_u – степень вершины u ;
 $\delta_{u\Sigma}$ – суммарная степень вершин, инцидентных вершине u ;
 η – значение элемента множества B в окрестности точки (a, b) ;
 Θ_A – ограниченное подмножество множества A ;
 Θ_a – окрестность точки (a, b) на множестве A ;
 Θ_B – ограниченное подмножество множества B ;
 Θ_b – окрестность точки (a, b) на множестве B ;
 λ_i – интенсивность трафика, передаваемого в i -ом ИН;
 μ – значение элемента множества A в окрестности точки (a, b) ;
 $\varphi(i, j)$ – общее количество путей между вершинами i и j ;
 $\varphi(i, u, j)$ – количество путей между вершинами i и j , проходящих через вершину u ;
 Ω – некоторое отображение.

2. Основные термины и определения

Теория систем рассматривает различные системы произвольной природы, которые могут быть формализованы в виде совокупности входных, выходных и внутренних параметров, параметров среды, элементов, их состояний и связей между ними, а также множества формальных операторов, описывающих как взаимосвязь указанных параметров и элементов между собой, так и движение (развитие) системы во времени и в пространстве состояний [44].

В теории систем указывается, что системам присущи определенные свойства, через которые описываются те или иные качественные изменения системы при воздействии на нее возмущающих воздействий. К таким свойствам системы относятся следующие.

Надежность – способность системы сохранять свои характеристики при изменении параметров среды [44].

Живучесть – способность системы сохранять значение своих других показателей при разрушении части ее структуры [44].

Помехоустойчивость – способность системы выполнять свои функции в условиях помех [44].

Обобщением этих свойств является понятие устойчивости.

Устойчивость – способность системы возвращаться в исходное состояние или в состояние равновесия после того, как она была из этого состояния выведена под влиянием внешних возмущающих воздействий. При этом под *равновесием* понимается состояние системы, которое оно может сохранять сколь угодно долго в отсутствие внешних возмущающих воздействий [45].

В технических системах, зачастую, возврат в нужное состояние происходит за счет реализации функций управления. При этом для реализации адекватного управления необходимо знать текущее состояние системы и то состояние, в которое систему нужно перевести. В связи с этим свойство устойчивости системы оказывается тесно связано со свойствами управляемости и наблюдаемости.

Наблюдаемость – это свойство системы, характеризующее возможность определения ее начального или текущего состояния [44].

Применительно к системе ВКО свойство наблюдаемости характеризует, прежде всего, ее способность с требуемой оперативностью, полнотой и достоверностью собирать сведения о воздушной и космической обстановке, а также о состоянии и боеготовности своих сил и средств.

Управляемость – это свойство системы, характеризующее возможность перевода её из заданного в требуемое состояние путем подачи на ее вход управляющих воздействий [44].

Применительно к системе ВКО свойство управляемости характеризует, прежде всего, способность органов управления с требуемой оперативностью и адекватностью формировать команды управления, непрерывно и своевременно доводить их до управляемых сил и средств.

Необходимо отметить, что характеристика способности системы противостоять негативным условиям внешней среды не ограничивается свойством ее устойчивости. Устойчивость является частным случаем свойства адаптивности систем, а адаптивность – частным случаем свойства их самоорганизации [44].

Адаптивность (адаптируемость) – способность системы изменять свое поведение с целью сохранения, улучшения или приобретения новых характеристик в условиях воздействий изменяющейся среды [44].

Самоорганизуемость – способность системы самостоятельно вследствие внутренних процессов изменять свое поведение или структуру приспособляясь к изменяющимся условиям среды, сохраняя при этом свою целостность [44].

При этом свойство самоорганизации обобщает широкий класс системных свойств, преимущественно сложных систем, направленных на их развитие в интересах повышения приспособляемости к внешней среде: адаптивность, самоприспособляемость, самовосстановление, самообучение, самовоспроизведение и т.д. [44].

Применительно к АСУ и КСА ВКО, как к автоматизированным системам, понятия устойчивости, живучести, помехозащищенности, адаптивности и надежности регламентируются ГОСТ 34.003-90 «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения» [46].

Живучесть автоматизированной системы – свойство автоматизированной системы, характеризующееся способностью выполнять установленный объем функций в условиях воздействий внешней среды и отказов компонентов системы в заданных пределах [46].

Помехоустойчивость автоматизированной системы – свойство автоматизированной системы, характеризующееся способностью выполнять свои функции в условиях воздействия помех, в частности от электромагнитных полей [46].

Надежность автоматизированной системы – комплексное свойство автоматизированной системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность автоматизированной

системы выполнять свои функции в заданных режимах и условиях эксплуатации. Надежность автоматизированной системы включает свойства безотказности и ремонтпригодности автоматизированной системы, а в некоторых случаях и долговечности технических средств автоматизированной системы [46].

Как интегральное свойство именно автоматизированных систем военного назначения ГОСТ 34.003-90 дает следующее определение.

Устойчивость автоматизированной системы управления военного назначения – комплексное свойство автоматизированной системы управления военного назначения, характеризуемое живучестью, помехоустойчивостью и надежностью автоматизированной системы управления [46].

При этом обеспечение требуемого уровня устойчивости автоматизированной системы, достигается за счет ее адаптивности к внешней среде, которая может изменяться под воздействием дестабилизирующих факторов.

Адаптивность автоматизированной системы – способность автоматизированной системы изменяться для сохранения своих эксплуатационных показателей в заданных пределах при изменениях внешней среды [46].

Дестабилизирующие факторы – воздействия на систему, источником которых являются физические, технологические, радиоэлектронные, информационные или другие процессы внутреннего или внешнего характера, приводящие к выходу из строя элементов системы или к нарушению их функционирования [44].

Применительно к системе ВКО основными видами дестабилизирующих воздействий будут массированные удары СВКН, а также постановка помех средствами радиоэлектронного противодействия (РЭП), находящимся в боевых эшелонах СВКН с целью снижения эффективности источников радиолокационной информации (РЛИ), а также нарушения функционирования каналов связи системы управления.

Рассматривая АСУ и КСА ВКО, как составные части системы военного управления, отметим, что к военному управлению, как к процессу, предъявляются дополнительные требования по [44]:

- *устойчивости* – способности органов управления выполнять свои функции в сложной, резко меняющейся обстановке в условиях помех и массированных дестабилизирующих воздействиях противника;
- *непрерывности* – возможности органов управления постоянно взаимодействовать с объектами управления;
- *оперативности* – способности органов управления получать, обрабатывать и преобразовывать информацию, а также формировать управляющие воздействия и доводить их до управляемых объектов в соответствии с темпом изменения текущей ситуации;
- *скрытности* – способности сохранять в тайне информацию о процессах управления, конечной цели и решаемых задачах, имеющихся силах и средствах, а также их возможностях; факт, время и место передачи управляющей информации, ее содержание и принадлежность к конкретным объектам системы управления.

Обобщая вышесказанное, дадим окончательное понятие устойчивости системы управления ВКО, которое в дальнейшем будет использоваться в работе.

Система управления ВКО – совокупность источников информации о воздушной и космической обстановке, средств связи, органов управления, принимающих решения о действиях при отражении ударов СВКН, а также управляемых сил и средств, предназначенных для непосредственно поражения СВКН или снижения их эффективности, а также сил и средств обеспечения.

Устойчивость системы управления ВКО – комплексное свойство системы управления ВКО, состоящее в способности органов управления выполнять свои функции в сложной быстро меняющейся обстановке в условиях массированных дестабилизирующих воздействий, обусловленных ударами СВКН, применением обычного и ядерного оружия, и всех видов помех, обусловленных воздействием средств РЭП противника, которое характеризуется такими частными свойствами как живучесть, помехоустойчивость и надежность.

При этом под частными свойствами будем понимать следующее.

Живучесть системы управления ВКО – частное свойство системы управления ВКО, состоящее в способности органов управления выполнять свои функции в сложной быстро меняющейся обстановке в условиях массированных дестабилизирующих воздействий, обусловленных ударами СВКН, применением обычного и ядерного оружия.

Помехозащищенность системы управления ВКО – частное свойство системы управления ВКО, состоящее в способности органов управления выполнять свои функции в сложной быстро меняющейся обстановке в условиях всех видов помех, обусловленных воздействием средств РЭП противника.

Надежность системы управления ВКО – частное свойство системы управления ВКО, состоящее в способности органов управления выполнять свои функции в заданных режимах и условиях эксплуатации, при отсутствии массированных внешних дестабилизирующих воздействий и каких-либо помех.

Фактически, говоря об обеспечении устойчивости системы управления ВКО, мы говорим о боевой устойчивости самой системы ВКО.

Боевая устойчивость – состояние группировки войск и сил флота (соединений, частей, подразделений, одиночных кораблей и их групп), позволяющее сохранять боеспособность и реализовать свойственные им боевые возможности для гарантированного выполнения поставленной боевой задачи в условиях активного противодействия противника [47].

На рис. 1 представлена взаимосвязь перечисленных частных свойств устойчивости системы управления ВКО (живучесть, помехозащищенность и надежность) с параметрами, определяющими оказываемые дестабилизирующие воздействия на элементы системы управления ВКО, а также параметрами, определяющими воздействие средств разведки противника, которые в дальнейшем будут рассматриваться в работе.

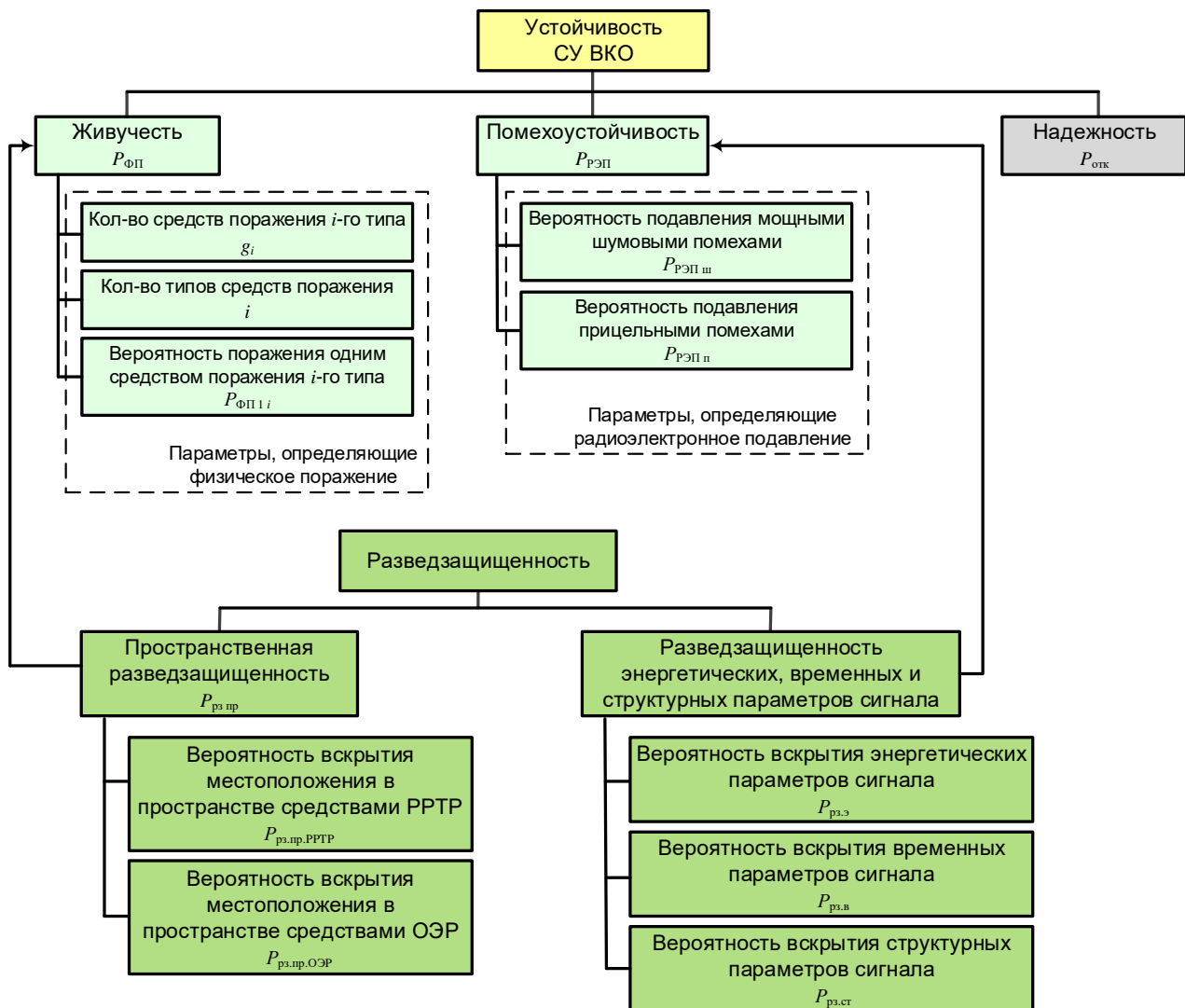


Рис. 1. Взаимосвязь частных свойств устойчивости СУ ВКО и параметров, оказывающих дестабилизирующие воздействия на ее элементы

3. Обоснование и формализация показателя устойчивости СУ ВКО

Ввиду того, что показатели устойчивости СУ ВКО определяются параметрами графа, который ее формализует, определим логическую взаимосвязь показателя устойчивости СУ ВКО с показателями связности из теории графов (рис. 2). При этом будем считать, что:

- 1) вершинам графа СУ ВКО соответствуют [7]:
 - отдельные КП наземного и воздушного базирования, вместе с УС в их составе, а в некоторых случаях – отдельно организованные УС (в соответствии со схемой связи СУ ВКО);
 - отдельные средства поражения наземного и воздушного базирования: ЗРС и ЗРК объектовой и войсковой ПВО, авиационные комплексы перехвата воздушных целей;
 - отдельные средства формирования данных о воздушной и космической обстановке: РЛС, пункты и средства формирования радиолокационной информации (РЛИ), средства разведки и т.д.;

- отдельные средства радиоэлектронного подавления (РЭП) наземного и воздушного базирования;
 - отдельные пункты материально технического обеспечения: резервные РЛС, средства разведки, склады средств поражения зенитно-ракетных войск (ЗРВ) и авиационных средств поражения (АСП);
- 2) ребра графа – линиям связи.

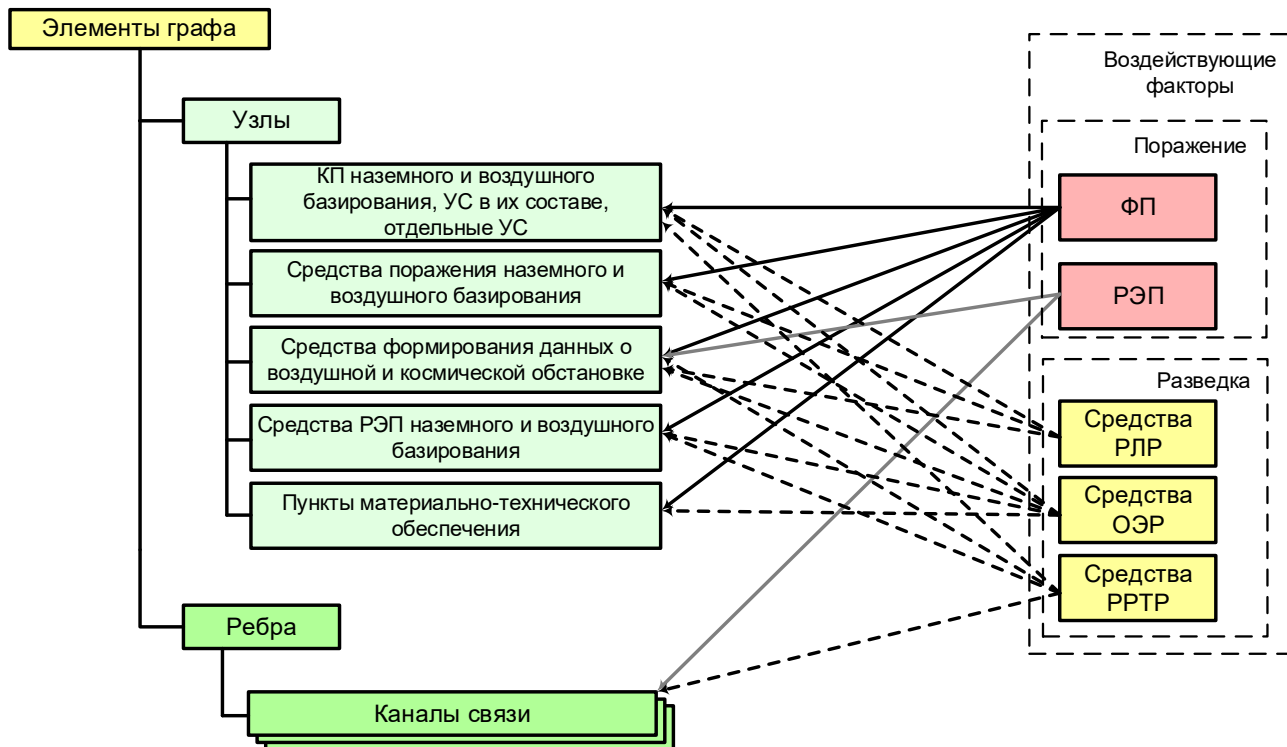


Рис. 2. Взаимосвязь элементов графа, формализующего СУ ВКО, и воздействующих на них факторов

Введем основные понятия, используемые в модели.

Маршрут – конечная чередующаяся последовательность вершин и ребер в графе $G(u, v)$, формализующем СУ ВКО, начинающаяся и оканчивающаяся на вершинах, являющимися концевыми. Маршрут называется открытым, если его концевые вершины различны, в противном случае он называется замкнутым.

Цепь – маршрут, в котором все его ребра (но не вершины) различны.

Путь – открытая цепь, то есть цепь, концевые вершины которой различны.

Степень вершины – число ребер, инцидентных этой вершине.

Информационное направление (ИН) – путь, представляющий собой совокупность ребер и узлов в графе, формализующем СУ ВКО, по которому осуществляется обмен информацией либо между двумя КП (органами управления), либо между отдельным КП (органом управления) и подчиненными ему силами и средствами. ИН состоит из одного или нескольких путей передачи данных информационного обеспечения и команд боевого управления.

Подграф ИН ($G_{ин}$) – подграф, образованный из графа G элементами (вершинами и ребрами), входящими в данное ИН.

Показатели связности СУ ВКО могут быть определены через показатели связности графа $G(u, v)$, формализующего СУ ВКО, в виде множеств вершин $\{u\}$ и соединяющих их ребер $\{v\}$ (рис. 3). При этом, как правило, в процессе формализации СУ вершинами графа представляются такие узлы СУ, к которым направлены не менее трех линий связи. Показатели связности i -го ИН определяются через показатели связности его подграфа $G_{ин i}$.

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 [48]. 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:

$$x_u \leq x_v \leq \delta_{min} \leq 2m/n, \quad (1)$$

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

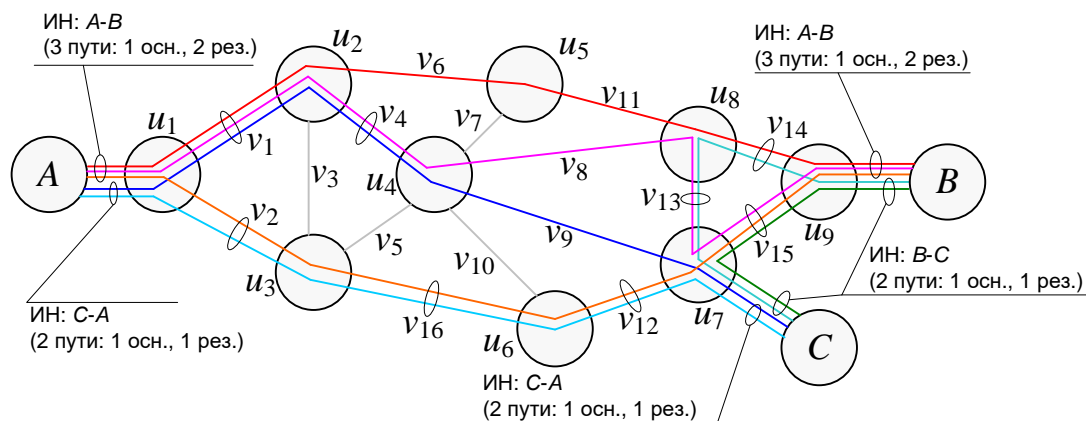


Рис. 3. Граф, формализующий СУ ВКО

Проведя анализ выражения (1), можно сделать вывод о том, что связность графа G нарушается при удалении x_u вершин или x_v ребер. Предельный случай для неравенства (1) наступает в случае, если граф сети полностью связный. В этом случае любая пара вершин графа связана между собой ребром и имеет место равенство

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

Таким образом, значение связности СУ ВКО максимально для полностью связного графа. Для остальных случаев ее значение не может превысить значения минимальной степени вершины δ_{min} . То есть для повышения связности СУ ВКО в условиях дестабилизирующих воздействий СВКН необходимо равномерное распределение плотности степеней вершин формализованного графа СУ ВКО.

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

Анализ функционирования СУ ВКО в условиях удара СВКН позволяет сделать вывод о том, что основными источниками дестабилизирующих воздействий на линии связи и РЛС являются преднамеренные помехи, а на КП и их УС – ударные средства физического поражения и ФП ЭМИ. Причем вклад преднамеренных помех в складывающуюся электромагнитную обстановку в военное время несоизмеримо больше, нежели естественных помех, а вероятность поражения КП средствами поражения много выше вероятности их отказа вследствие естественных процессов снижения их надежности. Поэтому для СУ ВКО значение реберной связности x_v характеризует эффективность применения средств РЭП, а значение вершинной связности x_u – эффективность применения средств поражения (физического и ФП ЭМИ). Таким образом, значения вершинной (x_u) и реберной (x_v) связности формализованного графа СУ ВКО могут служить как критериями устойчивости СУ ВКО, так и критериями эффективности дестабилизирующих воздействий СВКН и определять то количество элементов СУ ВКО, отказ которых соответствует утрате свойства ее устойчивости.

Дополнительно к показателям реберной и вершинной связности можно использовать показатели из теории сложных сетей, представленные в работе [48] и также описывающие устойчивость формализованного графа СУ ВКО.

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

$$D(G) = \max(d_{ij} \mid d_{ij} < \infty), i=1\dots n, j=1\dots n, i \neq j. \quad (3)$$

Данный показатель характеризует требование к сетевому протоколу маршрутизации, используемому в СУ ВКО, 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 СУ ВКО.

3. Средний путь d_{cp} между вершинами графа G :

$$d_{cp} = \frac{2}{n(n+1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}, \quad (4)$$

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

Чем меньше величина среднего пути d_{cp} , тем меньше элементов СУ ВКО (вершин и ребер) входит в состав путей ИН и, соответственно, ниже вероятность их отказа и выше вероятность связности СУ ВКО.

4. Показатель уязвимости сети H_z относительно удаления z -го элемента СУ ВКО (вершины или ребра):

$$H_z = |E - E_z| / E, \quad (5)$$

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

5. Посредничество b_u вершины u :

$$b_u = \sum_{i \neq j} \frac{\varphi(i, u, j)}{\varphi(i, j)}, \quad (6)$$

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 передаче 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.

б. Коэффициент кластеризации вершины Y_u :

$$Y_u = \frac{2\delta_{u\Sigma}}{\delta_u(\delta_u - 1)}, \quad (7)$$

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. Как правило, коэффициент кластеризации выше у КП и меньше – у управляемых компонент СУ ВКО.

Показатели уязвимости H_z , посредничества b_u и кластеризации Y_u могут быть использованы при определении коэффициентов важности элементов СУ ВКО в ходе решения как задач повышения устойчивости СУ ВКО, так и задач повышения эффективности воздействия на нее СВКН. Например, учет коэффициента кластеризации Y_u позволит скорректировать направление воздействия СВКН с целью подавления граничных элементов кластеров в интересах декомпозиции СУ ВКО на изолированные кластеры.

По аналогии с устойчивостью систем связи [44, 48] введем показатель устойчивости СУ ВКО в виде значения вероятности связности ИН $P_{св}$, под которой понимается вероятность того, что на заданном направлении связи между двумя отдельными КП существует хотя бы один путь, по которому возможна передача информации с требуемым качеством (QoS – Quality of Service):

$$P_{св} = P(k_{QoS} \geq 1 \mid \{Q_k\} \in \{Q^{треб}\}), \quad (8)$$

где: k_{QoS} – количество работоспособных путей на заданном ИН, обеспечивающих заданное качество обслуживания QoS; Q_k – качество обслуживания, обеспечиваемое путями (путем) на заданном ИН; $Q^{треб}$ – 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 дестабилизирующих воздействий. В связи с этим в качестве интегрального показателя устойчивости СУ ВКО предлагается использовать среднюю вероятность устойчивости ИН ($P_{y\text{cp}}$):

$$P_{y\text{cp}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{y_i}, \quad (9)$$

где: N – количество ИН в СУ ВКО; P_{y_i} – устойчивость i -го ИН, $i = \overline{1, N}$.

При этом устойчивость каждого i -го ИН P_{y_i} , входящего в сумму (9), будет определяться выражением [48]:

$$P_{y_i} = K_{\Gamma_i} P_{cb_i}, \quad (10)$$

где: K_{Γ_i} – коэффициент готовности i -го ИН; P_{cb_i} – вероятность связности i -го ИН в условиях влияния на его элементы дестабилизирующих воздействий.

В выражении (10) коэффициент готовности K_{Γ_i} определяет временные параметры процесса «отказ – восстановление ИН» при влиянии на ИН дестабилизирующих факторов СВКН, а вероятность связности P_{cb_i} – структурно-вероятностные параметры ИН.

Необходимо отметить, что при использовании показателя устойчивости в виде выражения (9) вводится допущение о равнозначности различных ИН в составе СУ ВКО. Однако по факту ИН имеют различную важность и для учета их различного вклада в общий показатель устойчивости (выражение (9)) целесообразно ввести соответствующие весовые коэффициенты важности α_i для каждого i -го ИН в СУ ВКО [48]:

$$P_{y_{cp}} = \sum_{i=1}^N \alpha_i P_{y_i}, \quad (11)$$

где α_i удовлетворяют условию нормировки

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

В работе [48], посвященной устойчивости систем связи, коэффициенты важности i -го ИН предложено определять исходя из циркулирующих по ним долей трафика:

$$\alpha_i(\lambda_i) = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (12)$$

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

Однако, для СУ ВКО такой показатель не будет отражать реальную важность ИН при решении задач управления. Поэтому в качестве весовых коэффициентов α_i ИН СУ ВКО предлагается использовать коэффициенты уязвимости $H_z(5)$, посредничества $b_u(6)$ и кластеризации $Y_u(7)$.

Например, в случае учета степени посредничества узлов b_u в коэффициенте важности i -го ИН, α_i примет вид:

$$\alpha_i(b_u) = \frac{\sum_{j=1}^{k_i} \sum_{v=1}^{n_j} b_{u_{jv}}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{v=1}^{n_j} b_{u_{ijv}}}, \quad (13)$$

где: N – количество ИН в СУ ВКО; k_i – количество путей в составе i -го ИН; n_j – количество вершин в составе j -го пути i -го ИН; $b_{u_{jv}}$ – коэффициент посредничества (вхождения) v -го элемента j -го пути в рассматриваемом ИН; $b_{u_{ijv}}$ – коэффициент посредничества v -го элемента j -го пути в i -ом 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 :

$$\alpha_i(H) = \frac{\sum_{j=1}^{k_i} \sum_{v=1}^{z_j} H_{jv}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{v=1}^{z_j} H_{ijv}}, \quad (14)$$

где: z_j – количество элементов (m_j ребер и n_j вершин) в составе ИН; H_{jv} – коэффициент уязвимости v -го элемента (вершины или ребра) j -го пути рассматриваемого ИН; H_{ijv} – коэффициент уязвимости v -го элемента (вершины или ребра) j -го пути i -го ИН;

$$\alpha_i(Y_u) = \frac{\sum_{j=1}^{k_i} \sum_{v=1}^{n_j} Y_{ujv}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_i} \sum_{v=1}^{n_j} Y_{uijv}}, \quad (15)$$

где: n_j – количество вершин в составе ИН; Y_{ujv} – коэффициент кластеризации v -ой вершины j -го пути рассматриваемого ИН; Y_{uijv} – коэффициент кластеризации v -ой вершины j -го пути i -го ИН.

Вместе с тем, даже несмотря на возможность использования весовых коэффициентов, показатель устойчивости (10) учитывает структурные и динамические параметры устойчивости СУ ВКО в слишком обобщенном виде, а также не учитывает особенности воздействия на элементы ИН различных типов дестабилизирующих воздействий. Для учета этого были разработаны отдельные подходы к формализации дестабилизирующих факторов СВКН, представленные ниже.

4. Формализация структурных параметров информационных направлений в СУ ВКО с учетом дестабилизирующих воздействий различного типа на ее отдельные элементы

Рассмотрим более подробно факторы, определяющие вероятность связности отдельного i -го ИН $P_{св\ i}$ в выражении (10) при определении показателя устойчивости СУ ВКО.

В качестве основных дестабилизирующих воздействий на ИН, в соответствии с материалом, изложенным в [22], будем рассматривать следующие:

- физическое поражение (ФП) (в том числе ФП ЭМИ) – уничтожение элементов ИН, соответствующих КП/УС, одиночных УС, РЛС различного назначения ударными средствами СВКН: МБР; КРМБ; КРВБ; планируемыми управляемыми авиабомбами (УАБ); ракетами самонаводящегося на излучение оружия (СНИО) и др. Данный тип дестабилизирующего воздействия негативно влияет на показатель живучести;
- радиоэлектронное подавление (РЭП) – подавление каналов связи между КП/УС или одиночными УС в результате воздействия средств РЭП. Данный тип дестабилизирующего воздействия негативно влияет на показатель помехоустойчивости;
- отказы радиоэлектронных и информационно-технических средств КП/УС, одиночных УС, РЛС различного назначения вследствие воз-

действия внутренних дестабилизирующих факторов и естественных процессов снижения их надежности: старения и выработки своего ресурса. Данный тип дестабилизирующего воздействия негативно влияет на показатель надежности.

Для учета специфики каждого типа дестабилизирующего воздействия вероятность связности $P_{св i}$ каждого отдельного i -го ИН из выражения (10) предлагается определять в следующем виде:

$$P_{св i} = (1 - P_{ФП v})(1 - P_{РЭП v})(1 - P_{отк v}), \quad (16)$$

где $P_{ФП v}$ – вероятность поражения ударными СВКН такого количества КП/УС в ИН, которое больше или равно величине вершинной связности x_u подграфа $G_{ИН i}$ и которое переводит этот подграф в несвязное состояние; $P_{РЭП i}$ – вероятность радиоэлектронного подавления такого количества линий связи ИН, которое больше или равно величине реберной связности x_v подграфа $G_{ИН i}$ и которое переводит этот подграф в несвязное состояние; $P_{отк i}$ – вероятность такого количества отказов элементов ИН (вершин или ребер) вследствие воздействия внутренних дестабилизирующих факторов и естественных процессов снижения надежности, которое больше или равно величине вершинной связности x_u или реберной связности x_v подграфа $G_{ИН i}$ и которое переводит этот подграф в несвязное состояние.

При возможности назначения для поражения v -го элемента СУ ВКО определенного количества разнотиповых ударных СВКН (например, ракет различного типа, либо однотипных ракет с различной боевой частью (БЧ)), обладающих различными вероятностями поражения, итоговая вероятность физического поражения (как физического, так и функционального) v -го элемента СУ ВКО $P_{ФП v}$:

$$P_{ФП v} = \sum_{i=1}^{N_{тип}} \left(P_{бп.ФП i, v} \left(1 - (1 - P_{ФП 1 i, v})^{g_i} \right) \right), \quad (17)$$

где: $P_{бп.ФП i, v}$ – вероятность боевого применения против v -го элемента СУ ВКО средства поражения i -го типа (вероятности $P_{бп.ФП i, v}$ должны образовывать полную группу событий и должно выполняться условие $\sum_i P_{бп.ФП i, v} = 1$. Если с какой-то вероятностью $P_{бп.ФП i, v}$ против v -го элемента СУ ВКО средства поражения не применяются, то эта вероятность включается в сумму $\sum_{i=1}^{N_{тип}} \left(P_{бп.ФП i, v} \left(1 - (1 - P_{ФП 1 i, v})^{g_i} \right) \right)$ с $g_i = 0$ и $P_{ФП 1 v} = 0$); i – счетчик типов средств поражения; $N_{тип}$ – количество типов средств поражения; $P_{ФП 1 i, v}$ – вероятность поражения v -го элемента СУ ВКО одним средством поражения i -го типа; g_i – количество средств поражения i -го типа.

Условие о влиянии каждого типа дестабилизирующего воздействия таким образом, чтобы оно приводило к критическому снижению вершинной (x_u) или реберной (x_v) связности подграфа $G_{ИН i}$ в выражении (16), т.е. переводило бы этот подграф в несвязное состояние, по сути значит, что в таком подграфе пути передачи между КП-источником и КП-адресатом в ИН отсутствуют.

Вместе с тем определение числового значения выражения (16) для всего ИН может представлять определенную сложность. Однако, если известны вероятности воздействия соответствующих дестабилизирующих факторов на каждый элемент СУ ВКО, можно применить следующую свертку показателей.

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

$$P_{св i} = 1 - \prod_{j=1}^{k_i} (1 - P_{раб j}) = 1 - \prod_{j=1}^{k_i} \left(1 - \prod_{v=1}^{z_j} P_{раб.эл. v} \right), \quad (18)$$

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

Отметим, что для свертки (18) введено допущение о том, что каждый j -ый 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 -ых путей, каждый из которых содержит z_j элементов ($j = \overline{1, k_i}$).

В выражении (18) предполагается, что каждый v -ый элемент i -го ИН (вершина или ребро) может подвергаться воздействию дестабилизирующих факторов всех типов:

$$P_{раб.эл. v} = (1 - P_{ФП v})(1 - P_{РЭП v})(1 - P_{отк v}),$$

где: $P_{ФП v}$ – вероятность отказа v -го элемента ИН (КП или УС) вследствие его физического ударными СВКН или функционального поражения ЭМИ; $P_{РЭП v}$ – вероятность отказа v -го элемента ИН (канала связи) вследствие его радиоэлектронного подавления; $P_{отк v}$ – вероятность отказа v -го элемента ИН (КП/УС или канала связи) вследствие воздействия внутренних дестабилизирующих факторов и естественных процессов снижения его надежности.

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

Как будет показано далее (в выражении (27)) вероятность физического или функционального поражения, в силу того, что они фактически отличаются только использованием ракет с обычной или ЭМИ БЧ, может быть представлена единым показателем – вероятностью физического поражения v -го элемента ИН $P_{ФП v}$. В этом случае итоговое выражение для вероятности работоспособности v -го элемента будет следующим:

$$P_{раб.эл. v} = (1 - P_{ФП v})(1 - P_{РЭП v})(1 - P_{отк v}). \quad (19)$$

Из выражения (18) можно определить математическое ожидание количества работоспособных путей в ИН $M(k)$:

$$M(k) = \sum_{j=1}^{k_i} j \left(1 - \prod_{v=1}^{z_j} P_{раб.эл. v} \right). \quad (20)$$

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

$$k_i = \left\lceil \log_{(1-P_{\text{раб } j})} (1-P_{\text{св } i}) \right\rceil, \quad (21)$$

где $\lceil \bullet \rceil$ – оператор округления до наименьшего целого числа.

Зачастую в практике построения современных сетей связи СУ ВКО 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_j элементов, где $j = \overline{1, k_i-1}$), будет определяться как:

$$P_{\text{св } i} = 1 - \left(1 - \prod_{v=1}^{z_{\text{осн}}} P_{\text{раб.эл. } v} \right) \prod_{j=1}^{k_i-1} \left(1 - \prod_{v=1}^{z_j} P_{\text{раб.эл. } v} \right). \quad (22)$$

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

Вместе с тем, выражение (22) не учитывает возможные пересечения путей на элементах подграфа ИН. Зависимость вероятности связности i -го ИН $P_{\text{св } i}$ от количества путей k_i в ИН с учетом их пересечений по общим элементам сети подробно рассмотрена в работах Д.А. Ковалькова [49], С. М. Одоевского, П. В. Лебедева [50].

5. Формализация структурных параметров устойчивости СУ ВКО с учетом ведения противником разведки, применения против отдельных элементов системы различных средств огневого и функционального поражения и постановки различных типов помех

5.1. Формализация факторов разведки

Специфика показателей $P_{\text{ФП } v}$ и $P_{\text{РЭП } v}$ в выражении (19) состоит в том, что для осуществления дестабилизирующего воздействия соответствующего типа необходимо провести предварительную разведку объекта воздействия с целью вскрытия параметров, необходимых для дальнейшего целеуказания средствам поражения. Для средств физического поражения и средств ФП ЭМИ таким параметром является местоположение объектов СУ ВКО, для средств РЭП – сигнальные параметры подавляемых линий связи. Эти параметры вскрываются соответствующими видами разведки. При этом показатели $P_{\text{пор } v}$ и $P_{\text{РЭП } v}$ будут являться условными вероятностями при условии, что параметры элемента СУ ВКО, требуемые для осуществления на него соответствующего типа воздействия, уже были вскрыты с вероятностью 1.

Пусть вероятность успешной разведки противником параметров v -го элемента СУ ВКО равна $P_{\text{рз } v}$. Если для организации дестабилизирующего воздействия системой разведки требуется вскрытие не менее $m_{\text{рз } v}$ независимых i -ых параметров v -го элемента СУ ВКО, то [44]

$$P_{p3v} = \prod_{i=1}^{m_{p3v}} P_{p3vi} \cdot \quad (23)$$

При этом вероятность успешной разведки и вскрытия вышеуказанных i -ых параметров v -го элемента СУ ВКО определяется соответствующими показателями его скрытности [44]:

$$P_{скр\ v\ i} = 1 - P_{p3\ v\ i}, \quad (24)$$

где $P_{скр\ v\ i}$ – вероятность скрытности i -го параметра v -го элемента СС СН, то есть это показатель, определяющий способность элемента не допустить вскрытие своего i -го параметра функционирования разведкой противника.

В работе [44] скрытность радиоэлектронных средств (РЭС), в качестве которых в СУ ВКО может пониматься электронное оборудование АСУ и КСА КП, радиоэлектронное оборудование УС, РЛС систем контроля воздушного пространства и комплексы ПВО, рассматривается в 5-и аспектах:

- 1) *энергетическая скрытность* – способность противостоять обнаружению сигналов РЭС средствами РРТР, которая может оцениваться различными показателями: вероятностью обнаружения сигналов РЭС при заданной вероятности ложной тревоги; отношением сигнал-шум на входе приемника РРТР, обеспечивающем заданные вероятности обнаружения РЭС и уровень вероятности ложной тревоги; дальность обнаружения сигналов РЭС при заданном отношении сигнал-шум;
- 2) *структурная скрытность* – способность противостоять вскрытию структуры сигнала РЭС (определяется используемым кодированием и модуляцией) средствами РРТР, которая может оцениваться условной вероятностью правильного определения структуры сигнала РЭС при условии, что сигнал правильно обнаружен;
- 3) *информационная скрытность* – способность противостоять вскрытию смысла передаваемых сообщений в сети связи СУ ВКО средствами радиоразведки (РР), при условии правильного вскрытия структуры сигнала, которая может оцениваться вероятностью вскрытия семантического содержания передаваемых сообщений;
- 4) *временная скрытность* – способность противостоять вскрытию средствами РРТР временных параметров работы РЭС, которая может оцениваться вероятностью сбора информации о периодичности и длительности сеансов работы РЭС за долговременный период наблюдения;
- 5) *пространственная скрытность* – способность противостоять вскрытию местоположения РЭС и пространственной ориентации направлений ее работы, которая может оцениваться различными показателями: вероятностью точного определения местоположения РЭС; вероятностью точного определения направлений связи РЭС; радиусом зоны, в которой с заданной вероятностью находится РЭС.

Для решения задач обнаружения РЭС, являющихся значимыми объектами СУ ВКО, в интересах их дальнейшего физического поражения, наиболее важным показателем является пространственная скрытность.

Для решения задач подавления приемников РЭС, входящими в состав УС и РЛС, наиболее важными показателями являются: энергетическая, структурная и временная скрытность. При этом информационная скрытность объектов СУ ВКО не играет какой-либо важной роли для их поражения или подавления, поэтому в дальнейшем она рассматриваться не будет.

Несмотря на широкую применимость вышеуказанных показателей скрытности для оценки помехозащищенности РЭС, предлагается модифицировать эти показатели в направлении их использования для оценивания эффективности именно тех видов разведки, которые ориентированы на вскрытие элементов СУ ВКО в интересах организации на них соответствующего типа дестабилизирующих воздействий.

5.2. Фактор разведки пространственных параметров (местоположения)

Вероятность успешной разведки местоположения ν -го элемента СУ ВКО $P_{\text{рз.пр}\nu}$ в выражении (24), с учетом того, что разведка местоположения ν -го элемента СУ ВКО может вестись средствами РРТР и ОЭР, которые действуют одновременно и независимо, можно определить в соответствии с выражением:

$$P_{\text{рз.пр}\nu} = P_{\text{рз.пр.РРТР}\nu} + P_{\text{рз.пр.ОЭР}\nu} - P_{\text{рз.пр.РРТР}\nu} P_{\text{рз.пр.ОЭР}\nu},$$

Где: $P_{\text{рз.пр.РРТР}\nu}$ – вероятность вскрытия местоположения в пространстве ν -го элемента СУ ВКО средствами РРТР; $P_{\text{рз.пр.ОЭР}\nu}$ – вероятность вскрытия местоположения в пространстве ν -го элемента СУ ВКО средствами ОЭР.

Так как оба эти вида разведки ориентированы на нарушение свойства пространственной скрытности элемента СУ ВКО, то последнее выражение можно записать в виде:

$$\begin{aligned} P_{\text{рз.пр}\nu} &= P_{\text{рз.пр.РРТР}\nu} + P_{\text{рз.пр.ОЭР}\nu} - P_{\text{рз.пр.РРТР}\nu} P_{\text{рз.пр.ОЭР}\nu} = \\ &= (1 - P_{\text{скр.пр.РРТР}\nu}) + (1 - P_{\text{скр.пр.ОЭР}\nu}) - (1 - P_{\text{скр.пр.РРТР}\nu})(1 - P_{\text{скр.пр.ОЭР}\nu}), \end{aligned} \quad (25)$$

где: $P_{\text{скр.пр.РРТР}\nu}$ – пространственная скрытность местоположения ν -го элемента СУ ВКО по отношению к средствам РРТР; $P_{\text{скр.пр.ОЭР}\nu}$ – пространственная скрытность местоположения ν -го элемента СУ ВКО по отношению к средствам ОЭР.

В самом общем случае для определения местоположения ν -ых элементов СУ могут использоваться различные средства РРТР, ОЭР и радиолокационной разведки (РЛР), для противодействия которым проводятся мероприятия обеспечения скрытности элементов СУ:

- от средств РРТР – мероприятия по снижению энергетической и временной доступности радиоизлучений РЭС ν -го элемента, направленные на повышение показателей $P_{\text{скр.э}\nu}$ и $P_{\text{скр.вр}\nu}$.
- от средств ОЭР – мероприятия по снижению заметности ν -го элемента в оптическом и ИК диапазонах наблюдения, направленные на повышение показателя $P_{\text{скр.ОЭС}\nu}$;

- от средств РЛР – мероприятия по снижению заметности ν -го элемента от радиолокационных средств наблюдения, направленные на повышение показателя $P_{\text{скр.РЛР } \nu}$.

При этом отметим, что вероятность правильного определения местоположения ν -го элемента средствами РРТР возможно только при условии энергетической и временной доступности сигналов пеленгуемого РЭС. То есть вероятность правильного определения местоположения ν -го элемента средствами РРТР $P_{\text{рз.пр.РРТР } \nu}$ определяется сверткой показателей:

$$P_{\text{рз.пр.РРТР } \nu} = (1 - P_{\text{скр.э } \nu})(1 - P_{\text{скр.вр } \nu})P_{\text{рз.пр.РРТР } \nu}^*,$$

где: $P_{\text{дост.э } \nu}$ – вероятность энергетической доступности сигналов РЭС ν -го элемента средствам РРТР, в общем случае можно считать, что $P_{\text{дост.э } \nu} = 1 - P_{\text{скр.э } \nu}$; $P_{\text{дост.вр } \nu}$ – вероятность временной доступности сигналов РЭС ν -го элемента средствам РРТР, т.е. взаимного пересечения периода работы РЭС ν -го элемента на излучение и периода наблюдения средства РРТР. В общем случае можно считать, что $P_{\text{дост.вр } \nu} = 1 - P_{\text{скр.вр } \nu}$; $P_{\text{рз.пр.РРТР } \nu}^*$ – вероятность правильного определения местоположения ν -го элемента средствами РРТР при наличии энергетической и временной доступности сигналов определяемого (пеленгуемого) РЭС ($P_{\text{рз.э } \nu} = 1$ и $P_{\text{рз.вр } \nu} = 1$).

С учетом вышеуказанного, в общем случае вероятность успешной разведки местоположения ν -го элемента СУ ВКО $P_{\text{рз.пр } \nu}$ в выражении (24) можно переписать в следующем виде (вместо выражения (25)):

$$\begin{aligned} P_{\text{рз.пр } \nu} &= 1 - (1 - P_{\text{рз.пр.РРТР } \nu})(1 - P_{\text{рз.пр.ОЭР } \nu})(1 - P_{\text{рз.пр.РЛР } \nu}) = \\ &= 1 - (1 - P_{\text{рз.пр.РРТР } \nu}^*(1 - P_{\text{скр.э } \nu})(1 - P_{\text{скр.вр } \nu}))(P_{\text{скр.пр.ОЭР } \nu})(P_{\text{скр.пр.РЛР } \nu}). \end{aligned} \quad (26)$$

5.3. Фактор разведки энергетических, временных и структурных параметров сигналов

В свою очередь для осуществления дестабилизирующего воздействия средствами РЭП необходимо провести предварительную разведку объекта воздействия с точки зрения его энергетических, временных и структурных параметров сигналов, излучаемых этим объектом.

Отметим, что энергетические, временные и структурные параметры сигналов элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС), требуемые для решения задач его радиоэлектронного подавления, вскрываются исключительно средствами РРТР. При этом переход от вероятности разведки к параметрам скрытности ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС) осуществляется следующим образом:

$$P_{\text{рз.э } \nu} = 1 - P_{\text{скр.э } \nu}, \quad P_{\text{рз.вр } \nu} = 1 - P_{\text{скр.вр } \nu}, \quad P_{\text{рз.ст } \nu} = 1 - P_{\text{скр.ст } \nu},$$

где: $P_{\text{скр.э } \nu}$ – вероятность обеспечения энергетической скрытности ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС) от средств РРТР; $P_{\text{рз.вр } \nu}$ – вероятность обеспечения временной скрытности ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС) от средств РРТР; $P_{\text{рз.ст } \nu}$ – вероятность обеспечения структурной скрытности ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС) от средств РРТР.

5.4. Формализация фактора физического поражения элемента СУ ВКО с учетом разведки его пространственных параметров (местоположения)

Вероятность физического поражения ν -го элемента СУ ВКО ударными СВКН в выражениях (16, 17), с учетом того, что для этого необходима разведка с целью вскрытия местоположения этого элемента, будет равна условной вероятности:

$$P_{\text{ФП}\nu} = P_{\text{бп.ФП}\nu} P_{\text{ФП}\nu}^* P_{\text{рз.пр}\nu}, \quad (27)$$

где: $P_{\text{ФП}\nu}$ – значение вероятности физического поражения ν -го элемента СУ ВКО ударными СВКН; $P_{\text{бп.ФП}\nu}$ – вероятность боевого применения против ν -го элемента СУ ВКО средства физического поражения; $P_{\text{ФП}\nu}^*$ – условная вероятность поражения ν -го элемента СУ ВКО при условии его успешной разведки и вскрытия местоположения, т.е. при $P_{\text{рз.пр}\nu} = 1$; $P_{\text{рз.пр}\nu}$ – вероятность успешной разведки местоположения ν -го элемента СУ ВКО в пространстве.

При назначении для физического поражения ν -го элемента СУ ВКО наряда из g однотипных средств поражения, каждый из которых обладает вероятностью поражения $P_{\text{ФП.1}\nu}^*$, итоговая вероятность поражения ν -го элемента СУ ВКО любым из средств поражения в наряде $P_{\text{ФП}\nu}^*$ будет определяться:

$$P_{\text{ФП}\nu}^* = 1 - (1 - P_{\text{ФП.1}\nu}^*)^g.$$

В частности, для наиболее часто встречающегося наряда из 2-ух средств поражения, вероятность $P_{\text{ФП}\nu}^*$ можно рассчитать как:

$$P_{\text{ФП}\nu}^* = 2P_{\text{ФП.1}\nu}^* - (P_{\text{ФП.1}\nu}^*)^2.$$

Аналогично рассуждая, получим выражение для $P_{\text{рЭП}\nu}$ с учетом показателей вероятности разведки параметров отдельных элементов СУ ВКО.

При возможности назначения для поражения ν -го элемента СУ ВКО определенного количества разнотиповых ударных СВКН (например, ракет различного типа, либо ракет с различной БЧ), обладающих различными вероятностями поражения (выражение (17)), итоговая вероятность физического поражения (как физического, так и функционального) ν -го элемента СУ ВКО $P_{\text{ФП}\nu}$:

$$P_{\text{ФП}\nu} = P_{\text{рз.пр}\nu} \sum_{i=1}^{N_{\text{тип}}} \left(P_{\text{бп.ФП}i,\nu} \left(1 - (1 - P_{\text{ФП}1i,\nu}^*)^{g_i} \right) \right), \quad (28)$$

где: $P_{\text{рз.пр}\nu}$ – вероятность вскрытия местоположения в пространстве ν -го элемента СУ ВКО; $P_{\text{бп.ФП}i,\nu}$ – вероятность боевого применения против ν -го элемента СУ ВКО средства поражения i -го типа (вероятности $P_{\text{бп.ФП}i,\nu}$ должны образовывать полную группу событий и должно выполняться условие $\sum_i P_{\text{бп.ФП}i,\nu} = 1$).

Если с какой-то вероятностью $P_{\text{бп.ФП}i,\nu}$ против ν -го элемента СУ ВКО средства поражения не применяются, то эта вероятность включается в сумму $\sum_{i=1}^{N_{\text{тип}}} \left(P_{\text{бп.ФП}i,\nu} \left(1 - (1 - P_{\text{ФП}1i,\nu}^*)^{g_i} \right) \right)$ с $g_i = 0$ и $P_{\text{ФП}1i,\nu}^* = 0$; i – счетчик типов средств поражения; $N_{\text{тип}}$ – количество типов средств поражения; $P_{\text{ФП}1i,\nu}^*$ – условная вероятность поражения ν -го элемента СУ ВКО одним средством поражения i -го ти-

па, при условии успешной разведки и вскрытия местоположения этого элемента, т.е. $P_{рз.пр\ v}=1$; g_i – количество средств поражения i -го типа.

5.5. Формализация фактора радиоэлектронного подавления элемента СУ ВКО с учетом разведки энергетических, временных и структурных параметров его сигналов

Вероятность радиоэлектронного подавления ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС) средствами РЭП с учетом того, что для этого необходима разведка энергетических, временных и структурных параметров этого элемента СУ ВКО, будет равна произведению соответствующих условных вероятностей:

$$P_{РЭП\ \nu} = P_{бп.РЭП\ \nu} P_{РЭП\ \nu}^* P_{рз.ст\ \nu} P_{рз.вр\ \nu} P_{рз.э\ \nu},$$

где: $P_{РЭП\ \nu}$ – значение вероятности радиоэлектронного подавления ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС); $P_{бп.РЭП\ \nu}$ – вероятность боевого применения против ν -го элемента СУ ВКО средства РЭП; $P_{РЭП\ \nu}^*$ – условная вероятность радиоэлектронного подавления ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС) при условии вскрытия структурных и временных параметров ($P_{рз.ст\ \nu}=1$, $P_{рз.вр\ \nu}=1$); $P_{рз.э\ \nu}$ – значение вероятности успешного приема сигналов и вскрытия энергетических параметров ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС); $P_{рз.вр\ \nu}$ – значение условной вероятности разведки и вскрытия временных параметров ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС) при условии успешного вскрытия энергетических параметров $P_{рз.э\ \nu}=1$; $P_{рз.ст\ \nu}$ – значение условной вероятности разведки и вскрытия структурных параметров ν -го элемента СУ ВКО (канала связи или РЛС) при условии успешного вскрытия энергетических параметров $P_{рз.э\ \nu}=1$.

Отметим ряд особенностей вычисления численных значений последнего выражения. Средства РЭП в общем случае могут формировать два основных типа помех:

- мощные шумовые помехи (их эффективность определяется вероятностью подавления $P_{РЭП.ш\ \nu}^*$), формируемые во всем диапазоне рабочих частот РЭС ВКО, которые являются относительно низкоэффективными ($P_{РЭП.ш\ \nu}^* \ll P_{РЭП.п\ \nu}^*$) и применяются против РЭС ВКО, параметры которых точно неизвестны. Постановка этих помех может осуществляться на основе примерного частотного плана подавляемых РЭС, без знания точных энергетических, временных и структурных параметров сигналов подавляемых РЭС;
- прицельные помехи (их эффективность определяется вероятностью подавления $P_{РЭП.п\ \nu}^*$), формируемые на фиксированных рабочих частотах подавляемых РЭС ВКО с учетом энергетических ($P_{рз.э\ \nu}$), временных ($P_{рз.вр\ \nu}$) и структурных ($P_{рз.ст\ \nu}$) параметров их сигналов. Такие помехи являются более эффективными, чем шумовые помехи ($P_{РЭП.ш\ \nu}^* \ll P_{РЭП.п\ \nu}^*$) и позволяют ставить адресную помеху конкретному РЭС. Однако при постановке таких помех является принципиально важным высокая ве-

роятность правильной разведки соответствующих параметров сигналов.

На практике часто встречается ситуация, когда против элемента СУ ВКО, представляющий собой РЭС, формируется сложная помеховая обстановка – наземные (корабельные) средства РЭП формируют мощные шумовые помехи во всем диапазоне потенциальных рабочих частот РЭС, а воздушные средства РЭП на специализированных самолетах или БПЛА, следующих в составе ударных эшелонов СВКН, будучи облученными сигналами конкретной РЛС, вскрывая их энергетические, временные и структурные параметры, наоборот формируют уже прицельную помеху, ориентированную на подавление этой РЛС [3].

С учетом вышесказанного, вероятность подавления конкретного РЭС ВКО шумовыми или прицельными помехами $P_{РЭП\ \nu}$ будет определяться в соответствии с выражением:

$$P_{РЭП\ \nu} = P_{\text{бп.РЭП.ш}\ \nu} P_{\text{РЭП.ш}\ \nu}^* + P_{\text{рз.э}\ \nu} P_{\text{рз.ст}\ \nu} P_{\text{рз.вр}\ \nu} P_{\text{бп.РЭП.п}\ \nu} P_{\text{РЭП.п}\ \nu}^* - (P_{\text{бп.РЭП.ш}\ \nu} P_{\text{РЭП.ш}\ \nu}^*) (P_{\text{рз.э}\ \nu} P_{\text{рз.вр}\ \nu} P_{\text{рз.ст}\ \nu} P_{\text{бп.РЭП.п}\ \nu} P_{\text{РЭП.п}\ \nu}^*), \quad (29)$$

где: $P_{\text{бп.РЭП.ш}\ i,\nu}$ – вероятность боевого применения против ν -го элемента СУ ВКО мощных шумовых помех; $P_{\text{бп.РЭП.п}\ i,\nu}$ – вероятность боевого применения против ν -го элемента СУ ВКО прицельных помех, с учетом энергетических, временных и структурных параметров сигналов.

6. Формализация временных параметров устойчивости СУ ВКО с учетом длительности восстановления управления после дестабилизирующих воздействий

В качестве временного показателя устойчивости i -го ИН можно применить коэффициент готовности $K_{Г\ i}$, который определяется временем между отказами ИН $T_{O\ i}$ и временем восстановления ИН $T_{B\ i}$:

$$K_{Г\ i} = \frac{T_{O\ i}}{T_{O\ i} + T_{B\ i}}. \quad (30)$$

В случае если известны временные параметры дестабилизирующих воздействий и длительности между отказами ИН можно аппроксимировать в виде функции интенсивности отказов каждого i -го ИН $\lambda_{\text{отк}\ i}(t)$, то можно определить функцию вероятности длительности сохранения работоспособности i -го ИН, которая соответствует вероятности его связного состояния $P_{\text{св}\ i}$, когда обеспечивается непрерывность управления управляемым объектом со стороны органов управления:

$$P_{\text{св}\ i}(t) = P(t_{\text{отк}\ i} \geq t), \quad (31)$$

где $t_{\text{отк}\ i}$ – длительность до момента отказа i -го ИН, заключающегося в утрате им свойства связности.

В результате преобразований с использованием научно-методического аппарата теории надежности выражение (31) примет вид:

$$P_{\text{св}\ i}(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_{\text{отк}\ i}(\tau) d\tau\right). \quad (32)$$

Наработка на отказ (или время между отказами ИН) T_{O_i} является математическим ожиданием функции вероятности времени сохранения работоспособного состояния ИН и, с учетом (32), определяется выражением:

$$T_{O_i} = \int_0^{\infty} P_{св i}(t) dt = \int_0^{\infty} \left(\exp \left(- \int_0^{\infty} \lambda_{отк i}(t) dt \right) \right) dt. \quad (33)$$

При допущении о конфликтно-устойчивом процессе функционирования ИН в условиях совокупности дестабилизирующих воздействий, можно считать, что поток отказов является простейшим. Функция распределения интенсивности отказов для i -го ИН в этом случае будет являться постоянной величиной $\lambda_{отк i}(t) = \lambda_{отк i}$. При данных допущениях выражения для $P_{св i}$ и T_{O_i} примут вид:

$$P_{св i}(t) = \exp(-\lambda_{отк i} t), \quad T_{O_i} = 1/\lambda_{отк i}. \quad (34)$$

Время восстановления ИН $T_{В i}$ в выражении (30), согласно работы [47], состоит из времени диагностики отказа ИН $T_{диагн i}$, времени ожидания восстановления связи (удержания конфигурации ИН) $T_{ож i}$, времени уведомления узла, ответственного за изменение конфигурации путей ИН $T_{увед i}$, длительности резервирования и реконфигурации путей в ИН $T_{рек i}$ и времени переключения потоков команд в составе ИН с активных путей на резервные пути $T_{перекл i}$:

$$K_{Г i} = \frac{T_{O_i}}{T_{O_i} + T_{В i}} = \frac{T_{O_i}}{T_{O_i} + (T_{диагн i} + T_{ож i} + T_{увед i} + T_{рек i} + T_{перекл i})}. \quad (35)$$

При этом время уведомления $T_{увед i}$ в ИН зависит от времени ретрансляции T_p между отдельными узлами сообщения об отказе и от количества ретрансляций этого сообщения в сети связи СУ (так называемых, хопов) d_{ij} во время передачи между узлом, обнаружившим отказ пути (узел i), и узлом, ответственным за переключение путей в ИН (узел j):

$$T_{увед i} = T_p d_{ij}. \quad (36)$$

7. Итоговая схема оценивания устойчивости СУ ВКО в конфликте со средствами воздушно-космического нападения

Рассмотренные выше структурно-вероятностные и временные параметры, определяющие единый показатель устойчивости СУ ВКО (определяются выражениями (9) или (11)), могут быть взаимоувязаны в единую формализованную систему, представленную на рис. 4.

Представленная на рис. 4 схема оценки устойчивости СУ ВКО, позволяет увязать между собой в аналитическом виде структурные и временные параметры устойчивости, с учетом возможности поражения КП и УС в составе СУ ВКО различными средствами: средствами физического поражения, средствами ФП ЭМИ, а также радиоэлектронного подавления каналов связи и РЛС.

8. Итоговые выводы и новизна модели

В статье представлена разработанная модель оценивания устойчивости СУ ВКО в конфликте со СВКН, а также формализация показателя устойчивости.

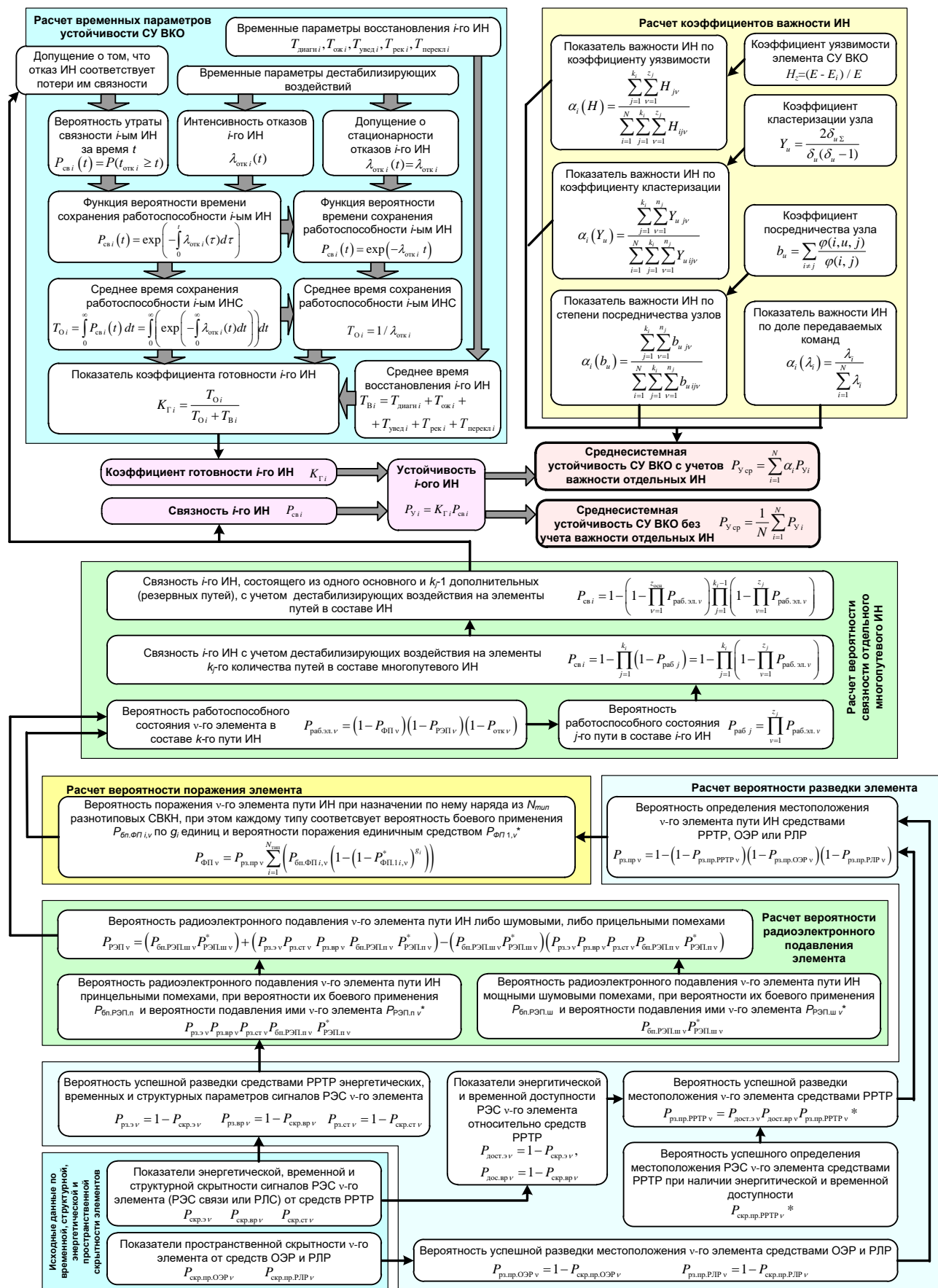


Рис. 4. Итоговая схема модели оценивания устойчивости СУ ВКО в конфликте со СВКН

Новизной данной модели, которая отличает ее от известных работ в области оценки устойчивости ВКО [27, 28, 31, 39, 40-43], является:

- вновь введенный интегральный показатель устойчивости СУ ВКО – средняя вероятность устойчивости ИН в СУ ВКО между ее элементами, являющейся сверткой структурных и временных параметров устойчивости отдельных ИН в СУ ВКО;
- в состав структурных параметров устойчивости ИН введены параметры, в формализованном виде учитывающие возможности РРТР, РЛР и ОЭР при вскрытии элементов СУ ВКО, а также параметры, учитывающие возможности СВКН по физическому и функциональному поражению элементов СУ ВКО, радиоэлектронному подавлению каналов связи и РЛС, являющимися источниками информации о СВКН;
- в состав временных параметров устойчивости ИН введены параметры, которые в формализованном виде учитывают возможности восстановления управления системой ВКО за счет реконфигурации путей передачи данных информационного обеспечения и команд боевого управления в СУ ВКО, переключения на резервные пути передачи в составе ИН при выходе из строя элементов СУ ВКО в результате воздействия СВКН, а также длительность переходных режимов восстановления управления в СУ ВКО при изменении ее структуры.

В дальнейшем данная модель будет использована для разработки методики повышения устойчивости СУ ВКО в конфликте со СВКН, путем внедрения сетевой структуры управления, с адаптивно изменяющимся путями передачи данных информационного обеспечения и команд боевого управления, учитывающими поражение или подавление отдельных элементов системы ВКО.

Литература

1. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Быстрый глобальный удар: ретроспективный анализ концепции, вероятный сценарий нанесения, состав сил и средств, последствия и приоритетные мероприятия по противодействию. Монография. – СПб.: Научное издание, 2022. – 174 с.
2. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Описательная модель комплексов разведки, используемых для вскрытия системы воздушно-космической обороны и целеуказания при нанесении удара средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 190-214.
3. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Описательная модель подсистемы радиоэлектронного подавления в составе средств воздушно-космического нападения, используемых для нарушения функционирования элементов системы воздушно-космической обороны // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 2. С. 76-95.
4. 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.

5. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Митрофанов Д. В. Анализ концепции «Быстрого глобального удара» средств воздушно-космического нападения и обоснование перспективных направлений развития системы воздушно-космической обороны в Арктике в интересах защиты от него // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 15. С. 75-87.

6. Макаренко С. И., Ковальский А. А., Афонин И. Е. Обоснование перспективных направлений развития системы противокосмической обороны Российской Федерации в интересах своевременного вскрытия и отражения «Быстрого глобального удара» средств воздушно-космического нападения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 99-115.

7. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Описательная модель боевых потенциалов сторон в конфликте системы воздушно-космической обороны со средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 41-66.

8. Диалектика технологий воздушно-космической обороны / под ред. В.Н. Минаева. – М.: Издательский дом «Столичная энциклопедия», 2011. – 363 с.

9. Средства воздушно-космического нападения и воздушно-космической обороны. Состояние и развитие / Под общей ред. И.Р. Ашурбейли. – М.: Планета, 2017. – 336 с.

10. Бориско С. Н., Горемыкин С. А. Анализ состояния Воздушно-космических сил России. Перспективы развития // Военная мысль. 2019. № 1. С. 25–37.

11. Лузан А. Г. Новые структуры группировок ПРО-ПВО на театрах военных действий – требование времени // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 3. С. 94-103.

12. Палицын А. Б., Жиленко Д. Б. Анализ традиционных и перспективных задач системы воздушно-космической обороны России: проблемы и пути их решения // Военная мысль. 2020. № 9. С. 6-17.

13. Барвиненко В. В. О попытках ревизии положений теории воздушно-космической обороны // Военная мысль. 2018. № 4. С. 84-90.

14. Казахов Б. Д., Попов Д. М. Методический подход к организации комплексного противодействия системе воздушно-космического нападения противника // Вестник Академии военных наук. 2019. № 1 (66). С. 29-34.

15. Боев С. Ф. Концепция интегрированной системы ракетно-космической обороны России // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 3. С. 7–11.

16. Зинаков С. Н. Концептуальные основы методологии обоснования строительства и развития морской составляющей воздушно-космической обороны Российской Федерации // Военная мысль. 2019. № 6. С. 109-112.

17. Ягольников С. В. Военно-технические аспекты организации и ведения воздушно-космической обороны в современных условиях // Вестник Академии военных наук. 2017. № 2 (59). С. 60-63.

18. Созинов П. А. Актуальные задачи математического моделирования систем воздушно-космической обороны // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. 2017. № 3 (22). С. 17-26. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-zadachi-matematicheskogo-modelirovaniya-sistem-vozdushno-kosmicheskoy-oborony> (дата обращения: 11.07.2021).

19. Боев С. Ф., Гудков А. А., Малышев С. Р., Чеботарь И. В. Обеспечение живучести радиотехнических систем за счет повышения их структурной устойчивости // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 12. С. 80-85.

20. Боев С. Ф., Рахманов А. А. Метод повышения эффективности внедрения новых технологий при создании РЛС нового поколения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 73-81.

21. Боев С. Ф., Рахманов А. А. Методологические основы управления созданием высокоинформативных унифицированных РЛС ракетно-космической обороны // Радиопромышленность. 2016. № 1. С. 6-13.

22. Кочкаров А. А., Рахманов А. А., Тимошенко А. В., Пулято С. А. Структурно-пространственная модель распределения средств системы мониторинга специального назначения по объектам наблюдения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 13. С. 124–132.

23. Кочкаров А. А., Пулято С. А., Петровичев Д. М. Анализ направлений создания специализированных авиационно-космических систем радиолокационного наблюдения средств воздушного нападения // Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны. 2020. № 1 (8). С. 17–23.

24. Кочкаров А. А. Моделирование взаимодействия в информационно-разведывательных системах с динамической структурой связей // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 58–62.

25. Лешко Н. А., Петровичев Д. М., Тимошенко А. В. Анализ состояния и перспектив развития активно-пассивных радиолокационных систем зарубежных и отечественных военно-промышленных компаний // Вестник воздушно-космической обороны. 2020. № 4 (28). С. 6-17.

26. Безель Я. В. Этапы развития автоматизированных систем управления авиацией и ПВО // Вестник Концерна ПВО Алмаз-Антей. 2015. № 2 (14). С. 90-94.

27. Грудинин И. В., Сурувикин 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.

28. Грудинин И. В., Сурувикин С. В. Управление ресурсами информационно-управляющей подсистемы АСУ огнем в интересах обеспечения ее живучести // Известия Института инженерной физики. 2016. № 3 (41). С. 57-62.

29. Грудинин И. В., Майбуров Д. Г. Структурный анализ теории информационного обеспечения управления отражением ударов средств воздушно-космического нападения противника // Военная мысль. 2018. № 8. С. 78-89.

30. Грудинин И. В., Майбуров Д. Г., Какаев В. В. Содержание и структура категорий теории управления межвидовой группировкой войск (сил) при отражении ударов средств воздушно-космического нападения противника // Военная мысль. 2019. № 10. С. 88-96.

31. 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.

32. Майбуров Д. Г., Иконников О. В. Развитие теоретических положений информационного обеспечения управления отражением ударов средств воздушно-космического нападения противника // Военная мысль. 2018. № 9. С. 48-53.

33. Лясковский В. Л. Системотехнические основы автоматизации процессов обработки информации и управления в иерархических системах военного назначения. Монография. – Тверь: ВА ВКО, 2014. – 243 с.

34. Воронин О. В., Потетенко С. В., Кругликов С. В. Совершенствование комплексов средств автоматизации управления формированием тактической противоракетной обороны объектов // Информатика. 2017. № 4 (56). С. 54-69.

35. Моренков В. А. Поколения и возможные направления развития автоматизированной системы управления истребительной авиацией // Военная мысль. 2019. № 10. С. 65-73.

36. Воронов Е.М., Репкин А.Л., Чжан С. Управление ресурсами многообъектных систем летательных аппаратов наземного и воздушного базирования в многорубежной конфликтной ситуации // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 10 (22). С. 14.

37. Воронов Е.М., Ефремов В.А., Репкин А.Л., Сычев С.И. Функциональные свойства конфликтно-оптимального прогноза в системе оптимизационно-имитационного моделирования взаимодействия группировок управляемых средств поражения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2013. № 3 (92). С. 3-25.

38. Воробьёв Д. Н., Куприянов Н. А., Онуфрей А. Ю. Алгоритмическая реализация компарирования траекторных данных радиолокационной станцией дальнего обнаружения // Вопросы радиоэлектроники. Серия «Техника телевидения». 2020. Вып. 4. С. 93-100.

39. Дыбов В. Н., Подгорных Ю. Д. Об устойчивости воздушно-космической обороны Российской Федерации // Военная мысль. 2019. № 10. С. 33-40.

40. 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.

41. Пальгуев Д. А., Шентябин А. Н. К вопросу оценки вероятности объединения радиолокационной информации при третичной обработке в сетевых структурах // Радиопромышленность. 2020. Т. 30. № 2. С. 32-41.

42. Пальгуев Д. А., Панкратов С. И. Сетевая автоматизированная система передачи радиолокационной информации // Патент на изобретение RU 2543068 С1, 27.02.2015. Заявка № 2013152838/07 от 27.11.2013.

43. Пальгуев Д. А. Сравнительная оценка эффективности информационных систем иерархической и сетевой структуры на основе энтропийного подхода // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2020. № 1 (37). С. 15-22.

44. Макаренко С. И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. – СПб.: Научно-технические технологии, 2020. – 337 с.

45. Макаренко С. И. Справочник научных терминов и обозначений. – СПб.: Научно-технические технологии, 2019. – 254 с.

46. ГОСТ 34.003 – 90. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения [Текст]. Введ. 01.01.92. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 15 с.

47. Справочник по терминологии в оборонной сфере // Министерство обороны РФ [Электронный ресурс]. – URL: <http://dictionary.mil.ru/dictionary> (дата обращения: 06.07.2023).

48. 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.

49. Ковальков Д. А. Математические модели оценки надежности мультисервисного узла доступа // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 64-71.

50. 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.

51. Егунов М. М., Шувалов В. П. Анализ структурной надежности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. 2012. № 1. С. 54-60.

References

1. Afonin I. E., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. *Bystryj globalnyj udar: retrospektivnyj analiz koncepcii, veroyatnyj scenarij naneseniya, sostav sil i sredstv, posledstviya i prioritetye meropriyatiya po protivodejstviyu. Monografiya* [A prompt global strike: a retrospective analysis of the concept, the likely scenario of the application, the composition of additional funds, consequences and priority measures to counteract. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2022. 174 p. (in Russian).

2. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S.V. Descriptive model of intelligence systems used to detection the elements of an aerospace defense system and target designation when aerospace attack means are doing prompt global strike. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 1, pp. 190-214 (in Russian).

3. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S. V. Descriptive model of the electronic warfare subsystem as part aerospace attack means used to suppression elements of an aerospace defense system. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 2, pp. 76-95 (in Russian).

4. 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).

5. Afonin I. E., Makarenko S. I., Mitrofanov D. V. Analysis of the concept of "Prompt global strike" of air-space attack means and substantiation of prospective directions of air-space defense system development in the Arctic in the interest of defense. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2020, no. 15. pp. 75-87 (in Russian).

6. Makarenko S. I., Kovalskiy A. A., Afonin I. E. Justification of Perspective Directions of Development of the Russian Federation's Anti-Space Defense System in the Interests of Timely Opening and Repulse the Aerospace Attack Means "Prompt Global Strike". *Aerospace forces. Theory and practice*, 2020, no. 16, pp. 99-115 (in Russian).

7. Afonin I. E., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Descriptive model of combat potentials of sides in the conflict between the aerospace defense system and the aerospace attack means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 41-66 (in Russian).

8. *Dialektika tekhnologij vozdushno-kosmicheskoy oborony [Dialectics of aerospace defense technologies]*. Moscow, "Stolichnaya enciklopediya" Publishing House, 2011. 367 p. (in Russian).

9. *Sredstva vozdushno-kosmicheskogo napadeniya i vozdushno-kosmicheskoy oborony. Sostoyanie i razvitiye [Means of air-space attack and air-space defense. Status and development]*. Moscow, "Planeta" Publ., 2017, 336 p. (in Russian).

10. Borisko S. N., Goremykin S. A. Analiz sostoyaniya Vozdushno-kosmicheskikh sil Rossii. Perspektivy razvitiya [Analysis of the state of the Russian Aerospace Forces. Development prospects]. *Military thought*, 2019, no. 1, pp. 25-37 (in Russian).

11. Luzan A. G. New structures of air & missile defence constellations in theatres of operations is the imperative of our time. *Aerospace Sphere Journal*, 2019, no. 3, pp. 94-103 (in Russian).

12. Palicyn A. B., Zhilenko D. B. Analiz tradicionnyh i perspektivnyh zadach sistemy vozdushno-kosmicheskoy oborony Rossii: problemy i puti ih resheniya [Analysis of traditional and prospective tasks of the Russian aerospace defense system: problems and ways to solve them]. *Military thought*, 2020, no. 9, pp. 6-17 (in Russian).

13. Barvinenko V. V. O popytkah revizii polozhenij teorii vozdušno-kosmicheskoy oborony [On attempts to revise the provisions of the theory of aerospace defense]. *Military thought*, 2018, no. 4, pp. 84-90 (in Russian).

14. Kazakhov B. D., Popov D. M. Methodical approach to comprehensive counter system of enemy aerospace attack. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2019, no. 1 (66), pp. 29-34 (in Russian).

15. Boev S. F. Concept of integrated system of missile and space defense of Russia. *Issues of radio electronics*, 2019, no. 3, pp. 7-11 (in Russian).

16. Zinakov S. N. Konceptual'nye osnovy metodologii obosnovaniya stroitel'stva i razvitiya morskoy sostavlyayushchej vozdušno-kosmicheskoy oborony Rossijskoj Federacii [Conceptual foundations of the methodology for substantiating the construction and development of the maritime component of the aerospace defense of the Russian Federation]. *Military thought*, 2019, no. 6, pp. 109-112 (in Russian).

17. Yagolnikov S. V. Military-technical aspects of the organization and carrying out of the aerospace defense in modern conditions. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2017, no. 2 (59), pp. 60-63 (in Russian).

18. Sozinov P. A. Crucial tasks of mathematical modeling of aerospace defense systems. *Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation*, 2017, no. 3, pp. 17-26. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-zadachi-matematicheskogo-modelirovaniya-sistem-vozdušno-kosmicheskoy-oborony> (accessed 11 July 2021) (in Russian).

19. Boev S. F., Gudkov A. A., Malishev S. R., Chebotar I. V. The radiotechnical systems survivability assurance as a result of structural stability increase. *Naukoemkie tekhnologii*, 2016, vol. 17, no. 12, pp. 80-85 (in Russian).

20. Boev S. F., Rakhmanov A.A. Method of increasing the efficiency of the new technologies implementation in creating a new generation radar stations. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2015. no. 1 (162), pp. 73-81 (in Russian).

21. Boev S. F., Rakhmanov A.A. Methodological bases of management of the establishment of highly informative unified radar stations missile space defense. *Radio industry*, 2016. no. 1, pp. 6-13 (in Russian).

22. Kochkarov A. A., Rahmanov A. A., Timoshenko A. V., Putyato S. A. Structural and spatial model of the special purpose monitoring system means distribution by observation objects. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2020, no. 13, pp. 124–132 (in Russian).

23. Kochkarov A. A., Putyato S. A., Petrochenkov D. M. Analysis of the directions of creation of specialized aviation-space systems of radar surveillance of air attack means. *Vestnik Yaroslavskego vysshego voennogo uchilishcha protivovozduшной oborony*, 2020, no. 1 (8), pp. 17–23 (in Russian).

24. Kochkarov A. A. Modeling of interaction in info-reconnaissance systems with dynamic structure of connections. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2017, no 11, pp. 58–62 (in Russian).

25. Leshko N. A., Petrochenkov D. M., Tymoshenko A. V. Analysis of state and prospects of development of active/passive radar systems by foreign and

domestic military-industrial companies. *Aerospace Defense Herald*, 2020. No. 4 (28), pp. 6-17 (in Russian).

26. Bezel Y. V. Stages of development of automated control systems for aircraft and air defence. *Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation*, 2015, no. 2 (14), pp. 90-94 (in Russian).

27. Grudin I. V., Surov S. V. Obosnovanie struktury metoda informacionnogo obespecheniya upravleniya borboj s protivnikom v vozdushno-kosmicheskoj 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, no. 650, pp. 95-108 (in Russian).

28. Grudin I. V., Surov S. V. Resource management information and control subsystem ACS fire in order to ensure its survivability. *Izvestiya Instituta inzhenernoj fiziki*, 2016, no. 3 (41), pp. 57-62 (in Russian).

29. Grudin I. V., Majburov D. G. Strukturnyj analiz teorii informacionnogo obespecheniya upravleniya otrazheniem udarov sredstv vozdushno-kosmicheskogo napadeniya protivnika [Structural analysis of the theory of information support for controlling the reflection of enemy air and space attack attacks]. *Military thought*, 2018, no. 8, pp. 78-89 (in Russian).

30. Grudin I. V., Majburov D. G., Kakaev V. V. Soderzhanie i struktura kategorij teorii upravleniya mezhhvidovoj gruppirovkoj vojsk (sil) pri otrazhenii udarov sredstv vozdushno-kosmicheskogo napadeniya protivnika [The content and structure of the categories of the theory of management of the interspecific grouping of troops (forces) in repelling the blows of the enemy's aerospace attack]. *Military thought*, 2019, no. 10, pp. 88-96 (in Russian).

31. Grudin I. V., Mayburov 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, no. 4 (65), pp. 82-90 (in Russian).

32. Majburov D. G., Ikonnikov O. V. Razvitie teoreticheskikh polozhenij informacionnogo obespecheniya upravleniya otrazheniem udarov sredstv vozdushno-kosmicheskogo napadeniya protivnika [Development of theoretical provisions of information support for the management of repulse of enemy air and space attack means]. *Military thought*, 2018, no. 9, pp. 48-53 (in Russian).

33. Lyaskovskij V. L. *Sistemotekhnicheskie osnovy avtomatizacii processov obrabotki informacii i upravleniya v ierarhicheskikh sistemah voennogo naznacheniya. Monografiya* [System engineering fundamentals of automation of information processing and management processes in hierarchical military systems. Monograph]. Tver, Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union G. K. Zhukov Publ., 2014. 243 p. (in Russian).

34. Voronin O. V., Potetenko S. V., Kruglikov S. V. The development of automation management tools by the divisions of tactical missile defense. *Informatika*, 2017, no. 4 (56), pp. 54-69 (in Russian).

35. Morenkov V. A. Pokoleniya i vozmozhnye napravleniya razvitiya avtomatizirovannoj sistemy upravleniya istrebitel'noj aviaciej [Generations and

possible directions of development of the automated control system of fighter aircraft]. *Military thought*, 2019, no. 10, pp. 65-73 (in Russian).

36. Voronov E. M., Repkin A. L., Jian Z. Resource control of multiple-object systems of ground and air based aircraft in multistage conflict situation. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*, 2013, no. 10 (22), 14 p. (in Russian).

37. Voronov E. M., Yefremov V. A., Repkin A. L., Sychev S. I. Functional properties of conflict-optimum prediction in the system of optimization-imitation modeling of interaction between groups of controlled means of destruction. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2013, no. 3 (92), pp. 3-25 (in Russian).

38. Vorob'yov D. N., Kupriyanov N. A., Onufrej A. Yu. Algoritmicheskaya realizaciya komparirovaniya traektornyh dannyh radiolokacionnoj stanciej dal'nego obnaruzheniya [Algorithmic implementation of trajectory data comparison by a long-range detection radar]. *Questions of radio-electronics, the TV equipment series*, 2020. No. 4. pp. 93-100 (in Russian).

39. Dybov V. N., Podgornyh Yu. D. Ob ustojchivosti vozdušno-kosmicheskoy oborony Rossijskoj Federacii [On the stability of the aerospace defense of the Russian Federation]. *Military thought*, 2019, no. 10, pp. 33-40 (in Russian).

40. Grudin I. V., Pal'guyev D. A., Shentyabin A. N. Informacionnaya podsistema sbora, obrabotki i obmena radiolokacionnoj informaciej setевой 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).

41. Palguyev D. A., Shentyabin A. N. More on assessing the probability of radar information association during tertiary information processing in network structures. *Radio industry*, 2020, vol. 30, no. 2, pp. 32-41 (in Russian).

42. Palguyev D. A., Pankratov S. I. *Setevaya avtomatizirovannaya sistema peredachi radiolokacionnoj informacii* [Network automated system for transmitting radar information]. Patent Russia, no. 2543068. 2015.

43. Palguyev D. A. Efficiency comparative evaluation of information systems of hierarchical and network structure based on entropy approach. *Radio and telecommunication systems*, 2020, no. 1 (37), pp. 15-22 (in Russian).

44. Makarenko S. I. *Modeli sistemy svyazi v uslovijah prednamerennyh destabilizirujushhijh vozdeystvij 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).

45. Makarenko S. I. *Spravochnik nauchnykh terminov i oboznachenij* [Handbook of scientific terms and designations]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2019. 254 p. (in Russian).

46. State Standart 34.003 – 90. Information terminology. A set of standards for automation systems. Automation systems. Terms and definitions. Moscow, Standartov Publ., 1991. 15 p. (in Russian).

47. Handbook of terminology in the defence sphere. *Ministry of Defence of the Russian Federation*. Available at: <http://dictionary.mil.ru/dictionary> (accessed 11 July 2023) (in Russian).

48. 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).

49. 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).

50. 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).

51. Egunov M. M., Spuvalov V. P. Structural Reliability Analysis of Transport Network. *Vestnik SibGUTI*, 2012, no 1, pp. 54-60 (in Russian).

Статья поступила 15 июля 2023 г.

Информация об авторах

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: Россия, 350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, д. 135.

Макаренко Сергей Иванович – доктор технических наук, доцент. Проректор по научной работе. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени проф. М.А. Бонч-Бруевича. Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: 193232, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1.

Петров Сергей Валерьевич – соискатель ученой степени кандидата наук. Преподаватель кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования. Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков. Область научных интересов: устойчивость системы воздушно-космической обороны; радиоэлектронная борьба. E-mail: perskub@yandex.ru

Адрес: Россия, 350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, д. 135.

Model for assessing the stability of an aerospace defense control system in conflict with aerospace attack means

I. E. Afonin, S. I. Makarenko, S. V. Petrov

Relevance. Increasing the stability of the aerospace defense control system (ASDCS) are a relevant task as military and political tensions between the Russian Federation and the enemy countries are increasing. In case if this tensions escalate into an combat conflict, the United States (US) has developed the operational and strategic concept of a "Prompt Global Strike" (PGS), which assumes a rapid simultaneous strike of a large number of high-precision weapons (HPW), primarily cruise missiles, at administrative and military centers of Russia. At the same time, the first echelon of the PGS will consist of aerospace attack means (ASAM), which should hit ASDCS elements to reduce its effectiveness ASDCS when subsequent echelons of the BSU will pass. That is, the task of increasing the stability of ASDCS in the conditions of the impact of ASAM of the first echelon of the BSU is relevant. **The aim of the work** is to develop the model for the stability assessing of ASDCS in conflict with the ASAM. The material of the article is planned to be used for the development and research of models for the development and forecasting of the results of the conflict interaction of ASDCS and enemy's ASAM, as well as for the study of ASDCS stability when the enemy strikes of PGS. **Results and their novelty.** The novelty of this model is: 1) an integral stability indicator is introduced, which joint of the structural and temporal stability parameters of individual elements of ASDCS; 2) structural parameters are introduced that take into account the capabilities of signal and imagery reconnaissance of the enemy, as well as parameters that take into account the capabilities of ASAM for the physical and functional defeat of the elements of ASDCS, parameters of enemy electronic warfare against communications channels and radar of ASDCS; 3) time parameters are introduced that take into account the duration of transient processes of recovery control in ASDCS when its structure changes. **Practical significance.** The model, that presented in this paper, will be useful for technical specialists to justify new technological solutions for ASDCS. In addition, this model will be useful for researchers and carrying out study in the field of combat conflict and in the field of the stability of ASDCS.

Keywords: stability, electronic intelligence, electronic suppression, electronic warfare, means of aerospace attack, control system, air defense, aerospace defense, conflict, fire damage.

Information about Authors

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

Address: Russia, 350090, Krasnodar, Dzerzhinsky Street, 135.

Sergey Ivanovich Makarenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Vice-Rector for Research. The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: 193232, Russia, Saint Petersburg, Bolshevikov prospect, d. 22, k. 1.

Sergey Valerievich Petrov – Lecturer at the Department of aviation and radio-electronic equipment. Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots. Field of research: stability of the aerospace defense system; electronic warfare. E-mail: perskub@yandex.ru

Address: Russia, 350090, Krasnodar, Dzerzhinsky Street, 135.