УДК 621.39

С.И. Макаренко

ИГРОВАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО КОНФЛИКТА СИСТЕМЫ СВЯЗИ С СИСТЕМОЙ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ¹

Макаренко Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, окончил Военный авиационный инженерный университет им. проф. Н.Е. Жуковского. Ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук. Имеет разработки, статьи и монографии в области вооружения и военной техники, систем связи, радиоэлектронной борьбы, информационного противоборства, радиоэлектронного мониторинга. [e-mail: mak-serg@yandex.ru].

Аннотация

В статье на основе формализма теории игр предложена модель информационного конфликта системы связи специального назначения и системы дестабилизирующих воздействий. Эта модель в явном виде учитывает стратегии дестабилизирующих воздействий и стратегии защиты системы связи, а также их смену в процессе информационного конфликта. Показано, что на основе игры с прямыми или смешанными стратегиями возможно обосновать наиболее вероятные варианты дестабилизирующих воздействий, а также рациональную структуру системы связи в конфликте. Предложена формализация принятия решений противоборствующими сторонами при выборе стратегий на каждом из этапов информационного конфликта. Представлена формализация правила выбора стратегии защиты и соответствующей ей структуры системы связи в виде минимаксного критерия. Данный критерий позволяет осуществить поиск рациональной структуры системы связи как при оперативном, так и при превентивном принятии решений на противодействие системе дестабилизирующих воздействий.

Ключевые слова: информационный конфликт, система связи, дестабилизирующее воздействие, информационное противоборство.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-4-62-61-74

THE GAME MODEL OF INFORMATION CONFLICT BETWEEN THE COMMUNICATIONS SYSTEM AND THE SYSTEM OF DESTABILIZING EFFECTS

Sergei Ivanovich Makarenko, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from Zhukovsky Air Force Engineering Academy; Leading Research Associate of the Saint Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences; an author of papers, monographs; creator equipment in the field of weapons and military equipment, communication systems, electronic warfare, information warfare, electronic surveillance. e-mail: mak-serg@yandex.ru.

Abstract

The article proposes a model of information conflict between the application specific communications system and the system of destabilizing effects based on the game theory formalism. The model takes into account strategies of destabilizing effects and of communications system protection, as well as their change during the information conflict. It shows that based on the game with direct or mixed strategies, it is possible to substantiate the most probably variants of destabilizing effects, as well as the rational structure of communications system in the conflict. The authors propose decision-making formalized by the opposing parties, when choosing strategies at each stage of the information conflict. The paper describes the rules for choosing the strategy of protection and corresponding structure of the communications system in the form of a minimax criterion. These rules allow searching for a rational structure of the communications system both in the current and in the preventive decision-making for countering the system of destabilizing effects.

Keywords: information conflict, communications system, destabilizing effect, information warfare.

¹ Отдельные результаты работы получены в рамках исследований по госбюджетной теме НИР СПИИРАН № 0073-2019-0004.

ВВЕДЕНИЕ

Становление и развитие методологии исследования эффективности функционирования систем связи специального назначения (СС СН) неразрывно связано с совершенствованием научно-методического аппарата формализации и исследования информационного конфликта с системой дестабилизирующих воздействий (СДВ).

СС СН – это совокупность распределенных в пространстве взаимосвязанных технических средств и обслуживающего персонала, выполняющих задачи по обеспечению информационного обмена в системах государственного и военного управления, а также в системах управления обеспечением безопасности и правопорядка.

СДВ – организационно-техническая система, состоящая из подсистем разведки, нападения и управления, целью которой является преднамеренное формирование дестабилизирующих воздействий, нарушающих работоспособность технических средств или программ, ухудшение их характеристик и параметров, снижение их эффективности.

Информационный конфликт (ИК) – процесс столкновения сторон на этапах сбора, формирования, передачи, хранения, обработки, представления и интерпретации информации о состоянии, намерениях и действиях своей и противостоящей сторон, при этом каждая из сторон стремится к упреждающим действиям по отношению к противостоящей стороне и предпринимает определенные действия по снижению возможностей противостоящей стороны, а также по обеспечению независимости и эффективности своих систем от вмешательства и воздействий другой стороны [1, 2].

Отображение ИК на процессы передачи информации позволяет говорить об ИК применительно к СС СН. Анализ различных научно-методических подходов к формализации и исследованию ИК применительно к различным конфликтующим объектам (системам связи, разведки, радиоэлектронной борьбы, информационного противоборства и т. д.) на основе более 300 источников достаточно полно представлен в работе автора [1]. Этот анализ показал, что развитие практики дестабилизирующих воздействий, масштабное интегральное применение в военных конфликтах против СС СН широкой номенклатуры средств и способов дестабилизирующих воздействий (информационно-технических воздействий (ИТВ), радио- и радиотехнической разведки (РРТР), оптико-электронной разведки (ОЭР), компьютерной разведки (КР), средств физического поражения (ФП), средств радиоэлектронного подавления (РЭП), функционального поражения электромагнитным излучением (ФП ЭМИ) и т. д.), требует соответствующего развития теории моделирования ИК.

В предыдущих работах автора, посвященных моделированию ИК СС СН, представлены: концептуальная модель ИК [2, 3], многоуровневая модель ИК [4], динамическая модель ИК [5], структурно-топологическая модель ИК [6]. Вместе с тем, вышеуказанные модели

в большей степени делали акцент на моделировании ИК за счет поражения элементов нарушения функций элементов СС СН, в то время как вопросы смены стратегий защиты СС СН в условиях изменения стратегии СДВ подробно не исследовались. Актуальность данных вопросов, применительно к многоэтапным ИК, была указана в работах [2, 3], однако эти вопросы там глубоко не рассматривались. Традиционно, для исследования конфликтов и выбора стратегий выигрыша в них, используется теория игр. В связи с этим, целью работы является разработка игровой модели ИК СС СН, формализующей процессы многоэтапного ИК между СС СН и СДВ, в части выбора стратегий нападения и защиты, и их смены на каждом из этапов многоэтапного ИК. В основу данной игровой модели ИК положен теоретический подход к формализации взаимодействия СС СН и средств РЭП и достижении конфликтно-устойчивого состояния ИК на основе теоретико-игрового подхода, использованного в работах А.М. Чуднова [7–9], А.В. Боговика, В.В. Игнатова [10], В.И. Владимирова, И.В. Владимирова [11].

1 Постановка задачи на моделирование

Для описания процесса взаимодействия СС СН и СДВ используем следующие понятия.

Метасистема – система, состоящая из СС СН и СДВ, причем СДВ реализует против СС СН различные стратегии дестабилизирующих воздействий, а СС СН реализует различные стратегии защиты, направленные на снижение эффектов от стратегий дестабилизирующего воздействия СДВ.

Дестабилизирующее воздействие – негативное влияние электрических, акустических, магнитных, электромагнитных или других полей, физических и информационных факторов, технологических процессов, которое нарушает работоспособность технических средств или программ, вызывает ухудшение их характеристик и параметров или снижает их эффективность.

Защита – меры, принимаемые СС СН и направленные на снижение эффективности воздействия СДВ на СС СН.

Стратегия – в теории игр это полный план действий при всевозможных ситуациях. Стратегия определяет действие игрока в любой момент игры и для каждого возможного течения игры, способного привести к каждой ситуации.

Структура СС СН – это формализованное представление СС СН в виде графа, наложенного на физическую структуру СС СН, образованную совокупностью узлов и каналов связи, при этом граф обвязывается множеством путей передачи информационных сообщений между узлами.

Структура СДВ – это формализованное представление СДВ в виде множества, наложенного на структуру СС СН, при этом каждый элемент множества определяет различные типы разведки и дестабилизирующих воздействий, влияющих на конкретный элемент СС СН (узел или канал связи).

Устойчивость СС СН – способность СС СН обеспечивать связь с требуемым качеством в условиях дестабилизирующих воздействий естественного и искусственного характера.

Информационное направление связи (ИНС) – совокупность линий и узлов связи, обеспечивающая связь между конкретной парой узлов в СС СН.

Для формализации игровой модели ИК СС СН введем следующие обозначения:

$|I|$ – число элементов множества I ;

$|J|$ – число элементов множества J ;

$|S|$ – число элементов множества S ;

A – матрица приоритетности ИНС;

$a_{\lambda,\lambda}$ – коэффициент важности λ -го ИНС;

$H(S_j, V_i)$ – фазовая траектория, которая соответствует динамике совместного изменения состояний S_j и V_i в процессе развития многоэтапного конфликта метасистемы «СС СН – СДВ»;

$H^{СДВ}(S_j, V_i)$ – состояние метасистемы $H(S_j, V_i)$, наблюдаемое СДВ;

$H^{СС}(S_j, V_i)$ – состояние метасистемы $H(S_j, V_i)$, наблюдаемое СС СН;

I – множество стратегий нападения СДВ на СС СН;

i – стратегия нападения СДВ на СС СН;

J – множество стратегий защиты СС СН;

j – стратегия защиты СС СН;

K – количество вариантов дестабилизирующего воздействия;

k – номер дестабилизирующего воздействия;

L – количество иерархий в системе управления;

l – номер иерархии системы управления;

m – счетчик;

M – общее количество элементов (узлов и линий связи) в СС СН;

N – количество этапов в многоэтапной ИК;

n – счетчик;

N_{Λ} – количество ИНС, организуемых в СС СН;

$P_i(V_i)$ – вероятность применения СДВ i -го варианта нападения, который соответствует использованию V_i структуре использования средств разведки и нападения;

$P_i(S_j)$ – вероятность применения СС СН j -го варианта защиты, который соответствует использованию S_j -структуре организации связи;

P_{y_i} – вероятность устойчивости i -го ИНС;

$P_{y_{cp}}$ – итоговый показатель устойчивости СС СН – среднесетевая вероятность устойчивости ИНС;

$P_{y_{cp}}(S_j, V_i)$ – показатель устойчивости СС СН в условиях, когда против нее реализован вариант нападения V_i а СС СН использует структуру организации связи S_j ;

Q – матрица показателей качества функционирования ИНС в СС СН;

q – показатель качества СС СН;

$q_{\lambda,j,i}$ – показатель качества λ -го ИНС, если на нем используется j -й вариант распределения линий и узлов связи, подвергающийся i -му варианту дестабилизирующего воздействия;

$S = S_{yc} \cup S_{лс}$ – структура защищаемой СС СН, состоящая из структуры размещения узлов связи S_{yc} и линий связи между узлами $S_{лс}$;

S_j – структура СС СН, реализуемая в рамках j -й стратегии защиты;

$S_j(t_n)$ – структура СС СН, соответствующая j -й стратегии защиты, на n -м этапе конфликта;

$S_j^{opt}(t_n)$ – структура СС СН, соответствующая j -й стратегии защиты, которая является оптимальной на n -м этапе конфликта;

$S_{n,m}$ – элемент множества $S = S_{yc} \cup S_{лс}$, задающий принадлежность конкретного узла или линии связи к ИНС от n -го узла связи к m -му узлу;

$S_{лс}$ – подмножество S , задающее структуру размещения линий связи;

S_{yc} – подмножество S , задающее структуру размещения узлов связи;

$V = \{V_i\} = \{v_{s,k}\}_i$ – множество вариантов воздействия, которые может реализовать СДВ;

$V_i(t_n)$ – вариант воздействия, который соответствует i -й стратегии нападения, на n -м этапе ИК;

$V_i = \{v_{s,k}\}$ – воздействие на СС СН, реализуемое в рамках i -й стратегии нападения;

$v_{s,k}$ – элемент множества V , задающий воздействие k -го типа на s -й элемент (узел или линию связи) СС СН;

γ – оператор, который описывает процесс эволюции метасистемы $H(S_j, V_i)$ в фазовом пространстве $V \times S$;

η – отображение, задающие наблюдение (мониторинг) параметров метасистемы со стороны СС СН;

λ – номер ИНС;

$\Lambda = \{\lambda_{n,m}\}$ – структура ИНС, организуемых в СС СН;

$\lambda_{n,m}$ – элемент множества Λ , задающий наличие ИНС от n -го узла связи к m -му узлу;

μ – отображение, задающее наблюдение (разведку) параметров метасистемы со стороны СДВ.

2 ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУР СС СН И СДВ

Для адекватного описания процессов конфликтного взаимодействия СС СН и СДВ на длительности ИК применим дискретный подход к формализации времени, подразумевающий разбиение всей длительности ИК на отдельные этапы, внутри которых конфликтующие стороны придерживаются неизменных стратегий разведки, нападения и защиты. Это значит, что на длитель-

ности ИК задается конечное множество как вариантов структуры СС СН, так и вариантов структуры СДВ, а также конечное множество их стратегий.

Определим множество допустимых вариантов организации связи в СС СН как множество булевых матриц $\Lambda = \{\lambda_{n,m}\}$ размером $N_\Lambda \times N_\Lambda$, где N_Λ – максимально возможное количество ИНС «точка – точка» между узлами в сети СС СН. Очевидно, что в случае совокупности независимых ИНС получим конечное счетное множество матриц $\{\lambda_{n,m}\}$ с количеством элементов $2N_\Lambda$. Будем считать, что $\lambda_{n,m} = 1$, если организуется ИНС от n -го узла связи к m -му узлу, и $\lambda_{n,m} = 0$ – в противном случае.

Для каждого конкретного варианта организации связи Λ может быть задано J множеств булевых матриц распределения ресурсов СС СН $S_j = S_{yc} \cup S_{лс}$ ($j = 1 \dots J$), заключающееся в конкретизации вариантов распределения линий $S_{лс} = \{s_{n,m}\}_{лс}$ и узлов связи $S_{yc} = \{s_{n,m}\}_{yc}$ для каждой из ИНС:

$$\{S_j\}_\lambda = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \dots & s_{1,M} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \dots & s_{2,M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{M,1} & s_{M,2} & \dots & s_{M,M} \end{bmatrix}, \lambda = 1 \dots N_\Lambda,$$

где M – общее количество элементов (узлов и линий связи) в СС СН.

Отличие матриц $\{\lambda_{n,m}\}$ и S_j состоит в следующем. Матрица $\{\lambda_{n,m}\}$ задает ИНС в формате «исходящий узел – конечный узел». При этом каждому конкретному ИНС между определенной парой узлов, который соответствует одному из элементов из матрицы $\{\lambda_{n,m}\}$, ставится в соответствие матрица S_j , определяющая, какие элементы сети (узлы и линии связи) образуют этот ИНС.

В матрицах S_j каждый элемент $s_{n,m} = 1$, если линия или узел связи используется в ИНС от n -го узла связи к m -му узлу, и $s_{n,m} = 0$ – в противном случае. В дальнейшем будем полагать, что множество Λ задано, и цель оптимизации состоит в выборе матрицы $S_j = S_{yc} \cup S_{лс}$ j -го варианта распределения множеств $S_{yc} = \{s_{n,m}\}_{yc}$ и $S_{лс} = \{s_{n,m}\}_{лс}$ таким образом, чтобы обеспечить наибольшую эффективность СС СН по показателю q в условиях реализации i -й стратегии нападения СДВ.

Пусть СДВ, состоящая из подсистем разведки и нападения, имеет возможность воздействия на любой s -й элемент системы связи (линию или узел связи). Назовем i -й стратегией нападения булеву матрицу V_i размером $|S| \times K$ (где $|S|$ – число элементов множества S) с элементами $v_{s,k}$, которые принимают значение $v_{s,k} = 1$,

если на s -й элемент (узел или линию связи) системы связи осуществляется воздействие k -го типа (считаем, что всего осуществляется K типов воздействия), и $v_{s,k} = 0$ – в противном случае:

$$V_i = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \dots & v_{1,|S|} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \dots & v_{2,|S|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{K,1} & v_{K,2} & \dots & v_{K,|S|} \end{bmatrix}.$$

Значение k условно может соответствовать типу воздействия: $k = 1$ – воздействие средств РРТР; $k = 2$ – воздействие средств ОЭР; $k = 3$ – воздействие средств КР; $k = 4$ – воздействие средств ФП; $k = 5$ – воздействие средств ФП ЭМИ; $k = 6$ – воздействие средств РЭП; $k = 7$ – воздействие средств ИТВ (всего $K = 7$).

При задании интегральных вариантов воздействий на некоторый s -й элемент (линию или узел связи) СС СН, в s -м столбце матрицы V_i элементы $v_{s,k}$ принимают значение единица, если k -й тип воздействия осуществляется на s -й элемент, и ноль, если k -й тип воздействия не осуществляется.

Множество стратегий нападения V в качестве элементов будет содержать подмножества всех возможных вариантов воздействия V_i , то есть $V = \{V_i\}$.

3 ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА СС СН

Введем матрицу показателей качества функционирования ИНС в СС СН – Q . Очевидно, что каждой комбинации стратегий j, i (которые, в свою очередь, соответствуют комбинации V_i, S_j) соответствует множество показателей качества $\{q_\lambda\}$, где λ – номер ИНС. Таким образом может быть составлена трехмерная матрица показателей качества Q , элементами которой $q_{\lambda,j,i}$ будут показатели качества λ -го ИНС, если на нем используется j -й вариант распределения линий и узлов связи (соответствует структуре S_j), подвергающийся i -му варианту дестабилизирующего воздействия (соответствует структуре V_i).

Зададим матрицу приоритетности ИНС диагональной матрицей A :

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_{2,2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_{\lambda,\lambda} \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \sum_{\lambda=1}^{|A|} \alpha_{\lambda,\lambda} = 1.$$

Элементы $\alpha_{\lambda,\lambda}$ являются коэффициентами, учитывающими важность λ -го ИНС. Варианты расчета коэффициентов $\alpha_{\lambda,\lambda}$ рассмотрены ранее в работе [6].

Тогда свертка

$$Q(S_j, V_i) = Q \times A \times S_j \times V_i$$

будет соответствовать интегральному показателю эффективности системы связи Q , выраженному через стратегии защиты j и нападения i .

Введенная таким образом модель взаимодействия СС СН и СДВ является достаточно общей и позволяет описывать процессы выбора оптимальных стратегий в достаточно широком классе целей функционирования. Конкретные цели функционирования будут определяться физическим смыслом, вкладываемым в показатель эффективности q .

Как показано в работе [6], за интегральный показатель эффективности СС СН в условиях дестабилизирующих воздействий можно принять показатель устойчивости – среднесетевую вероятность устойчивости ИНС:

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

где α_i – значимость i -го ИНС; $P_{y_i} = K_{\Gamma i} P_{\text{св}i}$ – вероятность устойчивости i -го ИНС.

При этом, под устойчивостью ИНС понимается способность ИНС обеспечивать связь между соответствующей парой узлов с требуемым качеством в условиях дестабилизирующих воздействий.

При этом, как показано в работе [6], показатель $P_{y\text{cp}}$ является интегральным и в него могут сворачиваться как частные показатели устойчивости СС СН к применению различных средств поражения (средств физического поражения, средств ФП ЭМИ, РЭП и ИТВ), так и частные показатели разведзащищенности от различных типов разведки (средства РРТР, ОЭС, КР). Таким образом, показатель (1) является интегральной характеристикой, по которой можно проводить сравнительный анализ и выбор структур систем связи S_j .

4 ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СС СН И СДВ В ВИДЕ ИГРЫ

При выборе структуры СС СН S_j в условиях противоборства особенностью является то, что устойчивость отдельных ИНС P_{y_i} и сети в целом $P_{y\text{cp}}$ будут зависеть от стратегий j, i , используемых обеими противоборствующими сторонами соответственно для защиты и нападения. То есть показатель эффективности выбора структуры сети S_j может представляться в виде функции $P_{y\text{cp}}(S_j, V_i)$, определенной на множестве $S \times V$, где $S = \{S_j\}$ – множество решений по построению структуры СС СН S_j в соответствии с j -й стратегией защиты, а $V = \{V_i\}$ – множество реализаций i -х стратегий нападения СДВ.

Критерием выбора эффективной структуры СС СН S_j будет максимизация показателя устойчивости сети $P_{y\text{cp}}$:

$$\max_S P_{y\text{cp}}(S_j, V_i).$$

При этом целью нападающей стороны является минимизация показателя устойчивости сети $P_{y\text{св}}$:

$$\min_V P_{y\text{св}}(S_j, V_i).$$

В условиях таких противоположных целей противоборствующих сторон, процесс их конфликтного взаимодействия может быть формализован на основе минимаксного подхода:

$$\begin{aligned} \max_S \min_V P_{y\text{св}}(S_j, V_i) = \\ = \min_V \max_S P_{y\text{св}}(S_j, V_i). \end{aligned} \quad (2)$$

Ввиду конечности множеств S и V , а также стратегий j и i , возможно составить матрицу показателей устойчивости СС СН для всех возможных комбинаций стратегий нападения i и стратегии защиты j , которым соответствуют структуры V_i и S_j :

$$\{P_{y\text{св}}\} = \begin{vmatrix} P_{y\text{св}}(S_1, V_1) & P_{y\text{св}}(S_1, V_2) & \dots & P_{y\text{св}}(S_1, V_{|I|}) \\ P_{y\text{св}}(S_2, V_1) & P_{y\text{св}}(S_2, V_2) & \dots & P_{y\text{св}}(S_2, V_{|I|}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{y\text{св}}(S_{|J|}, V_1) & P_{y\text{св}}(S_{|J|}, V_2) & \dots & P_{y\text{св}}(S_{|J|}, V_{|I|}) \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где $|I|$ – количество элементов в множестве стратегий нападения $I, i \in I$;
 $|J|$ – количество элементов в множестве стратегий защиты $J, j \in J$.

Решение задачи выбора эффективной структуры СС СН S_j сведется к отысканию седловой точки матрицы (3), что равносильно определению номеров j, i для рациональных вариантов структуры сети S_j при заданном варианте воздействия V_i .

Наибольшие трудности при выборе структуры СС СН S_j по критерию (2) вызывает так называемое «проклятие размерности», то есть лавинообразное нарастание размерности матрицы (3) при увеличении числа стратегий нападения i и защиты j . Это делает задачу выбора структуры S_j трудноразрешимой даже при небольшом количестве элементов сети.

Разрешение этой трудности может заключаться в переходе к конечному, относительно небольшому числу вариантов стратегий нападения i и защиты j , а также соответствующим вариантам структуры СС СН S_j и вариантам воздействий СДВ V_i .

Еще одной трудностью является то, что на практике часто матрица (3) может не иметь седловой точки, что указывает на отсутствие решения в игре с так называемыми «чистыми стратегиями». В этом случае решение может быть получено в игре со «смешанными стратегиями», при которой для каждого из вариантов стратегий нападения i и защиты j назначаются вероятности их применения $P_i(S_j)$ и $P_j(V_i)$, при нормировке

$$\sum_{j=1}^J P_j(S_j) = 1 \text{ и } \sum_{i=1}^I P_i(V_i) = 1.$$

Как доказывается в теории игр [10], в этом случае решение для S_j будет получено вследствие того, что для конечномерных матричных игр решение в смешанных стратегиях всегда существует.

Таким образом, приступая к исследованию любой игры $S \times R$, необходимо сначала проверить, имеет ли матрица (3) седловые точки и, соответственно, решения в чистых стратегиях. Если этого нет, то необходимо искать решение в смешанных стратегиях.

Допустим, что найдена смешанная стратегия для СС СН, имеющая вид дискретной функции распределения $F(P_j(S_j))$, $j = 1 \dots J$. Тогда при применении нападающей СДВ какой-либо чистой i -й ($i \in I$) стратегии показатель устойчивости СС СН составит

$$\begin{aligned} P_{ycp} &= P_{ycp}(S_1, V_i) P_1(S_1) + \dots \\ &\dots + P_{ycp}(S_j, V_i) P_j(S_j) + \dots \\ &\dots + P_{ycp}(S_J, V_i) P_J(S_J) \end{aligned} \quad (4)$$

при $\forall i \in I$.

Аналогично, сделаем предположение о смешанной стратегии СДВ с дискретной функцией распределения $F(P_i(V_i))$, $i = 1 \dots I$, при применении СС СН чистой j -й ($j \in J$) стратегии защиты, показатель устойчивости СС СН будет равен

$$\begin{aligned} P_{ycp} &= P_{ycp}(S_j, V_1) P_1(V_1) + \dots \\ &\dots + P_{ycp}(S_j, V_i) P_i(V_i) + \dots \\ &\dots + P_{ycp}(S_j, V_I) P_I(V_I) \end{aligned} \quad (5)$$

при $\forall j \in J$.

Поскольку соотношения (4) и (5) справедливы для любых стратегий нападения $i \in I$ и защиты $j \in J$, то эти соотношения можно рассматривать как систему однородных линейных уравнений с неизвестными – вероятностями реализации стратегий нападения $P_i(V_i)$ и защиты $P_j(S_j)$, а также итоговым значением устойчивости СС СН P_{ycp} :

$$\left\{ \begin{aligned} P_{ycp} &= P_{ycp}(S_j, V_1) P_1(V_1) + \dots \\ &\dots + P_{ycp}(S_j, V_i) P_i(V_i) + \dots \\ &\dots + P_{ycp}(S_j, V_I) P_I(V_I), \quad j = 1 \dots J; \\ P_{ycp} &= P_{ycp}(S_1, V_i) P_1(S_1) + \dots \\ &\dots + P_{ycp}(S_j, V_i) P_j(S_j) + \dots \\ &\dots + P_{ycp}(S_J, V_i) P_J(S_J), \quad i = 1 \dots I; \\ P_1(V_1) + \dots + P_i(V_i) + \dots + P_I(V_I) &= 1; \\ P_1(S_1) + \dots + P_i(S_i) + \dots + P_I(S_I) &= 1. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

В выражении (6) значения показателя устойчивости СС СН $P_{ycp}(S_j, V_i)$ для каждой конкретной комбинации варианта структуры сети S_j и варианта нападения СДВ V_i могут быть определены в соответствии с топологической моделью системы связи [6].

Решение системы уравнений (6) позволит определить гарантируемый в среднем показатель устойчивости СС СН P_{ycp} , а также наиболее вероятные стратегии нападения $P_i(V_i)$ и защиты $P_j(S_j)$, позволяющие достичь этого значения.

Если по каким-либо причинам прямой вариант решения системы (6) окажется неприменимым, то можно перейти к эквивалентной задаче линейного программирования:

$$\begin{cases}
 P_{y\text{cp}}(S_j, V_1)P_1(V_1) + \dots \\
 \dots + P_{y\text{cp}}(S_j, V_i)P_i(V_i) + \dots \\
 \dots + P_{y\text{cp}}(S_j, V_I)P_I(V_I) - P_{y\text{cp}} = 0, \\
 j = 1 \dots J; \\
 P_{y\text{cp}}(S_1, V_i)P_1(S_1) + \dots \\
 \dots + P_{y\text{cp}}(S_j, V_i)P_j(S_j) + \dots \\
 \dots + P_{y\text{cp}}(S_I, V_i)P_I(S_I) - P_{y\text{cp}} = 0, \\
 i = 1 \dots I; \\
 P_1(V_1) + \dots + P_i(V_i) + \dots + P_I(V_I) = 1; \\
 P_1(S_1) + \dots + P_i(S_i) + \dots + P_I(S_I) = 1.
 \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, оценка устойчивости СС СН $P_{y\text{cp}}$ в условиях воздействия СДВ и определения рациональных структур построения сети S_j может быть представлена в виде упрощенной схемы, представленной на рисунке 1. С помощью описанного выше подхода может быть решена задача поиска оптимальной структуры СС СН S_j на этапах ее планирования, когда априори неизвестно какую стратегию нападения $P_i(V_i)$ выберет СДВ.

5 ФОРМАЛИЗАЦИЯ МНОГЭТАПНОГО ИГРОВОГО ИК СС СН

В процессе прохождения СС СН последовательности этапов ИК необходимо осуществлять управление ее структурой S_j по результатам наблюдения за конкретными действиями СДВ по применению конкретных вариантов дестабилизирующих воздействий V_i . Процесс движения СС СН в пространстве состояний S_j

Рис. 1. Схема оценки устойчивости СС СН $P_{y\text{cp}}$ и определения рациональной структуры ее построения S_j

под воздействием V_i будем рассматривать как многоэтапный ИК.

Сущность такого ИК заключается в стремлении каждой стороны к целенаправленному изменению своего состояния и состояния противоборствующей стороны. В этом случае динамику конфликта можно представить, как эволюцию метасистемы более высокого уровня, включающей в себя в качестве составных элементов как СС СН, так и СДВ.

Для формального описания многоэтапного ИК примем допущение о дискретном процессе смены состояний S_j и V_i , подобно тому как это рассмотрено в работе [3]. Дискретное представление этапов ИК позволит более адекватно отразить реальные процессы принятия решений о смене стратегий i, j , а также об изменении состояний сторон V_i, S_j с учетом очередности выполнения различных задач на каждом из этапов. При этом формальной математической схемой модели многоэтапного ИК будет некоторая временная последовательность смены состояний S_j и V_i .

Рассмотрим фазовое пространство $V \times S$, в котором метасистема «СС СН – СДВ» описывает фазовую траекторию $H(S_j, V_i)$, которая, в свою очередь, соответствует динамике совместного изменения состояний S_j и V_i в процессе развития многоэтапного ИК.

Введем оператор γ , который описывает процесс эволюции метасистемы $H(S_j, V_i)$ в фазовом пространстве $V \times S$, как последовательность смены состояний S_j, V_i в дискретные моменты времени $t_n, n = 1 \dots N$:

$$\begin{aligned} & H_0(t_0); \\ & \gamma_1 : H_0(t_0) \rightarrow H_1(t_1); \\ & \gamma_2 : H_1(t_1) \rightarrow H_2(t_2); \\ & \dots \\ & \gamma_n : H_{n-1}(t_{n-1}) \rightarrow H_n(t_n); \\ & \dots \\ & \gamma_N : H_{N-1}(t_{N-1}) \rightarrow H_N(t_N), \end{aligned}$$

где n – счетчик этапов многоэтапного ИК,

N – количество этапов ИК.

Содержание оператора $\gamma_1 \dots \gamma_N$, в общем случае, может зависеть от номера этапа конфликта n . Однако, если цели конфликтующих сторон не меняются, а в реальной метасистеме «СС СН – СДВ» – это именно так, то можно считать, что $\gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_N$. Таким образом, оператор γ сводится к функции $\gamma(H, t)$.

Целенаправленность эволюции метасистемы заключается в том, что ее траектория $H(S_j, V_i)$ зависит от стратегий нападения i и защиты j , принятых противоборствующими сторонами на каждом этапе конфликта. Таким образом, можно записать:

$$\gamma_n : \langle H_{n-1}(S_{j-1}, V_{i-1}), t_{n-1} \rangle \rightarrow \langle H_n(S_j, V_i), t_n \rangle.$$

Исходя из содержания процессов конфликтного взаимодействия сторон в метасистеме «СС СН – СДВ», можно принять следующую последовательность изменения состояний. Пусть на n -м этапе конфликта в соответствии с наблюдаемым состоянием СС СН S_{j-1} , сложившимся на предыдущем этапе t_{n-1} , СДВ принимает i -ю стратегию воздействия и переводит себя в состояние, соответствующее варианту воздействия V_i . Это, в свою очередь, влечет изменение состояния метасистемы $H_{n-1}(S_{j-1}, V_{i-1}) \rightarrow H_n(S_{j-1}, V_i)$. В результате, структура СС СН S_{j-1} перестает удовлетворять требованиям устойчивости по показателю $P_{у\text{ ср}}$. Для обеспечения этих требований СС СН формирует j -ю стратегию защиты и переводит себя в состояние S_j . В результате на n -м этапе конфликта в момент окончания этапа t_n состояние метасистемы изменяется на $H_n(S_{j-1}, V_i) \rightarrow H_n(S_j, V_i)$. Таким образом, процесс изменения состояния метасистемы «СС СН – СДВ» на каждом n -м этапе конфликта можно представить двумя последовательными подэтапами:

$$\begin{aligned} \gamma_{n,1} : H_{n-1}(S_{j-1}, V_{i-1}) &\rightarrow H_n(S_{j-1}, V_i); \\ \gamma_{n,2} : H_n(S_{j-1}, V_i) &\rightarrow H_n(S_j, V_i). \end{aligned} \quad (8)$$

Согласно (8), оператор γ_n , определяющий эволюцию состояния метасистемы «СС СН – СДВ» на n -м этапе, может быть представлен совокупностью последовательно действующих операторов $\gamma_{n,1}$ и $\gamma_{n,2}$, где $\gamma_{n,1}$ – оператор, отображающий изменения стратегии нападения со стороны СДВ, $\gamma_{n,2}$ – оператор, отображающий изменения стратегии защиты со стороны СС СН.

6 ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МНОГОЭТАПНОМ ИГРОВЫМ ИК

Для завершения построения общей формальной схемы многоэтапного ИК необходимо ввести описание процесса принятия решений на изменение стратегий нападения и защиты.

В общем случае, организация процесса принятия решений о выборе стратегий нападения и защиты может быть определена как многоуровневая иерархическая структура, характерная для каждой из сторон, которая состоит из взаимосвязанных подсистем, элементы которых имеют право принимать решения. В соответствии с принципом принятия решений в иерархической системе, будем считать, что вышестоящий элемент ставит задачу нижестоящему и влияет на него путем изменения задач, введения ограничений или перечислением допустимых альтернатив действий. Нижестоящий элемент свободен в своих действиях при выполнении поставленных задач в рамках указанных ограничений или

альтернатив. Нижестоящий элемент влияет на решение вышестоящего элемента путем информирования его о принятых решениях и их возможных последствиях. Вышестоящий элемент в соответствии с этой информацией может скорректировать свое решение либо полностью изменить его.

Важной особенностью процессов принятия решений в СС СН и СДВ является неполная информированность органов управления об обстановке, то есть о значении вектора состояния метасистемы «СС СН – СДВ» $H(S_j, V_i)$.

Учитывая формально определенный выше смысл $H(S_j, V_i)$, к основным видам неопределенности можно отнести следующие:

- неопределенность в целях функционирования противоположной стороны;
- неопределенность в представлении внутреннего состояния СС СН S_j , возникающая из-за сложности учета в математической модели всех взаимосвязей между элементами системы, возможной неоптимальности выбора СС СН стратегии защиты, ошибок в определении состояния элементов системы и ошибочного прогнозирования изменения их состояния к следующему этапу конфликта;
- неопределенность в представлении состояния СДВ V_i , возникающая из-за отсутствия точных знаний об ее структуре и параметрах используемых средств, а также о потенциальных стратегиях нападения на последующих этапах конфликта;
- неопределенность в представлении результатов воздействий СДВ на СС СН и наоборот.

Учет всех указанных типов неопределенности в формальном виде может быть осуществлен через введение некоторых отображений μ и η , показывающих реальное состояние метасистемы $H(S_j, V_i)$ в некоторые ее информационные образы $H^{cc}(S_j, V_i)$ и $H^{сдв}(S_j, V_i)$, которые соответствуют наблюдению состояния $H(S_j, V_i)$ со стороны СС СН и со стороны СДВ:

$$\mu : H(S_j, V_i) \rightarrow H^{сдв}(S_j, V_i);$$

$$\eta : H(S_j, V_i) \rightarrow H^{cc}(S_j, V_i),$$

где μ – отображение, задающее наблюдение (разведку) параметров метасистемы со стороны СДВ; η – отображение, задающее наблюдение (мониторинг) параметров метасистемы со стороны СС СН.

Состояния $H^{cc}(S_j, V_i)$ и $H^{сдв}(S_j, V_i)$ соответствуют определению противополоствующими сторонами некоторых «кажущихся» образов состояния метасистемы $H(S_j, V_i)$. Фактически, это соответствует выбору наиболее правдоподобных гипотез $H^{cc}(S_j, V_i)$ и

$H^{сдв}(S_j, V_i)$ о реальном состоянии системы $H(S_j, V_i)$ по результатам наблюдения η и μ .

В реальных системах, очевидно, всегда существует такое минимальное количество информации, при котором нельзя сделать каких-либо выводов по поводу гипотез $H^{cc}(S_j, V_i)$ и $H^{сдв}(S_j, V_i)$. В терминах данной модели это означает, что существует некоторое предельное количество информации, являющееся аргументом отображений η и μ , которое позволяет выдвинуть гипотезы $H^{cc}(S_j, V_i)$ и $H^{сдв}(S_j, V_i)$ с требуемым уровнем достоверности. В противном случае, отображения η и μ не позволяют сформировать правдоподобные гипотезы $\mu : H(S_j, V_i) \rightarrow H^{сдв}(S_j, V_i)$ и $\eta : H(S_j, V_i) \rightarrow H^{cc}(S_j, V_i)$.

Вышерассмотренные свойства процессов конфликтного взаимодействия сторон в метасистеме «СС СН – СДВ» и принятые предположения о наблюдаемости состояния $H(S_j, V_i)$ позволяют построить формальную схему поэтапного принятия решений в противоборствующих системах. Декомпозиция процесса принятия решений на l -м уровне иерархии системы управления (применительно к СС СН) на n -м этапе может быть представлена последовательностью следующих операций:

- декомпозиция общей цели функционирования системы γ на ряд частных подцелей и далее – на задачи для отдельных элементов и подсистем;
- фиксация смены варианта воздействия со стороны СДВ с V_{i-1} на V_i в соответствии с новой i -й стратегией нападения: $H(S_{j-1}, V_{i-1}) \rightarrow H(S_{j-1}, V_i)$;
- формирование гипотезы о состоянии метасистемы на основе результатов наблюдения/мониторинга: $\eta : H(S_{j-1}, V_i) \rightarrow H^{cc}(S_{j-1}, V_i)$;
- формирование множества альтернативных j -х стратегий защиты СС СН и соответствующих им структур $\{S_j\}, j \in J$;
- выбор из множества альтернатив такой оптимальной стратегии j -й стратегии защиты СС СН и соответствующей ей структуры S_j , которая в условиях наблюдаемого состояния метасистемы $H^{cc}(S_{j-1}, V_i)$ обеспечивала бы выполнение критерия эффективности $P_{y\text{ ср}} \rightarrow \max$;
- реализация j -й стратегии защиты СС СН путем перехода к S_j структуре: $H(S_{j-1}, V_i) \rightarrow H(S_j, V_i)$.

Такая же последовательность операций характерна и для противоположной стороны – СДВ. С учетом того, что критерием выбора j -й стратегии СС СН является максимизация показателя ее устойчивости $P_{y\text{ ср}} \rightarrow \max$, а критерием выбора i -й стратегии СДВ – ее минимизация: $P_{y\text{ ср}} \rightarrow \min$, то выражение (8) может быть представлено в следующем виде:

$$\begin{aligned} \gamma_{n,1} : H_{n-1}(S_{j-1}, V_{i-1}) \rightarrow \\ \rightarrow H_n(S_{j-1}, V_i) | P_{Y \text{ cp}} \rightarrow \min; \\ \gamma_{n,2} : H_n(S_{j-1}, V_i) \\ \rightarrow H_n(S_j, V_i) | P_{Y \text{ cp}} \rightarrow \max. \end{aligned} \quad (9)$$

В выражении (9) критерий $P_{Y \text{ cp}} \rightarrow \min$ соответствует подэтапу игры, на котором «ходит» СДВ, а критерий $P_{Y \text{ cp}} \rightarrow \max$ – подэтапу, на котором «ходит» СС СН.

$$S_j^{\text{опт}}(t_n) = \arg \left\{ \frac{\max_{S_j(t_n)} \min_{V_i(t_n)} \dots \max_{S_j(t_1)} \min_{V_i(t_1)} P_{Y \text{ cp}}}{S_j(t_{n-1}), \dots, S_j(t_0), V_i(t_{n-1}), \dots, V_i(t_0)} \right\}. \quad (10)$$

Однако в такой постановке задача оптимизации становится практически нереализуемой из-за необходимости учета и хранения огромного количества информации о состояниях метасистемы «СС СН – СДВ» $H(S_j, V_i)$ на всех этапах конфликта $H(t_0), \dots, H(t_{n-1})$. Тем более, что высокая динамичность современных боевых действий, возможность резких изменений обстановки ставят под сомнение необходимость реального учета всех предыдущих состояний $H(t_0), \dots, H(t_{n-1})$.

Относительно просто реализуемые технически и вполне пригодные для практики процедуры управления в данных условиях можно получить путем использования теории марковских процессов, в которых учитываются только текущее $H(t_n)$ и предшествующее $H(t_{n-1})$ состояния метасистемы. В этом случае задачу выбора оптимальной структуры СС СН $S_j^{\text{опт}}(t_n)$ можно рассматривать как задачу поиска наилучшей j -й стратегии, удовлетворяющей критерию $P_{Y \text{ cp}} \rightarrow \max$:

$$S_j^{\text{опт}}(t_n) = \arg \left\{ \frac{\max_{S_j(t_n)} \min_{V_i(t_n)} P_{Y \text{ cp}}}{S_{j-1}(t_{n-1}), V_i(t_n)} \right\}. \quad (11)$$

$$S_j^{\text{опт}}(t_n) = \arg \left\{ \frac{\max_{S_j(t_{n+1})} \min_{V_i(t_{n+1})} \max_{S_{j-1}(t_n)} P_{Y \text{ cp}}}{S_{j-1}(t_n), V_i(t_{n+1})} \right\}. \quad (12)$$

В этом случае поиск превентивно-упреждающей оптимальной структуры СС СН $S_j^{\text{опт}}(t_{n+1})$ на n -м этапе конфликта сводится к трем подэтапам:

Введение наблюдений $\eta : H(S_j, V_i) \rightarrow H^{\text{cc}}(S_j, V_i)$ в сочетании с принципом последовательного (поэтапного) принятия решений (9) превращает процесс оптимизации структуры системы связи S_j (2) в многошаговый минимаксный процесс поиска наилучших j -х стратегий, условных ко всем предыдущим состояниям $H(t_0), \dots, H(t_{n-1})$ и наблюдениям $H^{\text{cc}}(t_0), \dots, H^{\text{cc}}(t_{n-1})$ на каждом из n этапов конфликта:

В соответствии с выражением (11), поиск оптимальной структуры СС СН $S_j^{\text{опт}}(t_n)$ на n -м этапе ИК сводится к двум подэтапам:

1. Оценка устойчивости СС СН $P_{Y \text{ cp}}$ в предположении, что на данном этапе конфликта нападающая сторона из множества альтернатив выбрала и реализовала такую i -ю стратегию воздействия (вариант нападения V_i), которая соответствует критерию $P_{Y \text{ cp}} \rightarrow \min$ при условии нахождения СС СН в состоянии $S_{j-1}(t_{n-1})$;

2. Выбор и реализация СС СН из множества альтернатив той j -й стратегии защиты (структуры системы связи S_j), которая соответствует критерию $P_{Y \text{ cp}} \rightarrow \max$ при условии нахождения СС СН в состоянии $S_{j-1}(t_{n-1})$ и уже реализованного на данном этапе воздействия $V_i(t_n)$.

Отметим, что интересным направлением дальнейшего развития подхода (11) может являться упреждающее формирование оптимальной структуры СС СН $S_j^{\text{опт}}(t_{n+1})$, основанное на прогнозе того, что СДВ выберет оптимальное воздействие $V_i(t_{n+1})$ по критерию $P_{Y \text{ cp}} \rightarrow \min$ на следующем $(n+1)$ -м этапе конфликта:

1. Выбор и реализация СС СН из множества альтернатив $(j-1)$ -й стратегии защиты, которая соответствует структуре системы связи $S_{j-1}(t_n)$ и критерию

$P_{y\text{ ср}} \rightarrow \max$ при условии, что ранее система связи находилась в состоянии $S_{j-2}(t_{n-1})$, и на данном этапе уже было реализовано воздействие $V_{i-1}(t_n)$;

2. Формирование прогнозируемого варианта нападения СДВ $V_{i(t_{n+1})}$ в предположении, что на следующем этапе конфликта t_{n+1} СДВ из множества альтернатив выберет и реализует такую i -ю стратегию воздействия, которая соответствует критерию $P_{y\text{ ср}} \rightarrow \min$ при условии текущего нахождения СС СН в состоянии $S_{j-1}(t_n)$;

3. Выбор и реализация СС СН из множества альтернатив j -й стратегии защиты, которая соответствует структуре системы связи $S_j(t_{n+1})$ и критерию $P_{y\text{ ср}} \rightarrow \max$ при условии нахождения системы связи в состоянии $S_{j-1}(t_n)$ и прогнозируемого воздействия $V_{i(t_{n+1})}$.

Представленные подходы позволяют существенно упростить задачу поиска оптимальной структуры СС СН $S_j^{\text{опт}}(t_n)$, разбив ее на ряд последовательно решаемых частных задач максимизации и минимизации.

Выводы

На основе показателя устойчивости СС СН, разработанного в работе [6], предложена модель, которая в формализме теории игр позволяет учесть стратегии дестабилизирующих воздействий со стороны СДВ и стратегий защиты СС СН в виде ИК. Важность математической формализации стратегий действий сторон в многоэтапных ИК указывалась в работах [2, 3], однако такая формализация там не проводилась. Показано, что на основе игры с прямыми или смешанными стратегиями возможно обосновать наиболее вероятные варианты дестабилизирующих воздействий, а также рациональную структуру СС СН в ИК. Развивая игровую модель в направлении моделирования многоэтапного ИК, предложена формализация принятия решений противоборствующими сторонами при выборе стратегий на каждом из этапов конфликта. Предложена формализация правила выбора стратегии защиты и соответствующей ей структуры СС СН в виде минимаксного критерия. Данный критерий позволяет осуществить поиск рациональной структуры СС СН как при оперативном (с учетом сложившейся ситуации на этом же этапе ИК), так и при превентивном принятии решений (на следующем этапе ИК, с учетом прогнозируемой стратегии действий противника).

Новизной модели, представленной в статье, является то, что, во-первых, формализация ИК между СС СН и СДВ произведена на основе теоретико-игрового подхода, что отличает данную модель от других моделей ИК, в которых конфликт формализован на основе теории динамических систем [4, 5, 12], марковских процессов [13–15], теории автоматов [16, 17], теории координации [18, 19], графо-аналитических и имитационных подходов [20–22]; во-вторых, в данной модели в виде конфликта «СС СН – СДВ» интегрированно учтены воздей-

ствия РРТР, ОЭР, КР, ФП, ФП ЭМИ, РЭП и ИТВ, в то время как в других игровых моделях ИК [7, 8, 23, 24] рассмотрены конфликты исключительно типа «СС СН – РЭП» или «СС СН – РЭП – РРТР».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Информационные конфликты – анализ работ и методологии исследования // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 3. С. 95–178. DOI: 10.24411/2410-9916-2016-10304.
2. Макаренко С.И. Информационный конфликт системы связи с системой дестабилизирующих воздействий. Часть I: Концептуальная модель конфликта с учетом ведения разведки, физического, радиоэлектронного и информационного поражения средств связи // Техника радиосвязи. 2020. № 2 (45). С. 104–117. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-45-104-117.
3. Макаренко С.И. Информационный конфликт системы связи с системой дестабилизирующих воздействий. Часть II: Формализация основных аспектов, определяющих выигрыш в конфликте // Техника радиосвязи. 2020. № 3 (46). С. 103–115. DOI: 10.33286/2075-8693-2020-46-103-115.
4. Макаренко С.И. Динамическая модель системы связи в условиях функционально-разноразноуровневого информационного конфликта наблюдения и подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 3. С. 122–185. DOI: 10.24411/2410-9916-2015-10307.
5. Макаренко С.И. Динамическая модель двустороннего информационного конфликта с учетом возможностей сторон по наблюдению, захвату и блокировке ресурса // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 60–97. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10106.
6. Михайлов Р.Л., Макаренко С.И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4 (12). С. 69–79.
7. Чуднов А.М. Об адаптивных алгоритмах псевдослучайного переключения рабочих частот радиолоний в условиях случайных и преднамеренных помех // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 4. С. 10.
8. Чуднов А.М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1991. Т. 27, № 3. С. 57–65.
9. Чуднов А.М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. 1986. Т. 22, № 4. С. 49.
10. Боговик А.В., Игнатов В.В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. СПб.: ВАС, 2006. 183 с.
11. Владимиров В.И., Владимиров И.В. Основы оценки конфликтно-устойчивых состояний организационно-технических систем (в информационных конфликтах). Воронеж: ВАИУ, 2008. 231 с.
12. Михайлов Р.Л. Динамическая модель информационного конфликта информационно-телекомму-

- никационных систем специального назначения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 3. С. 238–251. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10309.
13. Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения. Монография / С.А. Будников [и др.] ; под ред. Ю.Л. Козирацкого. М. : Радиотехника, 2013. 232 с.
14. Модели пространственного и частотного поиска. Монография / Ю.Л. Козирацкий [и др.] ; под ред. Ю.Л. Козирацкого. М. : Радиотехника, 2014. 344 с.
15. Козлитин С.Н., Козирацкий Ю.Л., Будников С.А. Моделирование совместного применения средств радиоэлектронной борьбы и огневого поражения в интересах повышения эффективности борьбы за превосходство в управлении // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 49–73.
16. Сирота А.А., Гончаров Н.И. Моделирование конфликтного взаимодействия систем с использованием формализма гибридных автоматов // Информационные технологии. 2018. Т. 24, № 1. С. 17–27.
17. Сирота А.А., Гончаров Н.И. Исследование конфликта коалиций систем с использованием формализма гибридных автоматов // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 4. С. 56–70.
18. Михайлов Р.Л. Базовая модель координации подсистем наблюдения и воздействия информационно-телекоммуникационной системы специального назначения в информационном конфликте // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 437–450. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10418.
19. Михайлов Р.Л. Двухуровневая модель координации подсистем радиомониторинга и радиоэлектронной борьбы // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10, № 2. С. 43–50.
20. Бойко А.А., Иванников К.С., Кузнецов Д.А. Методика построения графоаналитической модели позиционной динамики боя на основе вероятностно-временной синхронизации действий элементов боевых порядков воинских формирований // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 24–48. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10202.
21. Бойко А.А., Будников С.А. Обеспечение конфликтной устойчивости программной реализации алгоритмов управления радиоэлектронной аппаратурой пространственно распределенных организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 100–139. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10404.
22. Бойко А.А. Способ аналитического моделирования боевых действий // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 2. С. 1–27. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10201.
23. Михайлов Р.Л. Модель динамической координации подсистем наблюдения и воздействия в информационном конфликте в виде иерархической дифференциальной игры трех лиц // Научные технологии. 2018. Т. 19, № 10. С. 44–51. DOI: 10.18127/j19998465-201810-08.
24. Михайлов Р.Л., Поляков С.Л. Модель оптимального распределения ресурсов и исследование стратегий действий сторон в ходе информационного конфликта // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 323–344.

REFERENCES

1. Makarenko S.I., Mikhailov R.L. Informatsionnye konflikty – analiz rabot i metodologii issledovaniia [Information Conflicts – Analysis of Papers and Research Methodology]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2016, no. 3, pp. 95–178. DOI:10.24411/2410-9916-2016-10304.
2. Makarenko S.I. Informatsionnyi konflikt sistemy sviazi s sistemoi destabiliziruiushchikh vozdeistvii. Chast I: Kontseptualnaia model konflikta s uchetom vedeniia razvedki, fizicheskogo, radioelektronnogo i informatsionnogo porazheniia sredstv sviazi [Information Conflict between a Communication System and a System of Destabilizing Influences. Part I. A Conceptual Conflict Model Taking into Account Signal and Communications Intelligence, Fire Weapons, Electronic and Microwave Warfare, Cyber-Attacks]. *Tekhnika radiosviasi* [Radio Communication Technology], 2020, no. 2 (45), pp. 104–117. DOI:10.33286/2075-8693-2020-45-104-117.
3. Makarenko S.I. Informatsionnyi konflikt sistemy sviazi s sistemoi destabiliziruiushchikh vozdeistvii. Chast II: Formalizatsiia osnovnykh aspektov, opredeliaushchikh vyigrysh v konflikte [Information Conflict Between a Communication System and a System of Destabilizing Influences. Part II. Formalized Main Aspects Determine Win in the Conflict]. *Tekhnika radiosviasi* [Radio Communication Technology], 2020, no. 3 (46), pp. 103–115. DOI:10.33286/2075-8693-2020-46-103-115.
4. Makarenko S.I. Dinamicheskaiia model sistemy sviazi v usloviiakh funktsionalno-raznouronovnogo informatsionnogo konflikta nabludenii i podavlenii [Dynamic Model of Communication System in Conditions the Functional Multilevel Information Conflict of Monitoring and Suppression]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2015, no. 3, pp. 122–185. DOI:10.24411/2410-9916-2015-10307.
5. Makarenko S.I. Dinamicheskaiia model dvunapravlenno informatsionnogo konflikta s uchetom vozmozhnostei storon po nabludeniiu, zakhvatu i blokirovke resursa [Dynamic Model of the Bi-directional Information Conflict to Take into Account Capabilities of Monitoring, Capturing and Locking of Information Resources]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2017, no. 1, pp. 60–97. DOI:10.24411/2410-9916-2017-10106.
6. Mikhailov R.L., Makarenko S.I. Otsenka ustoichivosti seti sviazi v usloviiakh vozdeistviia na nee destabiliziruiushchikh faktorov [Estimating Communication Network Stability under the Conditions

of Destabilizing Factors Affecting it]. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy* [Radio and Telecommunication Systems], 2013, no. 4 (12), pp. 69–79.

7. Chudnov A.M. Ob adaptivnykh algoritмах psevdosluchainogo perekliucheniia rabochikh chastot radiolinii v usloviakh sluchainykh i prednamerennykh pomekh [On Adaptive Pseudo-random Frequency Hopping Spread Spectrum Algorithms of Radiolinks under Random and Intentional Interference.]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2015, no. 4, pp. 10.

8. Chudnov A.M. Teoretiko-igrovye zadachi sinteza algoritmov formirovaniia i priema signalov [Probabilistic Problems of the Synthesis of Algorithms for Shaping and Receiving Signals]. *Problemy peredachi informatsii* [Problems of Information Transmission], 1991, vol. 27, no. 3, pp. 57–65.

9. Chudnov A.M. O minimaksnykh algoritмах formirovaniia i priema signalov [Minimax Algorithm for Shaping and Receiving Signals]. *Problemy peredachi informatsii* [Problems of Information Transmission], 1986, vol. 22, no. 4, p. 49.

10. Bogovik A.V., Ignatov V.V. *Effektivnost sistem voennoi sviazi i metody ee otsenki* [The Efficiency of the Military Communication Systems and Estimation Methods]. St. Petersburg, VAS Publ., 2006. 183 p.

11. Vladimirov V.I., Vladimirov I.V. *Osnovy otsenki konfliktno-ustoichivyykh sostoianii organizatsionno-tekhnicheskikh sistem (v informatsionnykh konfliktakh)* [Fundamentals of Conflict Stable Conditions of Organizational and Technical Systems (in Information Conflicts)]. Voronezh, VAIU Publ., 2008. 231 p.

12. Mikhailov R.L. Dinamicheskaya model informatsionnogo konflikta informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem spetsialnogo naznacheniia [Informational Conflict of Informational-Telecommunication Systems of Special Purpose Dynamic Model]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2020, no. 3, pp. 238–251. DOI:10.24411/2410-9916-2020-10309.

13. Budnikov S.A. et al. *Modeli informatsionnogo konflikta sredstv poiska i obnaruzheniia*. Monografiia pod red. Iu.L. Koziratskogo [Information Conflict Models of Search and Warning Facilities. Monograph, Iu.L. Koziratsky (ed.)]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 232 p.

14. Koziratskii Iu.L. et al. *Modeli prostranstvennogo i chastotnogo poiska*. Monografiia pod red. Iu.L. Koziratskogo [Models of Spatial Analysis and Limit-Type Search. Monograph, Iu.L. Koziratsky (ed.)]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 344 p.

15. Kozlitin S.N., Koziratskii Iu.L., Budnikov S.A. Modelirovanie sovmestnogo primeneniia sredstv radioelektronnoi borby i ogneвого porazheniia v interesakh povysheniia effektivnosti borby za prevoskhodstvo v upravlenii [Electronic Warfare and Fire Damage Means Joint Use Modeling for Improving a Superiority of Control Struggle Efficiency]. *Sistemy upravleniia, sviazi i*

bezopasnosti [Systems of Control, Communication and Security], 2020, no. 1, pp. 49–73.

16. Sirota A.A., Goncharov N.I. Modelirovanie konfliktного vzaimodeystviia sistem s ispolzovaniem formalizma gibridnykh avtomatov [Modeling of Conflict Interaction of Systems Using the Formalism of Hybrid Automata]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2018, vol. 24, no. 1, pp. 17–27.

17. Sirota A.A., Goncharov N.I. Issledovanie konflikta koalitsii sistem s ispolzovaniem formalizma gibridnykh avtomatov [Research of Conflict Interaction of Coalitions of Systems Using the Formalism of Hybrid Automata]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies], 2017, no. 4, pp. 56–70.

18. Mikhailov R.L. Bazovaya model koordinatsii podsystem nabliudeniia i vozdeystviia informatsionno-telekommunikatsionnoi sistemy spetsialnogo naznacheniia v informatsionnom konflikte [Base Model of Coordination of Surveillance and Impact Subsystems as the Parts of Special Information and Telecommunication System during the Information Conflict]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2019, no. 4, pp. 437–450. DOI:10.24411/2410-9916-2019-10418.

19. Mikhailov R.L. Dvukhurovnevaia model koordinatsii podsystem radiomonitoringa i radioelektronnoi borby [Two-level Model of Coordination of Subsystems of Radiomonitoring and Electronic Warfare]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniiaakh Zemli* [High Technologies in Earth Space Research]. 2018, vol. 10, no. 2, pp. 43–50.

20. Boyko A.A., Ivannikov K.S., Kuznetsov D.A. Metodika postroeniia grafoanaliticheskoi modeli pozitsionnoi dinamiki boia na osnove veroiatnostno-vremennoi sinkhronizatsii deistvii elementov boevykh poriadkov voinskikh formirovaniia [Constructing Graphoanalytic Combat Positional Dynamics Model Based on Military Formations Combat Orders Elements Actions Probability-Temporal Synchronization]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2020, no. 2, pp. 24–48. DOI:10.24411/2410-9916-2020-10202.

21. Boyko A.A., Budnikov S.A. Obespechenie konfliktnoi ustoichivosti programmnoi realizatsii algoritmov upravleniia radioelektronnoi apparaturoi prostranstvenno raspredelennykh organizatsionno-tekhnicheskikh sistem [Conflict Resistance Ensuring of Software Implementation of Control Algorithms of Radioelectronic Equipment of Spatially Distributed Organization and Technical Systems]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2019, no. 4, pp. 100–139. DOI:10.24411/2410-9916-2019-10404.

22. Boyko A.A. Sposob analiticheskogo modelirovaniia boevykh deistvii [Warfare Analytical Modelling Method].

Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti [Systems of Control, Communication and Security], 2019, no. 2, pp. 1–27. DOI:10.24411/2410-9916-2019-10201.

23. Mikhailov R.L. Model dinamicheskoi koordinatsii podsystem nabliudeniia i vozdeistviia v informatsionnom konflikte v vide ierarkhicheskoi differentsialnoi igry trekh lits [Model of Dynamic Coordination of Subsystems of Surveillance and Impact in the Information Conflict as a Hierarchical Differential Game of Three Sides]. *Naukoemkie*

tekhnologii [Science Intensive Technologies], 2018, vol. 19, no. 10, pp. 44–51. DOI:10.18127/j19998465-201810-08.

24. Mikhailov R.L., Poliakov S.L. Model optimalnogo raspredeleniia resursov i issledovanie strategii deistvii storon v khode informatsionnogo konflikta [Model of Optimal Division of Sides Resources during Information Conflict]. *Sistemy upravleniia, sviazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2018, no. 4, pp. 323–344.