

Труды МАИ. 2021. № 121
Trudy MAI, 2021, no. 121

Научная статья

УДК 28.23.24

DOI: [10.34759/trd-2021-121-22](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-22)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ГРУППОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЕМОЙ ФОНОЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ

Виктор Викторович Свиридов

Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого,

Серпухов, Московская область, Россия

Vodiriv@list.ru

Аннотация. При решении задач охраны и обороны критически важных объектов от действий противника возникает проблема повышения эффективности группового управления робототехническими комплексами (РТК) в условиях недетерминированной динамической внешней среды. Существующий в настоящее время методический аппарат оценки эффективности группового управления РТК не в полной мере учитывает особенности недетерминированной среды. В статье рассматривается методический подход, позволяющий на основе вероятностно-временных характеристик оценить качества адаптивного группового взаимодействия комплексами по противодействию противнику с учётом изменяющейся фоноцелевой обстановки.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, адаптивное групповое взаимодействие, недетерминированная внешняя среда, противник, вероятность обнаружения, вероятность поражения, целераспределение

Для цитирования: Свиридов В.В. Методика оценки качества группового взаимодействия робототехнических комплексов в условиях изменяемой фоноцелевой обстановки // Труды МАИ. 2021. № 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-22](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-22)

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE QUALITY OF GROUP INTERACTION OF ROBOTIC COMPLEXES IN A VARIABLE PHONO-TARGET ENVIRONMENT

Victor V. Sviridov

The Military Academy of Strategic Rocket Troops after Peter the Great,
Serpukhov, Moscow region, Russia

Vodiriv@list.ru

Abstract. The main priority of the Russian Federation in the field of military construction is the creation of a modern army, the basis of which are systems and complexes of weapons, military and special equipment, which include robotic complexes (RTK), providing an adequate response to the entire range of security threats, not only existing, but also likely in the future. Nowadays the nature of modern wars has significantly changed, which have become high-tech, dynamic and remote, requiring fundamentally new approaches to both their conduct and military-technical support. Therefore, to modern robotic security complexes strict and, as a rule, contradictory requirements on providing

such quality indicators as reliability, efficiency and completeness of problem solving, which is explained, first of all, by a priori uncertain dynamic environment in which the complexes operate. Maintaining these quality indicators of RTK group control at a given level is the most important factor in ensuring effective protection of critical facilities.

With the increase of combat capabilities on the part of the enemy, the difficulty of controlling a group of RTK increases, it is no longer possible to maintain a given quality of their functioning manually. To solve this problem is possible only on the basis of automation of the process of RTK group control, i.e. development and creation of such adaptive system of group control of complexes, which under unpredictable influences of external conditions, based on analysis of own state of complexes changed values of parameters and/or structure of their interaction so that the preset quality of functioning of complexes for achieving common goal was kept.

The purpose of this article is to develop a methodology for assessing the quality of group interaction of RTK when countering the enemy, based on the assessment of the contribution of each group complex to solving the overall target task. Group interaction of complexes is formed by adapting the group control system of RTK to terrain conditions, changing quantitative and qualitative characteristics of the enemy.

The main problems facing the design of RTK is the complexity in the organization of their out-group and in-group interaction in a changing and non-deterministic environment, in the face of enemy opposition.

One of the ways to solve these problems is to build a hybrid control strategy, i.e. integration of functional capabilities of centralized, collective, swarm and swarm control, in which, depending on changing and uncertain out- and in-group conditions, behavior of

each complex is built on coordinated actions with neighboring complexes, which, in turn, depend on intentions of the complex itself in given conditions.

In order to maintain a given quality of functioning of a group of complexes it is necessary to control the parameters, algorithms of their work and structure. At the same time control actions should be formed as a result of analysis of actual information received from means of reconnaissance RTK, internal controlled parameters of the complexes themselves.

We have developed a methodology to assess the quality of RTK group control under conditions of changing background conditions, which represents a complex of models, the results of which together allow to achieve the set goal, namely: a model of detection of the enemy by RTK reconnaissance means based on the analysis of influence of terrain conditions and enemy characteristics, a model of counteraction of a RTK group based on equations of average dynamics, a model of assessment of probability of enemy defeat by RTK group under conditions of changing number of parties and chaos.

The theoretical basis for the development of the presented methodology is the developed fundamental and applied research in the field of robotic control systems, viz:

artificial intelligence and intelligent robot control systems;

automatic control systems with variable structure;

adaptive predictive control systems;

theory and methods of optimizing the structure of information and control systems;

methods of secondary processing and image recognition;

spectral methods for analysis and synthesis of systems with random structure;

modeling of information systems;

nonlinear dynamics methods;
combat models;
operations research in military affairs.

The practical significance lies in the fact that the developed methodology of assessing the quality of group interaction of robotic complexes will allow to form the image of an adaptive system of group control of complexes, as well as to develop recommendations on the forms and methods of group application of RTK when solving problems of countering the enemy.

Keywords: robotic complex, adaptive group interaction, non-deterministic external environment, enemy, probability of detection, probability of defeat, target distribution

For citation: Sviridov V.V. Methodology for assessing the quality of group interaction of robotic complexes in a variable phono-target environment. *Trudy MAI*, 2021, no. 121.

DOI: [10.34759/trd-2021-121-22](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-22)

Введение.

В настоящее время, с учётом наращивания угроз со стороны противника, возрастает актуальность решения задач охраны и обороны критически важных объектов (КВО) с применением современных видов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), к которым относятся робототехнические комплексы (РТК) [1].

Решение задач охраны и обороны КВО в условиях недетерминированной динамической среды обеспечивается применением групп РТК.

Крайне актуальным в современных условиях является увеличение степени обоснованности группового применения наземных РТК, которая описывается

количественными и качественными характеристиками [2, 3, 4, 5, 6, 7].

Анализ существующих методик [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14] не в полной мере учитывают условия и особенности группового применения РТК в ходе решения задач по защите КВО. К таким особенностям можно отнести совершенствование форм и способом воздействия противника, вызванных развитием средств обнаружения и воздействия по объектам.

Интеллектуализация в программно-технической среде мультиагентных систем создаёт условия и определяет необходимость совершенствования исследований на стыке теории управления, теории исследования операций, теории игр, рисков и принятия решений в направлении оптимизации управления групп РТК в условиях недетерминированной динамической среды [15].

В связи с этим, актуальным является разработка методики оценки адаптивного группового взаимодействия РТК в условиях недетерминированной динамической среды.

Рассматриваемая в статье методика позволяет оценить вклад каждого отдельного комплекса группы для решения общей задачи, в основе которой лежит итерационная процедура, требующая адаптации системы группового управления РТК к изменяющимся условиям. Основными этапами методики являются:

1. Анализ влияния условий местности и характеристик противника на качество его обнаружения средствами разведки комплекса.

2. Модель обнаружения противника средствами разведки робототехнического комплекса в условиях недетерминированной среды.

3. Модель противодействия противнику группой робототехнических комплексов на основе уравнений динамики средних.

4. Оценка вероятности поражения противника группой робототехнических комплексов в условиях изменяющихся численностей сторон и тактико-технических характеристик стрелкового вооружения.

5. Адаптивное групповое взаимодействие робототехнических комплексов в условиях изменяемой фоноцелевой обстановки.

Каждый комплекс группы представляет собой быстроразворачиваемую боевую единицу, имеющую однотипную конструкцию и предназначенную для решения оперативно-тактических задач. Функциональные возможности РТК зависят от качества обнаружения противника в условиях недетерминированной среды и типа вооружения, которыми комплексы вооружены (АК, ПКМ, СВД).

Решение комплексной задачи автоматического целераспределения комплексов группы в условиях недетерминированных динамических средах позволяет вести речь об адаптивном групповом управлении автономных РТК, выполняющих единую целевую задачу.

Под адаптивным групповым управлением автономных РТК понимается выработка каждым комплексом группы таких индивидуальных решений, совокупность которых при взаимодействии комплексов, приведут к действиям, обеспечивающих рациональное решение единой целевой задачи в условиях изменяемых внешних и внутренних средах.

Качество группового применения комплексов оценивается степенью близости реального (фактического) результата требуемому, определяемому поставленной

задачей. Взаимодействие РТК в группе сводится к достижению общей цели, которая выступает как способ объединения различных действий комплексов в некоторую последовательность или систему.

При этом для эффективного решения комплексами целевой задачи, вооружённых различным вооружением (АК, ПКМ, СВД), весьма важно расставить и распределить их на позиции с учётом дальности видимости в конкретных условиях местности и тактико-технических характеристик оружия (АК, ПКМ, СВД) в этих условиях.

1. Анализ влияния условий местности и характеристик противника на качество его обнаружения.

Так как в условиях лесистой местности видимость ограничена, то под дальностью видимости понимается - расстояние, на котором глаз перестает различать предмет в мутном воздухе.

Когда в поле зрения РТК лесного массива отсутствуют какие-либо объекты, определение метеорологической дальности видимости осуществляется по резкости видимости линии горизонта и высоте расположения РТК над уровнем моря (она складывается из высоты места наблюдения и высоты установки ОЭС комплекса) [16].

Дальность прямой видимости в лесном массиве рассчитывается [17]:

$$I_{пв} = \frac{I_d^2}{\delta} c, \quad (1)$$

где I_d - среднее расстояние между деревьями; δ - средняя толщина деревьев; c – коэффициент, учитывающий случайный характер расположения деревьев. Для

естественных лесных массивов $1 < c < 3$. Максимальная дальность эффективного ведения огня не превышает $0,9 I_{ПВ}$.

При проведении расчётов в соответствии с выражением (1) получены следующие зависимости (рисунок 1):

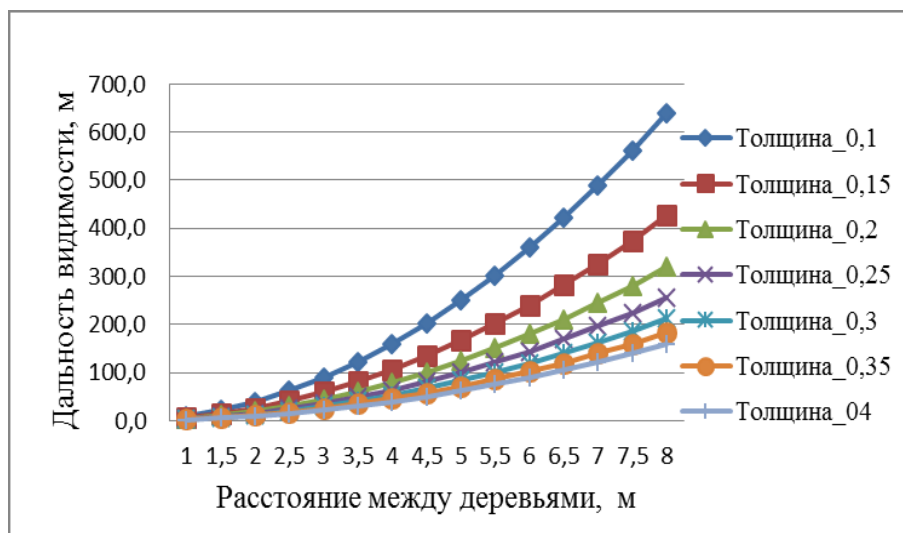


Рис. 1. Зависимость дальности видимости от расстояния между деревьями при коэффициенте $c=1$

Под противником будем понимать человека, обладающего совокупностью присущих ему свойств, из которых наиболее информативным являются: геометрические размеры, способы и скорость передвижения. В таблице 1 приведены параметры, характеризующие геометрические размеры человека в зависимости от способа его передвижения.

Табл. 1 . Геометрические размеры противника

Способ передвижения противника	Геометрические размеры противника		
	Высота, м	Глубина, м	Ширина, м
В рост	1,6...2,0	0,3...0,5	0,4...0,6
Согнувшись	1,0...1,3	1,2...1,3	0,4...0,6
Ползком (перекатыванием)	0,3...0,5	1,6...2,0 (0,4...0,6)	0,4...0,6 (1,6...2,0)

Данные по скорости движения противника при летних и зимних условиях сведены в таблицы 2 и 3 соответственно.

Табл. 2 Предельные скорости движения человека летом

Величина	Способ передвижения противника			
	В рост	Согнувшись	На корточках	Ползком
Дистанция, м	30	20	6	6
V_m , м/с	6,39	5,87	2,07	1,52
σ_V , м/с	0,43	0,42	0,31	0,33
σ_V / V_m	0,07	0,07	0,15	0,22

Табл.3 Предельные скорости движения человека зимой

Величина	Способ передвижения противника			
	В рост	Согнувшись	На корточках	Ползком
Дистанция, м	20	20	6	6
V_m , м/с	3,37	3,31	2,07	0,61
σ_V , м/с	0,28	0,33	0,33	0,20
σ_V / V_m	0,08	0,10	0,16	0,33

Исходя из анализа условий местности и характеристик противника, рассчитана дальняя граница контакта с противником, в соответствии с тактикой ведения боя [18] в условиях лесистой слабопересечённой местности. Результаты представлены в таблице 4.

Табл. 4. Значения дальней границы огневого контакта с противником

Условия местности	Дальняя граница огневого контакта, м	Требования
Открытый участок	180-240	К прямой видимости
Редколесье	120	К прямой видимости
Лес	60-90	К прямой видимости

2. Модель обнаружения противника средствами разведки робототехнического комплекса в условиях недетерминированной среды.

Вероятность прямой видимости противника ($P_{пр.вид.}(x)$) зависит от рельефа местности и от дальности прямой видимости в лесном массиве. На основании обработки опытных данных для вычисления $P_{пр.вид.}(x)$ предложена функция отношения дальности (x) обнаружения противника к его высоте (h), при условии $I_{ПВ} \geq x$:

$$P_{об.прот.}(x) = \exp\left(-\frac{kx}{h}\right) \cdot \exp\left(-\frac{x\delta}{I^2c}\right), \quad (2)$$

где k - коэффициент рельефности местности и изменяется в диапазоне от 0,001 до 0,003; x - расстояние, с которого обнаружен противник высотой - h .

Вероятность обнаружения противника $P_{об.прот.}(x)$ в лесистой местности является вероятностью сложного события, определяемого вероятностью выхода противника в сектор обзора j - го РТК: $P_{вых.j}$; прямой видимостью противника с вероятностью $P_{пр.вид.}(x)$ и вероятностью правильного обнаружения при условии, что прямая видимость обеспечена с вероятностью $P_{ПО.}(I_{ПВ})$:

$$P_{об.прот.}(x) = P_{вых.j} \cdot P_{пр.вид.}(x) \cdot P_{ПО.}(I_{ПВ}). \quad (3)$$

Вероятность прямой видимости противника по его геометрическим размерам (см. таблицу 2) рассчитывается в соответствии с выражением 2, результаты представлены на рисунке 2.

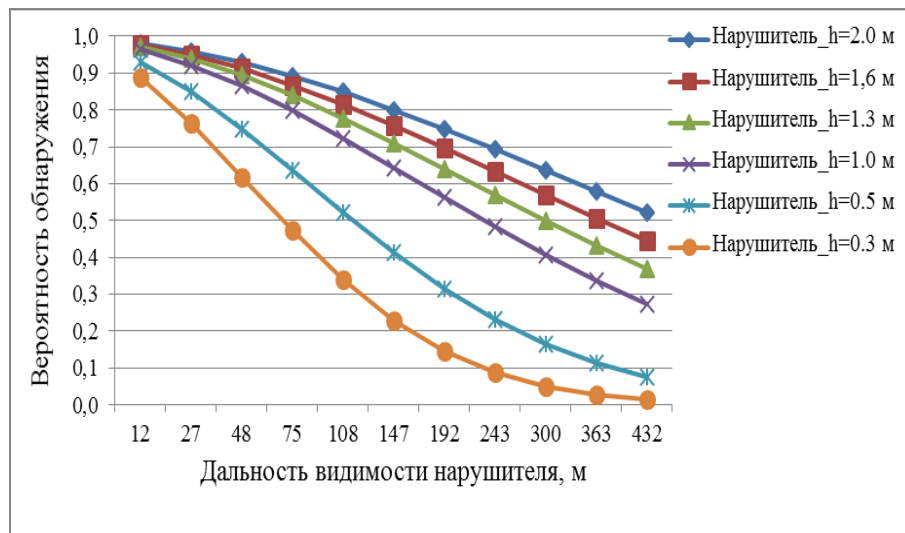


Рис. 2. Зависимость вероятности прямой видимости фигур противника от расстояния

При проведении войсковых исследований в рамках КШУ и КШТ с частями и подразделениями РВСН получены результаты, при которых средняя дальность видимости человека в лесном массиве с помощью оптико-электронных средств не превышает 80 метров. Так из графика (рисунок 2) видно, что при высоте нарушителя 0,3 (м) - грудная фигура, на расстоянии (x) равном 75 (м), при коэффициенте рельефности местности (k) равном 0,003 вероятность прямой видимости противника $P_{пр.вид.}(x)$ составляет 0,49.

При расчёте вероятности обнаружения противника (выражение 3) условимся, что вероятность выхода противника в сектор обзора j – го РТК $P_{вых.j} = 1$; расчётные данные вероятности видимости грудной фигуры противника ($h=0,3$ метра) на дальности 75 метров от РТК составляет $P_{пр.вид.}(75) = 0.49$; вероятность правильного обнаружения противника $P_{ПО.}(I_{ПВ})$ с применением РТК (по результатам войсковых исследований) составляет $0,8 \div 0,9$.

Для данных условий вероятность обнаружения противника по результатам проведённых расчётов составила $P_{об.прот.}(75) = 0,42$. В соответствии с ГОСТ 352860-2007 г. это значительно ниже требуемой вероятности обнаружения противника с применением оптико-электронных средств (для средств охраны вероятность обнаружения нарушителя должна составлять $0,9 \div 0,95$, при доверительной вероятности 0.9).

В [19] предложен подход автоматического формирования видеопанорам высокого разрешения по информации от нескольких пространственно разнесенных камер с пересекающимися полями зрения.

3. Модель противодействия противнику группой робототехнических комплексов на основе уравнений динамики средних.

Так как способы движения противника к охраняемому объекту могут в зависимости от условий местности и способов передвижения противника меняться (таблица 1), рассчитаем вероятности попадания первого патрона и очередь из трёх патронов для средних площадей: головная фигура $S_{\phi.голова} = 0,06 \text{ (м}^2\text{)}$, ползком $S_{\phi.полз} = 0,2 \text{ (м}^2\text{)}$ и согнувшись (перебежками) $S_{\phi.согн} = 0,58 \text{ (м}^2\text{)}$. $S_{эл.}$ - площадь эллипса рассеивания пуль соответствующего вооружения АК, ПКМ, СВД определяются по [таблицы 29, 37, 42 ГРАУ]. Результаты расчётов сведём в таблицу 5.

Условимся, что требуемая вероятность поражения $P_{пор.}^{mp} \geq 0,95$.

Табл. 5. Вероятности попадания патрона с различного вооружения в различные наименования мишеней

Мишени		Вероятность попадания 1 патрона			Вероятность очередью по 3 патрона		
Наименование	Площадь, м ²	АК	ПКМ	СВД	АК	ПКМ	СВД
Головная	0,06	0,29	0,17	0,99	0,64	0,42	0,99
Грудная	0,2	0,53	0,30	0,99	0,89	0,66	0,99
Поясная	0,58	0,89	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Из результатов таблицы 5 видно, что вероятность попадания первого (одного) патрона заметно ниже, чем вероятность попадания очередью по три патрона рассматриваемым стрелковым оружием. То есть, стрельба очередями экономит главный ресурс – время поражения цели, поэтому дальнейший анализ качества адаптивного группового управления РТК будем производить только очередями в три патрона.

Рассчитаем количество боеприпасов и время, необходимые для поражения мишеней с вооружения (АК, ПКМ, СВД) для достижения требуемой вероятности поражения ($P_{пор}^{mp} \geq 0,95$), результаты сведём в таблицу 6.

Табл. 6. Результаты расчётов характеристик стрелкового вооружения

Мишени		Вероятность поражения			Кол-во патронов, (шт.) / Время поражения, (сек.)		
Наименование	Площадь, м ²	АК	ПКМ	СВД	АК	ПКМ	СВД
головная	0,06	0,952	0,955	0,99	9/5,13	17/10,2	1/0,59
грудная	0,2	0,976	0,961	0,99	5/2,85	9/5,4	1/0,59
поясная	0,58	0,989	0,99	0,99	2/1,14	1/0,6	1/0,59

Из результатов видно, что для достижения требуемой вероятности поражения мишеней на расстоянии в 400 метров из ПКМ требуется в среднем в 2 раза больше боеприпасов и времени, чем у автомата Калашникова (АК). Для достижения требуемой вероятности поражения с СВД для всех мишеней требуется по 1 патрону, время для поражения каждой мишени составляет 0,59 секунд.

Группы противника могут быть вооружены штатным огнестрельным оружием, принятым на вооружение в армиях их государств (пистолетами, винтовками, противотанковыми ружьями, гранатомётами), и специальными малогабаритными минами ПТУРСами. Террористические группы могут быть вооружены и оружием отечественного производства.

Используя уравнения Осипова–Ланчестера, с учётом вышеперечисленных особенностей (таблицы 5, 6), проведём моделирование высокоорганизованного боя между группой противника и группой РТК, т.е. найдём математическое ожидание боеспособных единиц каждой стороны (соотношение сторон 5:5) с течением времени боя (выражения 5 и 6):

$$m_1 = N_1 ch(\sqrt{vu} \cdot t) - N_2 \sqrt{\frac{u}{v}} sh(\sqrt{vu} \cdot t), \quad (4)$$

$$m_2 = N_2 ch(\sqrt{vu} \cdot t) - N_1 \sqrt{\frac{v}{u}} sh(\sqrt{vu} \cdot t). \quad (5)$$

где N_1, N_2 - численности противника и РТК, соответственно.

Эффективная скорострельность вооружения противника (v) и РТК – (u) находятся по выражению (6):

$$v = \gamma_{прот.} \cdot P_{прот.}^1, \quad u = \gamma_{РТК} \cdot P_{РТК}^1 \quad (6)$$

где $\gamma_{прот.}$ и $\gamma_{РТК}$ - боевая скорострельность вооружения противника и РТК, соответственно; $P_{прот.}^1$ и $P_{РТК}^1$ - вероятность попадания первого патрона из вооружения противника и РТК, соответственно.

С учётом допущений, результаты моделирования представлены на графиках (рисунок 3, 4, 5).

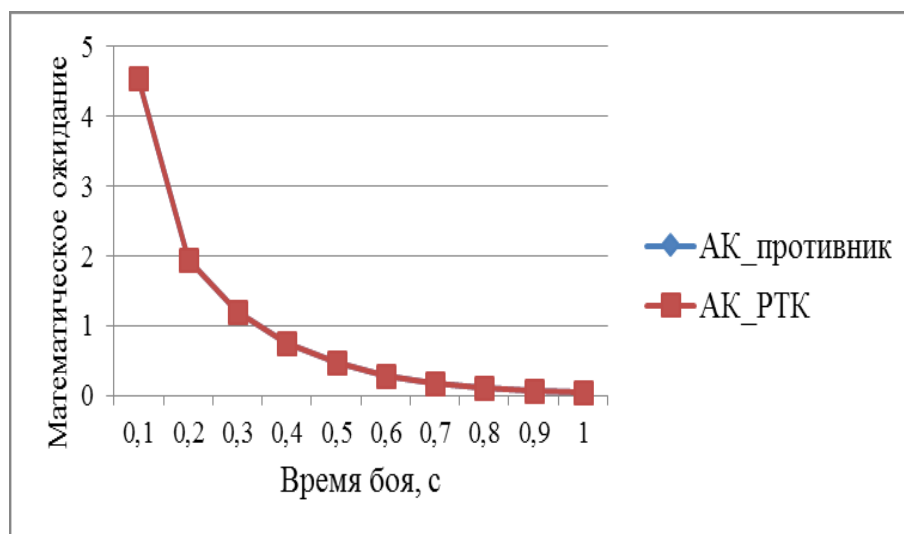


Рис. 3. Результаты моделирования боя (обе стороны вооружены АК)

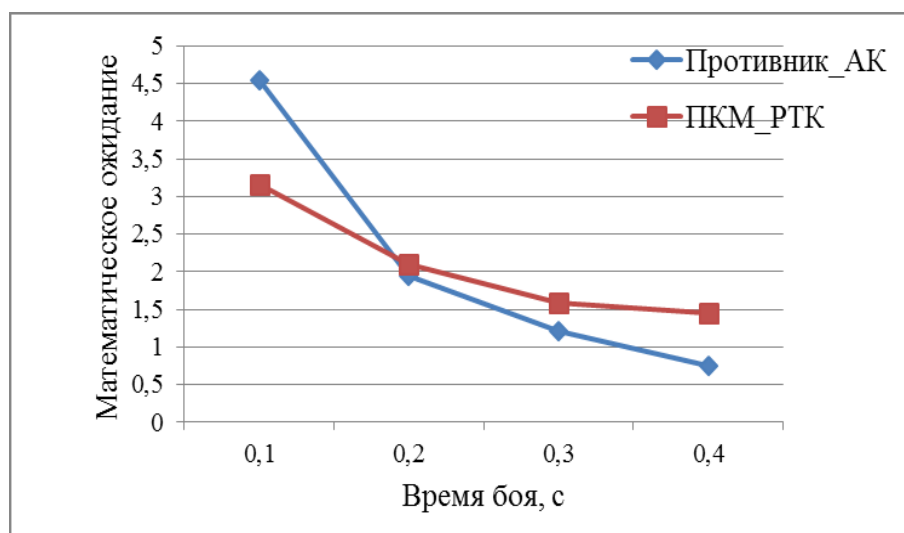


Рис. 4. Результаты моделирования боя (противник вооружён - АК, группа РТК - ПКМ)

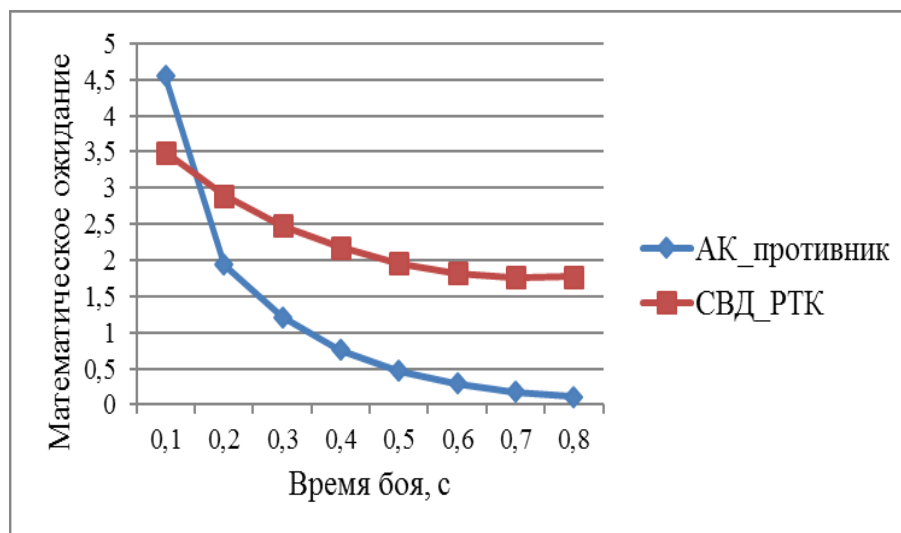


Рис. 5. Результаты моделирования боя (противник вооружён - АК, группа РТК - СВД)

Из результатов моделирования видно, что при численности двух сторон (5:5) вооруженных автоматом (АК), бой заканчивается уничтожением каждой стороны (рисунок 3) за превентивное время боя 1 с. Из анализа результатов боя, в котором противник вооружён автоматом АК, а группа РТК вооружена пулемётом ПКМ (рисунок 4) можно сделать вывод, что математическое ожидание числа боеготовых единиц противника на первых минутах боя (превентивное время 0,4 с) уменьшается, а при условии, когда РТК вооружён снайперской винтовкой СВД, а противник – АК (рисунок 5), наблюдается сокращения численной группировки противника уже в первые моменты времени.

Таким образом, можно сделать вывод, что при равной численности двух сторон бой выигрывает та сторона, у которой вооружение имеет наибольшую эффективную скорострельность.

4. Оценка вероятности поражения противника группой РТК

Вероятность поражения противника определим на основании модели боя при малых численностях сторон противника и РТК, в основе которой лежат следующие предположения:

группа РТК и диверсионная группа противника представляют собой две стороны, между которыми происходит непрерывное огневое противодействие;

каждая боевая единица совершает пуассоновский поток выстрелов и может находиться в двух состояниях – поражена или сохраняет боеспособность;

вероятность успешного выстрела боевых единиц РТК и противника зависит от вероятности попадания первого патрона в цель, эффективной и боевой скорострельности оружия каждой из сторон.

При данных допущениях вероятность поражение противника группой РТК в ходе дуэльного боя определяется из выражения (7):

$$P_{пор.}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda_{прот.}}{\lambda_{РТК}} \right) \left(\frac{N_{РТК}}{N_{прот.}} \right)^2 \cdot \exp \left(\frac{k_{РТК}u - k_{прот.}v}{k_{РТК} \cdot u \cdot k_{прот.} \cdot v \cdot (0,9x)} \cdot x \right)} \quad (7)$$

где $\gamma_{РТК}$ - боевая скорострельность оружия РТК;

$\gamma_{прот.}$ - боевая скорострельность оружия противника;

$N_{РТК}$ - количество единиц РТК;

$N_{прот.}$ - количество единиц противника;

$k_{РТК} = \frac{P_{РТК}^1}{P_{прот.}^1}$; $k_{прот.} = \frac{P_{прот.}^1}{P_{РТК}^1}$ - коэффициенты, характеризующие изменение

эффективной стрельбы за счёт изменения вероятности попадания первого патрона в цель оружием РТК и противника;

u, v - эффективная скорострельность боевых единиц РТК и противника, соответственно (см. выражение б);

x - дальность обнаружения противника РТК;

$0,9x$ - максимальная дальность эффективного ведения огня сторонами.

Результаты моделирования представлены на рисунке 6.

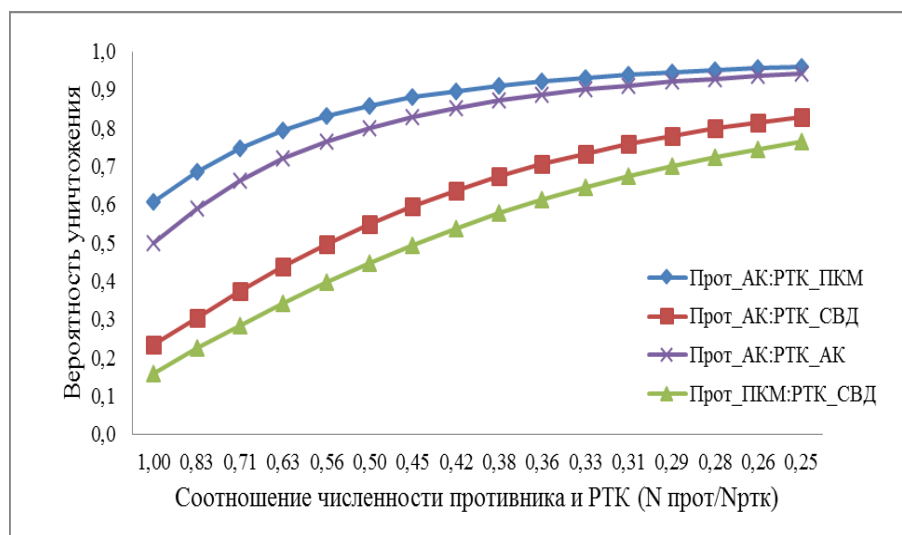


Рис. 6. Зависимость вероятности поражения ($P_{пор}$) от соотношения численности противника и группы РТК

Из результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Вероятность поражения ($P_{пор}$) противника в наибольшей степени чувствительна к вероятности попадания первого патрона (P^I), т.е. соотношения площади цели к эллипсу рассеивания патронов на максимальная дальность эффективного ведения огня.

2. Требуемое значение вероятности поражения ($P_{пор}^{треб.} \geq 0,95$) достигает только с увеличением количества РТК в группе в 4 раза в случае, когда противник вооружён автоматом (АК), а РТК пулемётом (ПКМ).

Передача информации между комплексами может осуществляться по составному каналу, организованному при помощи устройств, устанавливаемых на комплекс, а также штатных устройств, расположенных на комплексе. Разработанный в [20] способ предусматривает организацию связи между комплексами путем развертывания радиолинии в ограниченный период времени, т.е. в период времени необходимый для выполнения поставленной задачи, в необорудованных в отношении связи районах, районах в которых затруднено развертывание и применение наземных средств связи (сложный рельеф местности, заболоченность, пожары, электромагнитная несовместимость, радиоэлектронное противодействие, (зоны повышенного заражения, лесные завалы) и т.д.).

Таким образом, при различных условиях местности, изменяющихся форм и способов воздействия противника по объектам, а также при изменяемых внутренних параметров РТК требуется адаптация группового управления РТК для целенаправленного противодействия ДРГ, необходимо скоординированное взаимодействие комплексов в группе для достижения общей групповой цели.

5. Адаптивное групповое взаимодействие робототехнических комплексов в условиях изменяемой фоноцелевой обстановки.

В базе данных каждого РТК заложена библиотека моделей противодействия противнику. Исходя степени боевой готовности войск для качественного группового управления комплексами определён тот или иной показатель эффективности решения целевой задачи (вероятность поражения противника, оперативность, количество боеприпасов, затрачиваемое для поражения противника).

Например, в соответствии с вариантом развития событий (рисунок 7) каждый РТК в библиотеке базы данных выбирает рациональную модель противодействия противнику для достижения общей групповой цели:

$$R_{(m*n)}^* = \left\| r_{ij}^* \right\|_{(m*n)}, \quad (8)$$

при совокупности которых достигается верхняя грань эффективности решения целевой задачи

$$W = \mathop{\text{Sup}}_{r^* \in R} \left(\sum_{i=1}^m P_{nop.ij} \sum_{j=1}^n A_j r_{ij} \right), \quad (9)$$

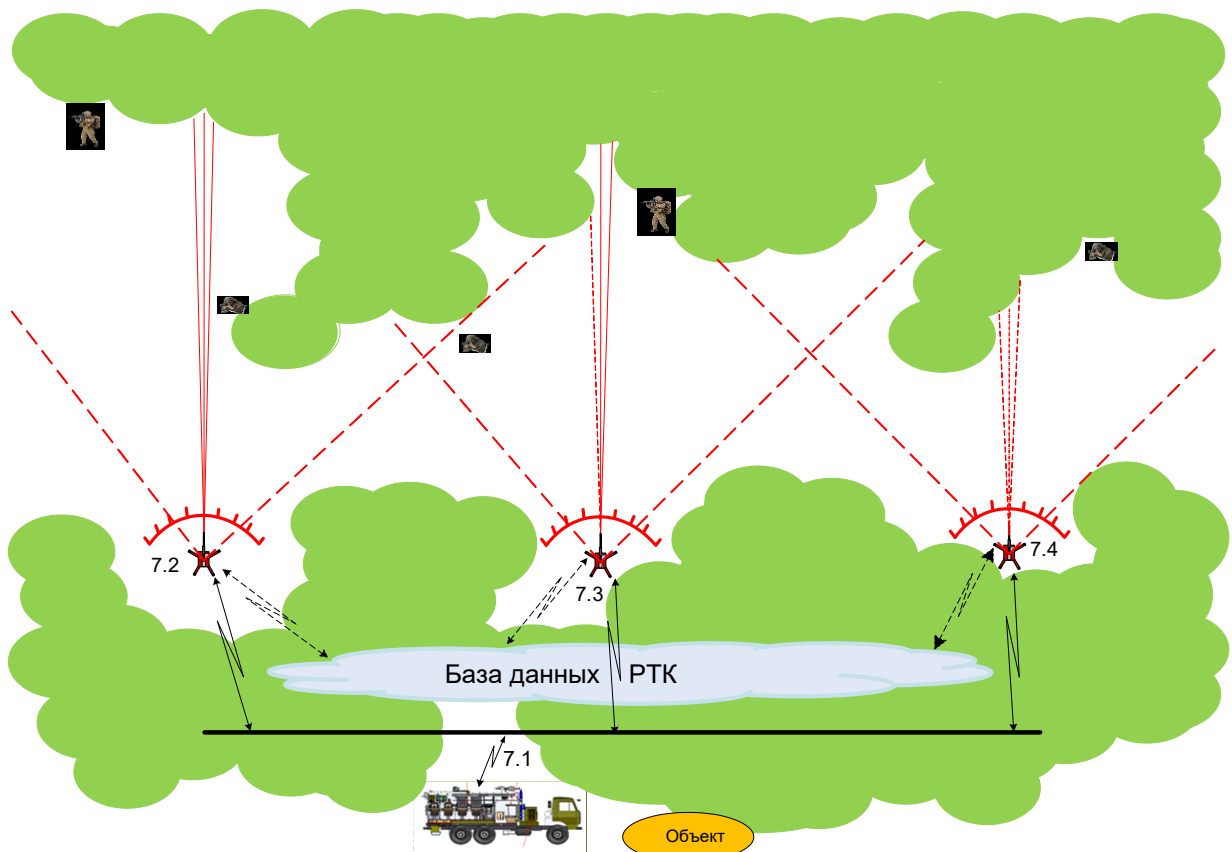


Рис. 7. Схема группового управления РТК в детерминированных условиях обстановки (вариант)

В детерминированной среде (рисунок 7) вероятность полного уничтожения группы противника, при условиях:

численность противника, нападающих на объект -5;

численность РТК в группе - 3;

вероятность поражения i -м РТК j -го противника - $P_{пор.ij}$;

коэффициент важности противника - A_j .

и ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n r_{ij} = z_i, \text{ при } i=1, \dots, 3;$$

$$\sum_{i=1}^n r_{ij} = 1, \text{ при } j=1, \dots, 5;$$

$$\sum_{i=1}^n z_i = 5;$$

$$\sum_{j=1}^m A_j = 1.$$

в соответствии с (7), рассчитывается по выражению:

$$P_{унич.} = 1 - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 A_j (1 - P_{пор.ij}) \geq P^{mp}. \quad (10)$$

В условиях недетерминированной среды система группового управления РТК, представляющая собой распределённую структуру, выбирает тот сценарий взаимодействия комплексов

$$r^* = \left\| r_{ij} \right\|_{i,j=1}^{i=n, j=m},$$

при котором достигается качественное решение общей целевой задачи, т.е. максимальная эффективность противодействия группе противника, с учётом степени его важности (рисунок 8):

$$W = \text{Sup}_{r^* \in R} \sum_{j=1}^n A_j (1 - \prod_{i=1}^m q_{ij}^{PTK_{ij}}). \quad (11)$$

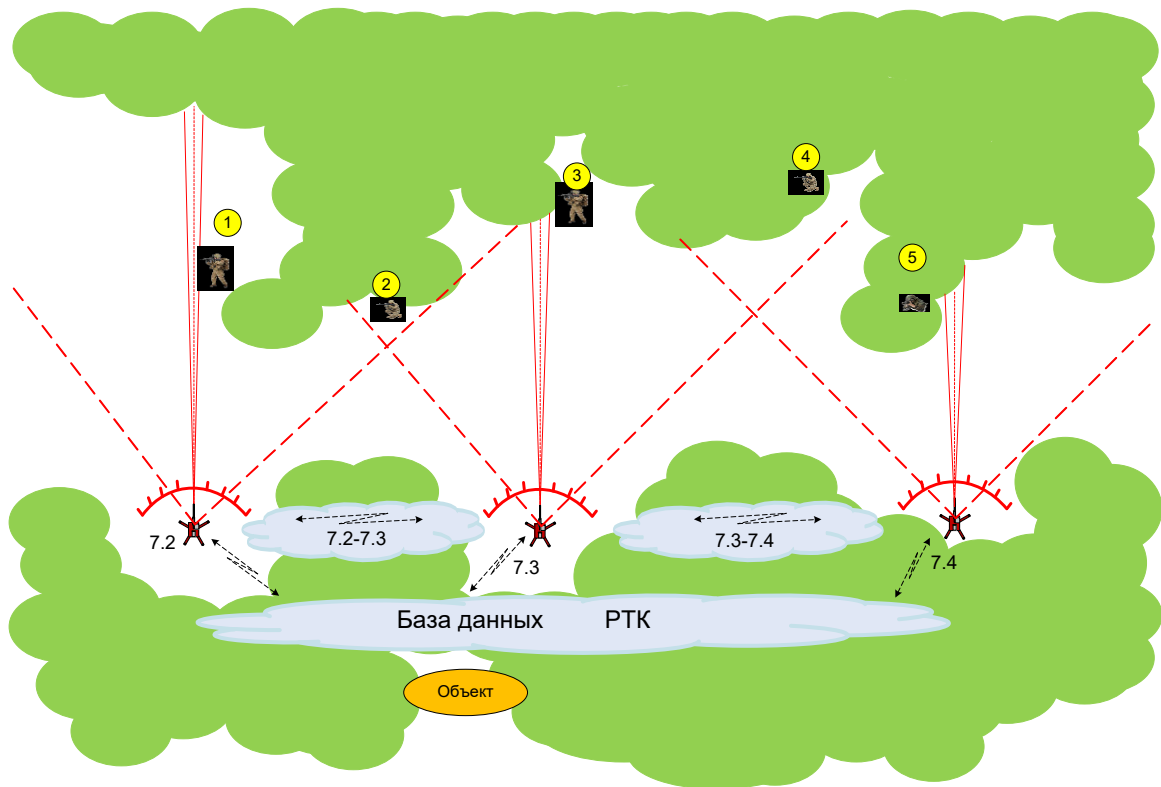


Рис. 8. Схема группового управления РТК в недетерминированных условиях обстановки (вариант)

Так, при условиях:

- численность противника, нападающих на объект – n ;
- численность РТК в группе – m ;
- комплексы группы вооружены оружием АК, ПКМ, СВД, в зависимости от дальности видимости в лесном массиве и ТТХ самого оружия;
- коэффициент важности противника - A_j ;
- вероятность непоражения i -м РТК j -го противника - q_{ij} ;
- количество РТК i -го типа, назначенных для поражения j -го противника - PTK_{ij} .

- суммарное время поражения противника группой РТК -

$$t_{пораж.}^{гр.РТК} = \sum_{i=1}^m t_i \rightarrow \min ;$$

- количество затрачиваемых боеприпасов группой РТК при поражении

противника $g^{zp.PTK} = \sum_{i=1}^m g_i \rightarrow \min ;$

- вероятность поражения противника группой РТК $P_{nopij} \geq P_{nopij}^{mp} = 0,95;$

- $\sum_{j=1}^m A_j = 1;$

- $0 \leq q_{ij} \leq 1.$

Система группового управления РТК позволяет формировать план распределения РТК группы по целям противника:

$$r^u = \left\| r_{ij}^u \right\|_{i,j=1}^{i=n,j=m},$$

при котором целевая функция примет вид [21]:

$$F_u(t_1) = A_k \left(1 - \frac{PTK_{rk}}{q_{rk}} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^n \frac{PTK_{ik}}{q_{ik}} \right) + A_l \left(1 - \frac{PTK_{rl}}{q_{rl}} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^n \frac{PTK_{il}}{q_{il}} \right) + \sum_{j=1}^m A_j \left(1 - \prod_{i=1}^n \frac{PTK_{ij}}{q_{ij}} \right) \quad (12)$$

В условиях изменяющейся внешней обстановки (например, перемещение целей противника, изменение его геометрических размеров), а также изменяемых с течением боя внутренних условий в группе РТК (например, выход из строя РТК, отсутствие боеприпасов, связи между некоторыми комплексами в группе) система группового управления перераспределяет РТК по целям противника. Так, например, в соответствии со схемой (рисунок 8) второй противник находится в секторе обзора РТК(7.2) и РТК(7.3), а четвёртый в секторе обзора РТК(7.3) и РТК(7.4). Между РТК(7.2) и РТК(7.3), а также РТК(7.3) и РТК(7.4) происходит сравнение значений показателей качества (вероятность поражения противника, время его поражения, количество затрачиваемых боеприпасов) воздействия по противнику 2 и 4, соответственно. Тот комплекс, у которого по совокупности показателей

эффективность поражения выше, тот и будет поражать противника в зоне своей деятельности.

В этом случае целевая функция примет вид:

$$F_{u+1}(t_1 + \Delta t) = A_k \left(1 - \frac{PTK_{rk-1}}{q_{rk}} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^n \frac{PTK_{ik}}{q_{ik}} \right) + A_l \left(1 - \frac{PTK_{rl+1}}{q_{rl}} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq r}}^n \frac{PTK_{il}}{q_{il}} \right) + \sum_{j=1}^m A_j \left(1 - \prod_{i=1}^n \frac{PTK_{ij}}{q_{ij}} \right) \quad (13)$$

В течение боя показатели качества при каждом плане распределения РТК по целям противника хранятся в облаке базы данных РТК (рисунок 8) для оперативного принятия системой группового управления решения по формированию стратегии по противодействию противнику.

Выводы

Результаты проведённых исследований позволяют оценить качество адаптивного группового взаимодействия робототехнических комплексов в условиях изменяющейся фоноцелевой обстановки.

По результатам проведённого моделирования обосновано применение принципа интенции (лат. *intentio* «намерение, стремление»), при котором, в соответствии с изменяющейся обстановкой, каждый комплекс группы вырабатывает индивидуальный решение к действию, при совокупности которых на коммуникативном уровне формируется групповая стратегия (замысел) достижения общей цели.

1. В рамках методики разработанная модель обнаружения противника средствами разведки робототехнического комплекса позволяет оценить дальность

его обнаружения, исходя из анализа условий местности (рельефа, расположения и толщины деревьев) и геометрических размеров противника, изменяющихся при различных способах его передвижения в лесном массиве. Результаты проведённого моделирования и войсковых исследований показывают, что вероятность обнаружения противника в лесных условиях на дальности в 75 метров составляет 0,42.

2. Модель противодействия противнику группой РТК, обладает свойством оценки количественных характеристик высокоорганизованного боя. Результаты моделирования показывают, что при равной численности сторон (5:5), вооружённых автоматом Калашникова (АК), бой заканчивается уничтожением каждой стороны. При смене у РТК вооружения на пулемёт (ПКМ) или снайперскую винтовку (СВД) математическое ожидание числа боеготовых единиц противника уменьшается в первые моменты времени. Таким образом, при равной численности, в бою победит та сторона, которая вооружена стрелковым оружием с высшей боевой эффективностью.

3. С помощью разработанной модели группового взаимодействия РТК в условиях недетерминированной среды возможно оценить функциональные возможности адаптивной системы группового управления комплексами по их распределению. Исходя из индивидуальной стратегии, выработанной каждым РТК, в системе группового управления происходит сравнительная оценка показателей качества (вероятности поражения противника, времени его поражения и количества затрачиваемых боеприпасов) поражения противника и его коэффициента важности,

в соответствии с которой вырабатывается план по целераспределению комплексов в группе.

Предложенная методика оценки качества характеристик группового взаимодействия РТК позволяет оценить функциональные возможности адаптивной системы группового управления робототехническими комплексами до проведения натурных испытаний и ускорить разработку робототехнической системы охраны критически важных объектов.

Список источников

1. Кузьмичев В.В., Скрипачев Д.А. ФЦНВТ и безопасность критически важных объектов. Сборник научных трудов. - М.: СНПО «Элерон», 2011. - 235 с.
2. Лазарев В.М., Свиридов В.В. Математическая модель оценки функциональных возможностей робототехнических комплексов по противодействию противнику на основе уравнений динамики высокоорганизованного боя // Информатика и системы управления. 2021. № 2. С. 23-33.
3. Свиридов В.В. Применение робототехнических комплексов охраны и обороны критически важных объектов Ракетных войск стратегического назначения // Военная мысль. 2021. № 6. С. 57-64.
4. Чуев В.Ю., Дубоград И.В., Анисова Т.Л. Вероятностная модель отражения атаки разнотипных средств // Математическое моделирование и численные методы. 2018. № 1. С. 90-97. DOI: [10.18698/2309-3684-2018-1-9097](https://doi.org/10.18698/2309-3684-2018-1-9097)

5. Мальцев А.И. Подход к обоснованию вероятностных характеристик периметральных средств обнаружения // Журнал технологии и защиты. 2015. № 5. URL: <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=1348&uid2=1450&uid3=1461>
6. Матвеев М.Г., Гринева Е.В. Обработка экспертной информации в задачах принятия решений в условиях нечеткой неопределенности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 8. С. 11-14.
7. Левкин И.М. Комплексная оценка эффективности робототехнических систем добывания и обработки информации // Известия Вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 2. С. 110-116. DOI: [10.17586/0021-3454-2017-60-2-110-116](https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-2-110-116)
8. Фу К., Гонсалес Р., Ли К. Робототехника: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 624 с.
9. Каляев А.И., Каляев И.А. Метод децентрализованного управления распределённой системой при выполнении потока заданий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 9. С. 595-598.
10. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // Робототехника, автоматика и системы управления. 2018. № 5 (60). С. 39-63. DOI: [10.15622/sp.60.2](https://doi.org/10.15622/sp.60.2)
11. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов: монография. – Таганрог: Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2016. – 280 с.
12. Каляев И.А., Лохин В.М., Макаров И.М. и др. Интеллектуальные роботы / Под общей ред. Е.И. Юревича. - М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.

13. Макаров И.М. Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. - М.: Наука, 2006. - 333 с.
14. Smeets M., Erhard R., Kaußler T. Robotic Process Automation (RPA) in der Finanzwirtschaft: Technologie – Implementierung - Erfolgsfaktoren für Entscheider und Anwender, Berlin, Springer Verlag, 2019. DOI:[10.1007/978-3-658-26564-9](https://doi.org/10.1007/978-3-658-26564-9)
15. Голомазов А.В. Метод информационной поддержки принятия решений реализуемый в среде мультиагентной системы // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105738>
16. Шаранов В.В. Наблюдение и видимость. URL: http://vrazvedka.ru/main/learning/vopros-ob/sharonov_05.html
17. Симонян Р.Г., Гришин С.В. Разведка в особых условиях. - М.: Воениздат, 1975. 356 с.
18. Тактика ведения боя в лесном массиве. URL: https://спецназприм.пф/pod_spn/taktika/235-taktika-vedeniya-boya-v-lesnom-massive.html
19. Кудинов И.А., Холопов И.С., Храмов М.Ю. Технология формирования панорамных разносектральных видеоизображений для обзорных авиационных оптико-электронных систем // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102241>
20. Ананьев А.В., Стафеев М.А., Макеев Е.В. Разработка способа организации связи с использованием беспилотных летательных аппаратов малой дальности // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104223>

21. Микрюков В.Ю. Теория взаимодействия войск. - М.: Вузовская книга, 2006. - 238 с.

References

1. Kuz'michev V.V., Skripachev D.A. *FTsNVT i bezopasnost' kriticheski vazhnykh ob"ektov. Sbornik nauchnykh trudov* (FTSNVT and safety of critical facilities. Collection of scientific papers), Moscow, SNPO «Eleron, 2011, 235 p.
2. Lazarev V.M., Sviridov V.V. *Informatika i sistemy upravleniya*, 2021, no. 2, pp. 23-33.
3. Sviridov V.V. *Voennaya mysl'*, 2021, no. 6, pp. 57-64.
4. Chuev V.Yu., Dubograi I.V., Anisova T.L. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody*, 2018, no. 1, pp. 90-97. DOI: [10.18698/2309-3684-2018-1-9097](https://doi.org/10.18698/2309-3684-2018-1-9097)
5. Mal'tsev A.I. *Zhurnal tekhnologii i zashchity*, 2015, no. 5. URL: <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=1348&uid2=1450&uid3=1461>
6. Matveev M.G., Grineva E.V. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, vol. 8, no. 8, pp. 11-14.
7. Levkin I.M. *Izvestiya Vuzov. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 110-116. DOI: [10.17586/0021-3454-2017-60-2-110-116](https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-2-110-116)
8. Fu K., Gonsales R., Li K. *Robototekhnika* (Robotics), Moscow, Mir, 1989, 624 p.
9. Kalyaev A.I., Kalyaev I.A. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 9, pp. 595-598.
10. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. *Robototekhnika, avtomatika i sistemy upravleniya*, 2018, no. 5 (60), pp. 39-63. DOI: [10.15622/sp.60.2](https://doi.org/10.15622/sp.60.2)

11. Kalyaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustyan S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov: monografiya* (Models and algorithms of collective control in groups of robots: monograph), Taganrog, Izdatel'skaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura", 2016, 280 p.
12. Kalyaev I.A., Lokhin V.M., Makarov I.M. et al. *Intellektual'nye roboty* (Intelligent robots), Moscow, Mashinostroenie, 2007, 360 p.
13. Makarov I.M. Lokhin V.M., Man'ko S.V., Romanov M.P. *Iskusstvennyi intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya* (Artificial intelligence and intelligent control systems), Moscow, Nauka, 2006, 333 p.
14. Smeets M., Erhard R., Kaußler T. *Robotic Process Automation (RPA) in der Finanzwirtschaft: Technologie – Implementierung - Erfolgsfaktoren für Entscheider und Anwender*, Berlin, Springer Verlag, 2019. DOI:[10.1007/978-3-658-26564-915](https://doi.org/10.1007/978-3-658-26564-915)
15. Golomazov A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 106. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=105738>
16. Sharanov V.V. *Nablyudenie i vidimost'* (Observation and visibility), URL: http://vrazvedka.ru/main/learning/vopros-ob/sharonov_05.html
17. Simonyan R.G., Grishin S.V. *Razvedka v osobykh usloviyakh* (Intelligence in special conditions), Moscow, Voenizdat, 1975, 356 p.
18. *Taktika vedeniya boya v lesnom massive*. URL: https://spetsnazprim.rf/pod_spn/taktika/235-taktika-vedeniya-boya-v-lesnom-massive.html
19. Kudinov I.A., Kholopov I.S., Khramov M.Yu. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102241>

20. Anan'ev A.V., Stafeev M.A., Makeev E.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 105. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104223>

21. Mikryukov V.Yu. *Teoriya vzaimodeistviya voisk* (Theory of interaction of troops), Moscow, Vuzovskaya kniga, 2006, 238 p.

Статья поступила в редакцию 25.11.2021; одобрена после рецензирования 02.12.2021; принята к публикации 21.12.2021

The article was submitted on 25.11.2021; approved after reviewing on 02.12.2021; accepted for publication on 21.12.2021.