

Подход к разработке робототехнических комплексов, предназначенных для ведения аварийно-спасательных работ в зонах разрушений с пожарами

ISSN 1996-8493

© Технологии гражданской безопасности, 2023

Е.В. Павлов, А.Ю. Баранник

Аннотация

Представлен критериальный подход к оптимизации технического облика робототехнического комплекса (РТК) многорежимного пожаротушения, как составной части методического аппарата его разработки. Показано содержание и особенности математического моделирования и методов многокритериальной оценки, а также их место в общем процессе оптимизации технического облика РТК. Отмечен метод анализа иерархий с аддитивной моделью попарных сравнений, как наиболее приемлемый при осуществлении оптимизации технического облика РТК.

Ключевые слова: технический облик; структура робототехнического комплекса; оптимизация; интегративные характеристики; тактические показатели; пожаротушение; многокритериальная оценка; моделирование; критериальные методы.

An Approach to the Development of Robotic Systems Designed for Conducting Emergency Rescue Operations in Areas of Destruction with Fires

ISSN 1996-8493

© Civil Security Technology, 2023

E. Pavlov, A. Barannik

Abstract

Criteria-based approach to the multi-mode fire extinguishing robotic complex configuration optimizing as an integral part of the methodological apparatus of its development is presented. The content and features of mathematical modeling and multicriteria assessment methods are shown, as well as their place in the overall process of robotic complex configuration optimizing. The method of analyzing hierarchies with an additive model of pairwise comparisons is noted as the most acceptable when optimizing robotic complex configuration.

Key words: configuration; robotic complex structure; optimization; integrative characteristics; tactical indicators; firefighting; multi-criteria assessment; modeling; criteria methods.

03.11.2023

Введение

Современное развитие базовых технологий робототехники обеспечило расширение возможностей по созданию робототехнических комплексов (РТК), обладающих такими свойствами как: автономное управление; распознавание объектов окружающей обстановки; передача большого объема телеметрической информации; многофункциональность; групповое управление разнотипными робототехническими средствами; применение гусеничного шасси. Появление именно этих возможностей позволяет значительно повысить эффективность применения РТК при ведении аварийно-спасательных работ (АСР) в зонах значительных разрушений с пожарами, радиоактивным загрязнением и химическим заражением. Вместе с этим расширяется и многообразие проектных параметров, определяющих возможности и структуру РТК, что способствует появлению дополнительных сложностей на этапе его разработки при оптимизации технического облика.

Целью статьи является представление результатов исследований, проведенных специалистами ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) и ФГБУ ВНИИПО МЧС России, по вопросам реализации рационального подхода к оптимизации технического облика на этапе разработки РТК, предназначенного для ведения АСР в зонах радиоактивного загрязнения, химического заражения и больших разрушений, сопровождающихся масштабными пожарами.

Одним из вариантов реализации возможностей по ведению АСР отмеченного характера, по мнению

специалистов ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) и ФГБУ ВНИИПО МЧС России, является создание РТК много-режимного пожаротушения, структурная схема которого представлена на рис. 1.

1. Общая характеристика предлагаемого подхода к оптимизации технического облика РТК

Предлагаемая авторами статьи методика разработки РТК, основанная на реализации критериальных подходов к поиску наилучшей альтернативы, представляемых в различных научных источниках [1–6], содержит процедуру оптимизации его технического облика, представляющего собой совокупность:

- перечня возлагаемых на него задач;
- структуры и основных проектных параметров;
- основных характеристик функциональных подсистем.

При этом игнорируется детальная структура комплекса, а учитываются только элементы, критичные для оценки соответствия поставленным целям и его эффективности.

Оптимизация технического облика РТК предусматривает формулирование альтернативных вариантов его структуры (состава основных компонентов) и выбор из них наилучшего. При оптимизации предусматривается выполнение анализа только общего поведения комплекса как единого целого и взаимодействия с внешней средой, а также оценки его интегративных характеристик — тех, которые присущи только комплексу в целом. Таким образом, структура

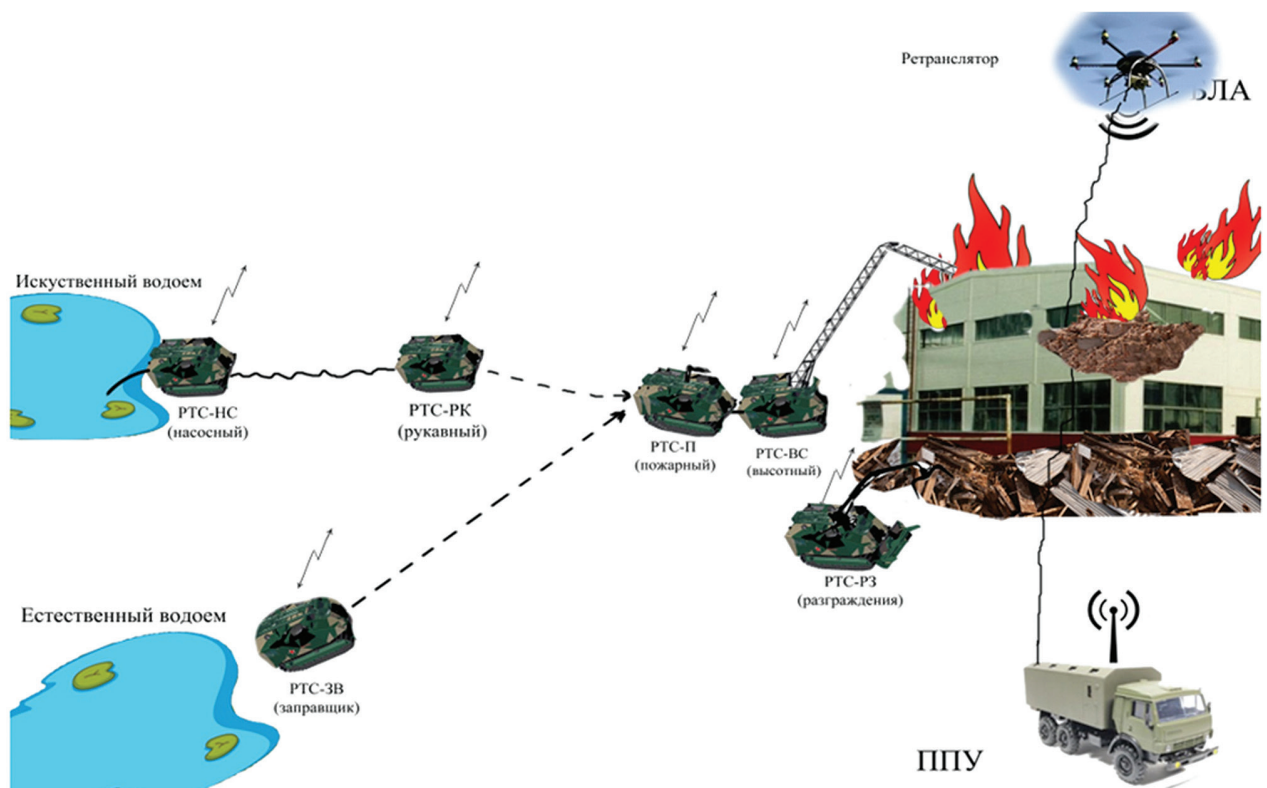


Рис. 1. Структурная схема РТК многорежимного пожаротушения

РТК формируется по интегративным характеристикам на основании сравнительного анализа его альтернативных вариантов, обеспечивающих решение возлагаемых на него задач с учетом внешней среды.

Таким образом, под «оптимизацией технического облика РТК» понимается процесс установления значимости вариантов структуры РТК, составляющих некоторое множество альтернатив, на основе сравнения их характеристик, выступающих в качестве критериев выбора.

Интегративные показатели, выступающие в качестве критериев выбора наилучшей альтернативы, обычно формируются посредством учета набора показателей эффективности, которые зачастую разделяются на:

- функциональные, к которым относятся производительность, оперативность, надежность и т.п.;
- экономические (стоимость системы, затраты на эксплуатацию и т.д.);
- технологические (трудоемкость обслуживания и т.п.);
- антропологические (экологичность, безопасность, защищенность и т.п.).

К интегративным показателям целесообразно отнести величины, характеризующие: объем выполняемых работ; время выполнения задач; материальные потери; предотвращенный ущерб; затраты ресурсов; вероятность выполнения задачи и другие результаты функционирования. В предлагаемой методике разработки РТК указанные показатели именуется тактическими, в отличие от проектных параметров, не требующих выполнения сложных вычислений, и характеристик функциональных подсистем, которые названы техническими показателями.

Для определения значений тактических показателей применяется математическое моделирование действий РТК. При стохастическом моделировании действий РТК особое место в общей системе занимает такой показатель, как вероятность выполнения задачи (пожаротушения). При определенной формулировке этот критерий может учитывать все величины, характеризующие результат действий, например, если установить предельные значения всех этих величин, при которых следует считать задачу выполненной.

Если в связи со складывающейся обстановкой возникает необходимость оптимизации технического облика РТК по нескольким тактическим показателям, получаемым математическим моделированием, то методикой предусматривается выполнение многокритериальной сравнительной оценки эффективности альтернатив.

Ввиду того, что построение математической модели действий РТК является довольно сложной задачей, не всегда имеется возможность осуществить математическое моделирование. В этом случае методикой допускается возможность выполнения оптимизации технического облика РТК с использованием значений основных характеристик функциональных подсистем.

2. Методы получения значений тактических показателей результатов аварийно-спасательных работ

Тактические показатели результатов АСР обычно получают в процессе специально проводимых исследований с учетом складывающейся обстановки посредством моделирования действий РТК. Полнота их оценки зависит от свойств используемой модели.

В настоящее время существует множество подходов к классификации моделей и моделированию функционирования технических систем. Обычно моделирование действий РТК подразделяется на:

- натурное, представляющее собой экспериментальное исследование с использованием фактических комплексов и средств (натуры);
- полунатурное — экспериментальное исследование с использованием физических объектов, отличных от фактических комплексов и средств, но применение которых позволяет получить о них полезную информацию;
- математическое — исследование математическими методами.

Естественно, на этапе обоснования тактико-технических требований к РТК можно использовать только математическое моделирование, при котором нет необходимости создавать как образец комплекса, так и специальных экспериментальных условий для каждой ситуации.

Под «математической моделью действий РТК» понимается формальное математическое описание, исследование которого математическими методами позволяет получить полезную информацию о реальном процессе функционирования этих средств.

Математические модели можно классифицировать с различных точек зрения. Проведенный анализ показал, что при построении математической модели действий РТК применительно к решению задач, исследуемых в этой статье, следует учитывать признаки, представленные на рис. 2.

В первую очередь математические модели функционирования РТК предлагается различать по двум признакам:

- уровню определенности действий;
- выделенности элементарных явлений.

По определенности действий в настоящей работе математические модели предлагается разделять на:

1) детерминистические, при использовании которых результаты однозначно определяются входной информацией (условиями, управляющими воздействиями);

2) стохастические (вероятностные), при использовании которых результаты являются случайными, характеризующимися распределением случайных величин.

Выбор вида модели, детерминистического или стохастического, для исследования полностью находится в руках исследователя и зависит от того, собирается ли он учитывать случайные факторы.

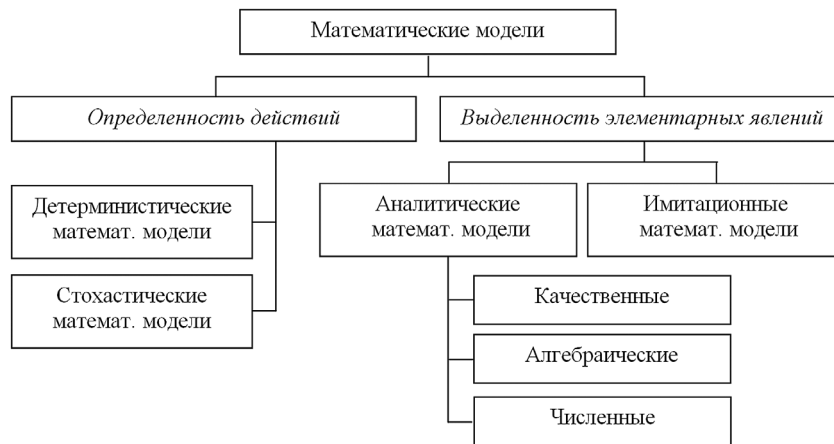


Рис. 2. Классификация математических моделей действий РТК

По выделенности элементарных явлений математические модели разделяются на аналитические и имитационные.

Любому реальному процессу функционирования наземных РТК присущи случайные флуктуации. Поэтому для оценки критериев, определяемых их тактическими возможностями, целесообразно использовать стохастические модели. Стохастические модели имеют две особенности, которые следует учитывать:

- 1) они включают алгоритмы моделирования случайных величин, подчиненных своему закону распределения в соответствии с сущностью физических параметров, которые представлены этими величинами;
- 2) результаты моделирования так же представляются случайными величинами и таким образом являются результатами одной реализации случайного процесса. Поэтому окончательный результат решения задачи получается статистической обработкой нескольких реализаций моделирования.

Следует отметить, что разработка математической модели функционирования РТК, обеспечивающей достоверный результат, представляет собой весьма сложную и трудозатратную задачу. Поэтому для получения интегральных показателей эффективности РТК, определяемых их тактическими возможностями, в идеальном случае целесообразно использовать уже разработанные модели. Однако проведенные исследования показывают, что к настоящему времени в отношении моделирования пожаротушения разработаны только отдельные математические зависимости и алгоритмы, а математические модели, которые можно было бы применить для оценки качества технического облика РТК, к сожалению, не созданы.

3. Методы многокритериальной оптимизации технического облика РТК

При научном обосновании положений, касающихся разработки моделей многокритериальной оптимизации технического облика РТК, следует учитывать типы шкал измерения данных, так как в процессе сравнения средств приходится оперировать с величинами различного характера.

В этом случае под «шкалой измерений» понимается упорядоченный числовой или символьный ряд значений, отражающий допустимые вариации значений измеряемой величины.

Каждому типу шкалы измерения данных соответствует своя логическая структура проявления свойств. Это касается сравнения данных, арифметических операций над ними, обработки их экспертных значений. В соответствии с логической структурой проявления свойств различают следующие типы шкал [7] (рис. 3):

- качественные шкалы, к которым относятся номинальные (классификационные, наименований), ранговые (порядковые, ординальные) и балльные (числовые, условные);
- количественные — интервальные и отношений (частный случай — абсолютные).

Проведенный анализ показал, что для измерения значений показателей, с учетом которых производится многокритериальная оптимизация технического облика РТК, используются все из перечисленных шкал.

Как отмечалось выше, при оптимизации технического облика РТК наиболее информативными являются показатели, определяющие его тактические возможности (в частности — вероятность выполнения АСР). Если соответствующий аппарат их оценки отсутствует, то оптимизацию можно оценивать по его техническим характеристикам и установленным к ним требованиям.

Как известно [8–15], методы оценки и выбора альтернатив состоят из критериальных методов и методов экспертной оценки. Критериальные методы представляют собой способы выражения различий между альтернативами с помощью формализованных объективных признаков. Методы экспертной оценки применяются при количественной оценке качества альтернатив в условиях слабоформализуемой проблемной ситуации. Проведенные исследования показали, что выбор рациональных типов или вариантов исполнения РТК базируется на применении методов обоих упомянутых видов.

На основании вышеизложенного основным содержанием оптимизации технического облика РТК является выбор из обозначенного множества вариантов структуры комплекса, в некотором смысле наилучшего,



Рис. 3. Классифицирование типов шкал измерения данных

для выполнения поставленной задачи, осуществляемый путем реализации одного из методов многокритериальной оценки. Кроме того, реализация этого метода сопровождается применением методов экспертной оценки и обработки экспертной информации. В фундаментальных научных разработках [16, 17] в области многокритериальной оценки дается анализ: метода попарных сравнений альтернатив; метода выбора альтернативы по значениям функций полезности; метода взвешенных сумм; метода анализа иерархий.

Анализ этих методов показал, что наиболее приемлемым из них к решению вопроса оптимизации технического облика РТК является метод анализа иерархий с аддитивной моделью попарных сравнений.

Построение ранжировки (u_1, \dots, u_n) вариантов РТК с применением метода анализа иерархий с аддитивной моделью попарных сравнений заключается в решении матричного математического выражения:

$$(u_1, \dots, u_n) = (w_1, \dots, w_m) \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где:

(w_1, \dots, w_m) — вектор-строка нормированных весов критериев (m — количество критериев), определяемая методом попарных сравнений значимости критериев в процессе экспертной оценки;

(x_{j1}, \dots, x_{jn}) — строки матрицы решений, являющиеся ранжировками альтернатив (n — количество типов) по каждому j -ому критерию ($j = 1, \dots, m$), определяемые методом попарных сравнений фактических значений критериев.

При применении метода попарных сравнений ранжировка альтернатив $(w_1, \dots, w_n), i = 1, \dots, n$ строится по величинам их весов, рассчитываемым с использованием квадратной матрицы попарных сравнений Y (размерностью $n \times n$, где n — количество альтернатив). Матрица Y имеет сходство со спортивной турнирной таблицей, в которой в зависимости от применяемой модели попарных сравнений (аддитивной или мультипликативной) в клетки главной диагонали $(y_{11}, y_{22}, \dots, y_{nn})$ ставятся 0,5 или 1:

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{nn} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где значения элементов матрицы (y_{ij}) — результаты сравнения двух альтернатив a_i и a_j — определяются в соответствии со следующими правилами для аддитивной модели:

$y_{ij} = 1$, если $a_i \succ a_j$ — при парном сравнении принято, что альтернатива a_i важнее альтернативы a_j ;

$y_{ij} = 0$, если $a_i \prec a_j$ — альтернатива a_j важнее альтернативы a_i ;

$y_{ij} = 0,5$, если $a_i \approx a_j$ — альтернативы a_i и a_j по важности примерно одинаковы;

$y_{ii} = 0,5$ (при $j = i$);

$y_{ij} = 1 - y_{ji}$.

Веса каждой из альтернатив определяются по формуле:

$$w_i = \sum_{i=1}^n y_{i1}. \quad (3)$$

Нормированные веса определяются, как:

$$w_i = \frac{w_i'}{\sum_{k=1}^n w_k'} \quad (4)$$

Выполнение нормировки весов является удобным приемом для согласования оценки альтернатив с различными типами шкал измерения.

Модель попарных сравнений является наиболее простой формальной моделью принятия решения, в которой правило парных сравнений альтернатив не регламентировано. При ее использовании это правило необходимо устанавливать, что в случае выполнения ранжирования многокритериальных альтернатив порождает дополнительную неопределенность. Эта модель достаточно успешно может применяться при экспертных оценках и однокритериальном ранжировании альтернатив. Поэтому в настоящем исследовании такая модель используется в рамках метода анализа иерархий при проведении экспертной оценки весов критериев и альтернатив.

Использование метода анализа иерархий с аддитивной моделью попарных сравнений снижает неопределенность в построении ранжировок. При применении аддитивной модели попарных сравнений некоторую сложность составит только установление условия эквивалентности для значений критериев, измеряемых в шкалах интервалов и отношений. Применение метода попарных сравнений альтернатив по каждому отдельному критерию позволяет достаточно просто построить ранжировку при любой шкале измерения (за исключением номинальной) величин критериев.

Литература

- Северов Н.В. Развитие, технология и эффективность робототехники в чрезвычайных ситуациях: Монография. Ч. 1. М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. 311 с.
- Формирование технического облика системы // URL: <https://studfile.net/preview/9019092/page:116/> (дата обращения: 06.12.2023).
- Осипов Ю.Н., Ершов В.И., Коренкова О.А. Методический аппарат оценки эффективности противопожарных и аварийно-спасательных комплексов // Пожарная безопасность. 2016. № 4. С. 114–118. EDN: XEGOVL.
- Осипов Ю.Н., Ершов В.И., Панфилова Е.В. Обоснование предлагаемых решений по организации испытаний опытных образцов робототехнических комплексов в МЧС России // Пожарная безопасность. 2018. № 4. С. 66–71.
- Октябрьский П.Я. Статистика эффективности промышленного производства. М.: Статистика, 1985. 223 с.
- Песьякова Т.Н. Классификация показателей эффективности промышленных комплексов // Молодой ученый. 2012. № 1. Т. 1. С. 139–141.
- Анфилов В.С. и др. Системный анализ в управлении: Учеб. пособие. / В.С. Анфилов, А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин; под ред. А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с: ил.
- Северов Н.В., Байков А.В., Павлов Е.В. Унифицированная система четырехрежимного управления робототехникой в ЧС // Транспорт, наука, техника, управление. 2013. № 9. С. 37–39.
- Павлов Е.В. Условия эффективного пожаротушения и возможности группировки робототехнических комплексов по его выполнению при крупномасштабных авариях // Пожарная безопасность. 2020. № 4. С. 130–136.
- Павлов Е.В. Разработка методики обоснования тактико-технических требований к робототехническому комплексу многорежимного пожаротушения // Технологии гражданской безопасности. 2020. Т. 17. № 2 (64). С. 61–67.
- Раздел 1. Разработка методики выбора рационального типа, варианта компоновки и оснащения ВРК с БЛА для выполнения типовых задач МЧС // Разработка тактико-технических требований к беспилотным летательным аппаратам, принимаемым на вооружение в МЧС России, шифр «Беспилотник»: Промежуточный отчет о НИР / М.В. Савин, А.Ю. Картевичев, Ю.Н. Осипов, В.И. Ершов, М.А. Шентяпина. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО, 2014. 310 с.
- Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
- Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки. М.: Наука, 1973. 161 с.
- Орлов А.И. Эконометрика: Учебн. для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Изд-во «Экзамен», 2004. 576 с.
- Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных Странах: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Логос, 2002. 392 с.
- Полтавский А.В. Математическое моделирование в формировании облика сложной системы // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 175. С. 130–141.
- Павлов Е.В., Осипов Ю.Н., Ершов В.И. Расчет потребного количества робототехнических комплексов для оснащения специальных пожарных команд // Пожарная безопасность. 2017. № 1. С. 45–48. EDN: YHFIRN.
- Орлов А.И. Экспертные оценки: Учеб. пособ. М., 2002. 31 с.
- Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: Учебник. В 3 ч. Ч. 2: Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 486 с.
- Данелян Т.Я. Формальные методы экспертных оценок // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2015. № 1. С. 183–187.

Сведения об авторах

Павлов Евгений Владимирович: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, с.н.с. науч.-исслед. центра; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), соискатель ученой степени кандидата технических наук.

Балашиха, Москва, Россия.

SPIN-код: 7519-0588.

Баранник Александр Юрьевич: к. т. н., с. н. с., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), в. н. с. науч.-исслед. центра.

Москва, Россия.

SPIN-код: 9462-5588.

Information about authors

Pavlov Evgeniy V.: All-Russian Research Institute Fire Protection, Senior Researcher, Research Center; VNI GOChS (FC), Candidate for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Balashikha, Moscow, Russia.

SPIN-scientific: 7519-0588.

Barannik Alexander Yu.: PhD (Technical Sc.), Senior Researcher, VNI GOChS (FC), Leading Researcher, Research Center.

Moscow, Russia.

SPIN-scientific: 9462-5588.