

УДК 614.847

## ОЦЕНКА ОБРАЗЦОВ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

**Логинов Валерий Викторович, Вишняков Александр Валерьевич,  
Зубарев Игорь Александрович**

Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы применения метода анализа иерархий для сравнения комплекса характеристик разрабатываемого образца робототехники пожаротушения с характеристиками штатных образцов пожарной техники без средств роботизации, находящейся на вооружении пожарных частей (далее – штатная техника), и экспериментальных (несерийных) образцов робототехники, находящихся в опытной эксплуатации. На основе результатов его применения, сделан вывод о целесообразности его использования при оценке образцов робототехнических комплексов.

**Ключевые слова:** метод анализа иерархий, робототехнический комплекс, пожаротушение, шкала отношений, эффективность применения, качество работы эксперта

## EVALUATION OF SAMPLES OF ROBOTIC FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS BY THE ANALYSIS OF HIERARCHIES

**Valery V. Loginov, Alexander V. Vishnyakov, Igor A. Zubarev**

Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

### ABSTRACT

The article deals with the application of the hierarchy analysis method to compare the complex of characteristics of the robotics sample being developed with the characteristics of pants-type models of equipment without robotic means, which is in service with fire departments (hereinafter, standard equipment) and experimental (non-serial) samples of robotics that are in trial operation. Based on the results of its application, comparing samples, it was concluded that it is expedient to use it when evaluating samples of robotic systems.

**Keywords:** firefighting, hierarchy analysis method, robotic complex, firefighting, relationship scale, application efficiency, expert work quality

### Введение

На этапе проектирования робототехнического комплекса (РТК) в него закладываются определенные технические

характеристики, реализация которых в промышленном образце, пригодном для

эксплуатации в реальных условиях, позволяет ему выполнять задачи с той или иной степенью эффективности.

В техническом задании на разработку РТК пожаротушения на этапе проектирования закладываются характеристики определяющие его возможности по борьбе с огнем. Эти характеристики взаимосвязаны, и с технической точки зрения при проектировании можно отдавать приоритет определенной, но увязанной с остальными характеристике.

Чтобы говорить о разработке РТК для выполнения задач пожаротушения с определенными характеристиками, требуется сравнить комплекс этих характеристик с аналогичными характеристиками штатной пожарной техники, а также для ответа на вопрос: есть ли смысл серийного промышленного производства РТК, если задача может быть выполнена штатным образцом? Также важной представляется задача сравнения характеристик, и, следовательно, возможностей разработанных и прошедших опытную эксплуатацию РТК с характеристиками и возможностями, закладываемыми в разрабатываемые образцы.

Для решения задач выбора приоритетных характеристик, определяющих основные характеристики образца, а также характеристик, определяющих другие функциональные свойства (взаимосвязанных с приоритетными и часто взаимоисключающих друг друга), требуется методика объективного сравнения характеристик для их выбора и последующей реализации в реальном образце, пригодном к опытной эксплуатации.

Учитывая очень ограниченный, по сравнению с использованием штатной техники, опыт эксплуатации экспериментальных РТК и естественное отсутствие практики применения разрабатываемых образцов, их сравнение возможно только

на основе экспертных методов, при которых на основе согласованного анализа и его последующей обработки осуществляется дифференцированный выбор определяющих характеристик и параметров, закладываемых в техническое задание на разработку РТК.

Решение такой задачи требует системного подхода, четкого представления о цели выбора и установления связи между отдельными характеристиками. Трудность решения будет также заключаться в объединении критериев оценки и условий применения в общую систему зависимостей. С математической точки зрения методический инструментарий этого решения должен быть достаточно простым, но с однозначным ответом о выборе приоритетных характеристик, позволяющим сделать заключение об эффективности проводимой работы по проектированию новых образцов РТК.

#### **Применение метода анализа иерархий для оценки образцов и его результаты**

Одним из вариантов решения данной задачи может стать применение метода анализа иерархий (МАИ) [1] для сравнения различных образцов РТК, в том числе и проектируемых по прогнозированию эффективности применения в сравнении со штатными образцами.

Сразу нужно сказать о достаточно критическом подходе некоторых авторов [2, 3] к МАИ и определенной неоднозначности получаемых результатов. Действительно, в основе критериев оценки МАИ лежит иерархия критериев, формируемая, хотя и согласованная, но все же субъективным мнением экспертов, и подчиненные иерархии критериев альтернативы тоже будут иметь субъективность, зависящую от экспертного мнения. При этом применение МАИ как метода сравнения альтернатив под сомнение не ставится и активно защищается многими авторами [4].

Для объективного сравнения эффективности применения РТК и штатной техники необходим анализ отношения событий (эпизодов) успешного применения РТК в определенных условиях к общему применению техники для выполнения задач пожаротушения, применительно к этим условиям (или максимально близких к ним). Учитывая, что практика является критерием истины, такие эпизоды должны быть достаточно многочисленными. К сожалению, приходится констатировать, что современный уровень развития РТК [5] не позволяет провести такое сравнение и что метод МАИ для оценки эффективности применения различных образцов РТК на этапе проектирования и опытной эксплуатации является приемлемым для определения основных приоритетных характеристик, закладываемых в конструкцию.

Методология применения МАИ хорошо описана в литературе и в основном касается процессов принятия решений по выбору альтернатив, оцениваемых по шкале предпочтений, согласно которой группа экспертов субъективно оценивает тот или иной вариант выбора. Метод нашел широкое применение при обосновании принятия решений не только в экономической и управленческой области, но и в вопросах обеспечения безопасности и управления спасательными подразделениями [6, 7]. Есть примеры использования метода и при оценке технических систем [8].

В Уральском институте ГПС МЧС России на кафедре пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств было проведено исследование оценки перспективного РТК по выполнению типовых задач пожаротушения в сравнении со штатным и имеющимся опытным образцом РТК. Исследование было основано на применении МАИ. Целью исследования была в том

числе попытка апробации МАИ для сравнения характеристик образцов.

В проведенном исследовании целью ставилось определение комплекса наиболее сбалансированных характеристик образца РТК для выполнения типичных задач пожаротушения. Под термином «типичные» подразумевались задачи, которые способны быть выполнены линейными подразделениями пожарной охраны со штатной техникой. Исследование также должно было дать ответ: какими характеристиками должен обладать РТК, предназначенный для линейных частей пожарной охраны?

Образцы штатной техники и РТК оценивались экспертами по критериям:

- Стоимости. В процессе согласования мнения экспертов, принято допущение оценки по этому параметру не опытных, а серийных образцов, предлагаемых к производству (критерий 1);
- быстроты развертывания (критерий 2);
- количество личного состава для развертывания и работы (критерий 3);
- надежности работы и выполнения задачи (критерий 4);
- время выполнения задачи (критерий 5);
- безопасность работы расчета (критерий 6).

Альтернативами достижения целей были определены штатный образец пожарной техники (образец 1), существующий образец РТК типа «Ель-10», с определенными условностями, ввиду недостаточности информации о нем (образец 2), перспективный РТК, характеристики которого принимались априори лучшими, чем двух первых образцов, но подвергались сглаживанию для получения согласованного мнения экспертов (образец 3).

Матрица приоритетов (табл. 1) была сформирована попарным сравнением

оценки критериев, согласно фундаментальной шкале экспертных предпочтений [1] (табл. 2) соотношения факторов, являющейся стандартной при использовании МАИ.

При формировании матрицы приоритетов учитывалось, что  $w_{ij} \times w_{ji} = 1$ , что означает, что матрица является обратно-симметричной.

При вычислении локальных векторов приоритетов проводилось сравнение веса критериев  $w_{ij}$  элемента оценки на относительный вес общего множества элементов.

Компоненты собственного вектора матрицы для каждой строки вычислялись по формуле:

$$w_{i1} \times w_{i2} \times \dots \times w_{iN} = a'_i \quad (1)$$

**Таблица 1.** Матрица приоритетов

**Table 1.** Priority Matrix

Критерий Criterion	1	2	3	4	5	6	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	3,00	2,00	5,00	3,00	9,00	0,4031142
2	0,33	1,00	0,50	5,00	2,00	1,00	0,1437657
3	0,50	2,00	1,00	5,00	3,00	2,00	0,2327381
4	0,20	0,20	0,20	1,00	3,00	1,00	0,0709114
5	0,33	0,50	0,33	0,33	1,00	1,00	0,0679123
6	0,11	1,00	0,50	1,00	1,00	1,00	0,0815584
Итого: Total:	2,48	7,70	4,53	17,33	13,00	15,00	1

Каждому компоненту  $a'_i$  вычислялось соответствующее геометрическое среднее ее элементов, рассчитанное по формуле (2):

$$a_i = \sqrt[n]{a'_i} \quad (2)$$

Значение локального вектора приоритетов для каждого из критериев было рассчитано по формуле (3):

$$X_i = a_i / \sum_{j=1}^n a_j, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

Проверка данной таблицы на согласованность, проводилась вычислением индекса согласованности (ИС) по формуле (4):

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{max}$  максимальное или главное собственное значение матрицы (5):

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n w_{1j} X_1 + \sum_{j=1}^n w_{2j} X_2 + \dots + \sum_{j=1}^n w_{nj} X_n \quad (5)$$

В нашем случае результат ИС равен 0,099, что позволяет, используя данные таблицы случайной согласованности (СС) (табл. 3) для размерности матрицы 6, составляющей 1,24, найти отношение согласованности (ОС) мнений экспертов.

Таблица 2. Шкала экспертных предпочтений

Table 2. Scale of expert preferences

$w_{ij}$	Оценка по шкале важности Importance rating
1	Равная значительность элементов $i$ -го и $j$ -го элемента Equal significance of the elements of the $i$ -th and $j$ -th element
3	Незначительная важность элемента $i$ перед $j$ Minor importance of element $i$ before $j$
5	Значительная важность элемента $i$ перед $j$ Significant importance of element $i$ before $j$
7	Явная значимость элемента $i$ перед $j$ Explicit importance of element $i$ before $j$
9	Абсолютная значимость элемента $i$ перед $j$ Absolute importance of element $i$ before $j$
2, 4, 6, 8	Компромиссы между немного отличающимися от основных чисел суждениями Trade-offs between judgments slightly different from the main numbers

Таблица 3. Величина случайной согласованности

Table 3. Random consistency table

Размер матрицы Matrix size	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Величина СС Value RC	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

ОС вычисляется по формуле (6):

$$ОС = \frac{ИС}{СС} \quad (6)$$

В нашем случае ОС составляет 0,08, что меньше 0,1 и означает, что мнение экспертов согласовано.

При исследовании по методу МАИ под согласованностью матрицы понимают, что «при наличии основного массива необработанных данных все другие данные логически могут быть получены из них» [1]. Это положение явно противоречит принципу экспертного мнения, где оценки даже одного эксперта математически могут быть не согласованы по параметрам матрицы. В принципе, трудно, а порой даже невозможно получить математически согласованное мнение, и это будет тем труднее, чем больше критериев оценки

и количество экспертов. В МАИ ОС четко обозначается показателем 0,1, но в некоторых работах встречаются рассуждения о приемлемости показателя 0,2 [7].

Для оценки эффективности или выбора основной характеристики РТК, определяющей его работоспособность, будет необходимо согласовывать экспертные предпочтения для получения приемлемого ОС, что отрицательно скажется на объективности оценки [9].

В нашем случае локальный вектор приоритетов лучшим был у критерия 1 «Стоимость» = 0,403, следующий показатель по величине – критерий 3 «Количество личного состава для развертывания и работы», он имеет значение 0,233. Оценки этих критериев математически

больше локальных векторов приоритетов критериев 4, 5, 6. Между тем именно они определяют смысл внедрения РТК. Это противоречие легко объясняется размером широты взгляда на проблему (крайне субъективного), с точки зрения массового применения РТК важны критерии 1 и 3, при взгляде на результаты опытной эксплуатации критерии 4, 5, 6. Очень важен учет конкретных условий, в которых оцениваются образцы. Для всех этих случаев необходимы свои матрицы приоритетов с разными экспертными оценками. Согласование экспертных оценок достаточно важно

в МАИ, существуют определенные методики, выявляющие критерии с наибольшей рассогласованностью как предмета исследования [10].

На следующем этапе исследования проводилось сравнение локальных векторов приоритетов  $Y_{nk}$  предлагаемых альтернатив по каждому критерию с вычислением ОС матрицы оценки критериев. Результаты вычислений, по представленной ранее методике, указаны в таблицах 4–9. Значение ОС в каждом случае не превышало 0,1

**Таблица 4.** Выявление приоритетов по критерию «Стоимость»  
**Table 4.** Identification of priorities according to the criterion "Cost"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,33	0,14	0,087
2	3,00	1,00	0,33	0,243
3	7,00	3,00	1,00	0,670
Итого: Total:	11,00	4,33	1,48	1,000

Значение ОС равно 0,006.

**Таблица 5.** Выявление приоритетов по критерию «Быстрота развертывания»  
**Table 5.** Identification of priorities according to the criterion "Quickness of deployment"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,14	1,00	0,119
2	7,00	1,00	5,00	0,747
3	1,00	0,20	1,00	0,134
Итого: Total:	9,00	1,34	7,00	1,000

Значение ОС равно 0,01.

**Таблица 6.** Выявление приоритетов по критерию «Количество личного состава»  
**Table 6.** Identification of priorities according to the criterion "Number of personnel"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,33	0,20	0,114
2	3,00	1,00	1,00	0,405
3	5,00	1,00	1,00	0,481
Итого: Total:	9,00	2,33	2,20	1,000

Значение ОС равно 0,025.

**Таблица 7.** Выявление приоритетов по критерию «Надежность»  
**Table 7.** Identification of priorities according to the criterion "Reliability"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,20	0,3(3)	0,114
2	5,00	1,00	1,00	0,480
3	3,00	1,00	1,00	0,406
Итого: Total:	9,00	2,20	2,33	1,000

Значение ОС равно 0,025.

**Таблица 8.** Выявление приоритетов по критерию «Время выполнения задачи»  
**Table 8.** Identification of priorities according to the criterion "Time to complete the task"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,33	0,33	0,140
2	3,00	1,00	0,50	0,332
3	3,00	2,00	1,00	0,528
Итого: Total:	7,00	3,33	1,83	1,000

Значение ОС равно 0,046.

**Таблица 9.** Выявление приоритетов по критерию «Безопасность»  
**Table 9.** Identification of priorities according to the criterion "Safety"

Образец Sample	1	2	3	Локальный вектор приоритетов Local priority vector
1	1,00	0,25	0,25	0,109
2	4,00	1,00	2,00	0,547
3	4,00	0,5	1,00	0,344
Итого: Total:	9,00	1,75	3,25	1,000

Значение ОС равно 0,046.

Расчет приоритетов для всей иерархии в совокупности, согласно МАИ, осуществлялся на основе синтеза приоритетов. Так называемые глобальные приоритеты были рассчитаны по формуле (7):

$$Z_{nk} = \sum_{i=1}^n X_n Y_{nk} \quad (7)$$

Расчет глобальных приоритетов приведен в табл. 10.



**Таблица 10.** Результаты расчета глобальных приоритетов альтернатив  
**Table 10.** Results of calculating the global priorities of alternatives

Критерий Criterion	Локальный вектор приоритетов критериев $X_i$ Local vector of criteria priorities $X_i$	Образец Sample		
		1	2	3
1	0,403	0,087	0,243	0,670
2	0,144	0,119	0,747	0,134
3	0,232	0,114	0,405	0,481
4	0,070	0,114	0,480	0,406
5	0,067	0,140	0,332	0,528
6	0,081	0,109	0,547	0,344
Глобальный приоритет Global Priority		0,106	0,401	0,493

### Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о приоритете характеристик образца 3, то есть перспективного РТК с характеристиками, желаемо превосходящими другие образцы. Метод МАИ дает однозначный и обоснованный ответ преимущества альтернативы с большим глобальным приоритетом над остальными по определенным критериям. Собственно, поэтому метод широко распространен, и, как было сказано выше, имеет широкое применение в экономической и управленческих отраслях.

Недостаток метода, на который мы обращали внимание выше, в том, что он оценивает выбранные критерии не по объективным показателям, а по субъективному мнению экспертов.

Критерии, которыми они оперируют, безусловно, являются важными, но весь спектр применения РТК в практической деятельности отразить не могут. Учет всех этих факторов ведет к значительному усложнению расчетов и трудностям, а порой и невозможности получить требуемое ОС, что делает достижение цели исследования по МАИ невозможным.

В качестве окончательного вывода можно отметить, что для комплексной оценки характеристик проектируемого РТК необходимы другие методы математического анализа, основанные на статистике применения образцов РТК для решения практических задач с учетом условий применения. Тем не менее МАИ может быть полезен в тех случаях, когда для оценки достаточно мнения экспертов, оно носит очевидно объективный характер и согласовано.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / пер. с англ., науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. М. : ЛКИ, 2008. 360 с.
2. Подиновский В. В., Подиновская О. В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8–13.
3. Коробов В. Б., Тутьгин А. Г. Проблемы использования метода анализа иерархий и пути их решения // Экономика и управление. 2016. № 8 (130). С. 60–65.
4. Митихин В. Г. Об одном контрпримере для метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2012. № 3. С. 77–79.



5. Картеничев А. Ю., Литвин П. М., Панфилова Е. В. Перспективный робототехнический комплекс для тушения пожаров в экстремальных условиях // Актуальные вопросы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций : материалы Всероссийской науч.-практ. конф. Железнодорожск : ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. С. 552–557.
6. Солод С. А. Метод анализа иерархий при выборе тактики управления пожарно-спасательными частями // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. 2019. № 4 (40). С. 21–25.
7. Ласута Г. Ф., Карпиленя Н. В., Булва А. Д. Методика ранжирования организаций в интересах гражданской обороны с использованием метода анализа иерархий // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2019. Т. 3. № 3. С. 301–313.
8. Манайчева, В. А., Хусниязов, М. Х. Применение метода анализа иерархий для определения центра технологического блока установок нефтепереработки // Нефтегазовое дело : сетевое издание. 2006. № 2. URL: <https://ogbus.ru> (дата обращения: 09.06.2023).
9. Умников Е. В., Атакищев О. И., Грачев В. А. Применение метода анализа иерархий Саати для оценки эффективности системы защиты информации виртуального полигона // Известия института инженерной физики. 2022. № 1 (63). С. 99–103.
10. О повышении индекса согласованности матрицы парных сравнений в системах поддержки принятия решений / А. Е. Куренных и др. // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 196. 16 с.

#### REFERENCES

1. Saaty, T. Decision making under dependencies and feedbacks: Analytical networks / T. Saaty; per. from English; scientific editor: A.V. Andreichikov, O.N. Andreichikov. M.: LKI, 2008; 360.
2. Podinovsky V. V., Podinovskaya O. V. On the incorrectness of the hierarchy analysis method. Problemy upravleniya. 2011; 1: 8–13. (rus).
3. Korobov V.B., Tutygin A.G. Problems of using the method of analysis of hierarchies and ways to solve them. Economics and Management. 2016; 8 (130): 60–65. (rus).
4. Mitikhin V. G. On a counterexample for the method of analysis of hierarchies. Control Problems. 2012; 3: 77–79. (rus).
5. Kartenichev A.Yu., Litvin P.M., Panfilova E.V. A promising robotic complex for extinguishing fires in extreme conditions // Topical issues of fire safety and emergency protection. Collection of articles based on materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. 2019. (rus).
6. Malt S.A. Method of analysis of hierarchies in the choice of management tactics for fire and rescue units. Emergency situations: industrial and environmental safety. 2019; 4 (40): 21–25.
7. Lasuta G.F., Karpilenya N.V., Bulva A.D. Methodology for ranking organizations in the interests of civil defense using the method of analysis of hierarchies. Bulletin of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. 2019; 3. (rus).
8. Manaycheva V.A., Khusniyarov M.Kh. Application of the method of analysis of hierarchies to determine the center of the technological unit of oil refining units. Oil and Gas Business. 2006. <http://www.ogbas.ru>. (rus).
9. Umnikov E.V., Atakischev O.I., Grachev V.A. Application of the Saaty Hierarchy Analysis Method to Evaluate the Effectiveness of the Virtual Polygon Information Security System. Izvestiya of the Institute of Engineering Physics. 2022; 1 (63). (rus).
10. Kurennykh A.E. On increasing the index of consistency of the matrix of paired comparisons in decision support systems. Preprints of the IAM im. M.V. Keldysh. 2018; 196: 16.

#### Информация об авторах

**Логинов Валерий Викторович**, кандидат технических наук, доцент, доцент, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; ПИНЦ ID 1103066; e-mail: [bazalt@mail.ru](mailto:bazalt@mail.ru)

#### Information about the authors

**Valery V. Loginov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, associate Professor, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC 1103066; e-mail: [bazalt@mail.ru](mailto:bazalt@mail.ru)

**Вишняков Александр Валерьевич**, кандидат биологических наук, доцент, профессор, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID 848624;  
e-mail: [alexvish63@mail.ru](mailto:alexvish63@mail.ru)

**Зубарев Игорь Александрович**, кандидат педагогических наук, доцент, начальник УНК, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID 836075;  
e-mail: [zubarev@mail.ru](mailto:zubarev@mail.ru)

**Alexander V. Vishnyakov**, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Professor, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC 848624;  
e-mail: [alexvish63@mail.ru](mailto:alexvish63@mail.ru)

**Igor A. Zubarev**, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the UNC, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062 Russian Federation; ID RISC 836075;  
e-mail: [zubarev@mail.ru](mailto:zubarev@mail.ru)