

МЕТОДИЧЕСКИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ВЫБОРА ВОЗДУШНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ В ИНТЕРЕСАХ МЧС РОССИИ

А.И. Преснов, кандидат технических наук, доцент;

А.В. Данилевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.

М.В. Савин.

ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны», Москва

Проведен анализ различных методов решения многокритериальных оптимизационных задач. Установлено, что наиболее предпочтительным для математического обеспечения методики выбора рационального варианта компоновки и оснащения воздушных робототехнических комплексов с беспилотными воздушными судами с использованием ЭВМ является метод анализа иерархий. Формировать объективную информацию о свойствах рационального варианта для той или иной ситуации, использование которой позволит скорректировать величины весов критериев и правила формирования функции полезности, сводя к минимуму субъективный фактор целесообразно на основе методики.

Ключевые слова: воздушные робототехнические комплексы, беспилотные воздушные суда, математический аппарат, многокритериальный выбор, аддитивная и мультипликативная модели, метод анализа иерархий

METHODOLOGICAL AND MATHEMATICAL APPARATUS OF CHOICE IS AERIAL ROBOTIC SYSTEMS WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES TO SOLVE TYPICAL TASKS IN THE INTERESTS OF EMERCOM OF RUSSIA

A.I. Presnov; A.V. Danilevich.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.

M.V. Savin. Federal State Institution «Russian order» Badge of Honor «Research Institute for Fire Protection», Moscow

The analysis of different methods for solving multiobjective optimization problems. It was found that the most preferred method of the software choice of rational variants of layout and equipment of aircraft robotic systems with unmanned aircraft with the use of electronic computing machine is a hierarchy analysis method. Forming an objective information about the properties of rational options for any given situation, the use of which will allow to adjust the value of the weights of criteria and rules for the utility function, minimizing the subjective factor advisable based on the methodology.

Keywords: aerial robotic systems, unmanned aerial vehicles, mathematical apparatus, multi-criteria selection, additive and multiplicative model, analytic hierarchy process

В настоящее время наблюдается рост заинтересованности в применении воздушных робототехнических комплексов (ВРК) с беспилотными воздушными судами (БВС) различными ведомствами, в том числе и МЧС России. Осуществляя закупку комплексов и подготовку специалистов для их эксплуатации, соответствующие структуры сталкиваются

с проблемой отсутствия методик обоснованного выбора их типов, рациональных для применения в интересах выполнения задач, стоящих перед МЧС России [1].

Частные методы решения многокритериальных оптимизационных задач не универсальны, они предназначены для решения специфических оптимизационных задач и для выбора рационального типа ВРК с БВС могут применяться с ограничениями.

Анализ процесса принятия решения показывает, что в получении наилучшего варианта важную роль играет использование математических методов.

При разработке методического и математического аппарата выбора ВРК с БВС необходимо обратиться к следующим вопросам:

- процедуре выделения доминирующих, доминируемых альтернатив и множества Эджворта-Парето применительно к множеству ВРК с БВС;
- математическому аппарату выбора ВРК с БВС из множества Эджворта-Парето;
- рациональной схеме процесса выбора ВРК с БВС.

Основной задачей многокритериального выбора ВРК с БВС для решения задачи в интересах МЧС России является выявление предпочтений лица, принимающего решение на множестве альтернативных вариантов. Эта процедура может состоять в определении доминирующих, доминируемых и множества недоминируемых альтернатив – множества Парето [2].

В общем случае постановка задачи многокритериального выбора, наилучшего для выполнения поставленной задачи комплекса, имеет следующий вид.

Задано множество ВРК с БВС $A=\{a_i\}$, $i=1, \dots, n$ и множество критериев $K=\{k_j\}$, $j=1, \dots, m$ для оценки полезности вариантов выбора. Каждому комплексу выставляются оценки по всему множеству критериев. Требуется ранжировать ВРК по их полезности для решения стоящей задачи.

Один вариант выбора ВРК с БВС является доминирующим по отношению к другому, доминируемому варианту, если по всем критериям оценки первого варианта не хуже, чем второго, а хотя бы по одному критерию оценка первого варианта лучше.

Если каждый из вариантов выбора ВРК с БВС по какому-то из критериев превосходит любой другой, то такие варианты на основе непосредственных критериальных оценок являются несравнимыми и принадлежат множеству Эджворта-Парето.

Если решение должно быть, то сравнение альтернатив, принадлежащих множеству Эджворта-Парето, возможно на основе дополнительной информации.

При выборе наилучшего ВРК с БВС для выполнения задач в интересах МЧС России такое их сравнение обычно является основным. Множество Эджворта-Парето включает в себя наиболее сложные для сравнения варианты. Поэтому этап выделения множества Эджворта-Парето из всего множества заданных вариантов выбора занимает важное место.

Один из возможных способов решения задачи выбора ВРК состоит в попарном сравнении вариантов и исключении доминируемых. Задача выделения множества Эджворта-Парето является предварительной, за которой следует наиболее существенный этап выбора ВРК с БВС.

Анализ сущности выбора ВРК с БВС и существующих математических методов многокритериального выбора альтернатив показывает, что процесс выбора ВРК для выполнения задач в интересах МЧС России из множества, представляющего собой множество Эджворта-Парето, может быть эффективно построен на основе реализации следующих распространенных математических методов:

- выбор альтернативы по значениям функций полезности;
- метод попарных сравнений альтернатив (аддитивная и мультипликативная модели);
- методы комплексных формальных моделей выбора альтернативы:
 - а) метод взвешенных сумм;
 - б) метод анализа иерархий.

Выбор альтернативы по значениям функций полезности

Общий принцип выбора – наилучшим объявляется тот ВРК с БВС, которому соответствует элемент u_i вектора установленной функции полезности $\bar{U}=(u_1, \dots, u_n)$ с максимальным значением.

Вектор функции полезности получается следующим образом.

Сначала формируются множества принимаемых к рассмотрению ВРК с БВС $A=\{a_i\}$, $i=1, \dots, n$ и критериев $K=\{k_j\}$, $j=1, \dots, m$. Каждому комплексу a_i лицо, принимающее решение, или привлеченные к принятию решения эксперты по балльной шкале измерения выставляют оценки x_{ji} по всему множеству критериев K . Результаты вынесения оценок представляются как матрица решений вида:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix},$$

где строка соответствует j критерию, $j=1, \dots, m$; столбец – i ВРК с БВС, $i=1, \dots, n$.

Таким образом, каждый столбец матрицы X представляет собой вектор оценок

$$\bar{x}_i = \begin{pmatrix} x_{1i} \\ \vdots \\ x_{mi} \end{pmatrix} \text{ } i \text{ комплекса.}$$

Затем устанавливается правило, в соответствии с которым матрице решений X (размерность $m \times n$) ставится в соответствие вектор функции полезности $\bar{U} = f(X)$, размерностью n . Здесь $u_i = f_i(\bar{x}_i)$. Каждому элементу вектора \bar{U} соответствует показатель качества конкретной альтернативы (значение u_i функции полезности альтернативы a_i).

Для каждого вектора оценок \bar{x}_i в соответствии с принятым правилом вычисляется значение функции полезности u_i . Из значений функций полезности всех альтернатив составляется вектор функции полезности $\bar{U} = (u_1, \dots, u_n)$.

Данный метод применяется в том случае, когда предварительно установлено некоторое специальное правило, в соответствии с которым должны рассчитываться значения функции полезности.

Метод попарных сравнений (аддитивная и мультипликативная модели)

Модель попарных сравнений является наиболее простой формальной моделью принятия решения, когда порядок расчета значений функции полезности не регламентирован. Однако устанавливается правило парных сравнений ВРК с БВС. В простейшем варианте множество критериев не разворачивается в явном виде. Схема процесса принятия решения [3] в рамках этой модели может быть представлена как процедура построчного заполнения лицом, принимающим решение, или экспертом матрицы парных сравнений, строки и столбцы которой поименованы названиями альтернатив. То есть от лица, принимающего решение, требуется по строкам матрицы, начиная с первой, последовательно сравнивать важность альтернативы a_1 с a_2, a_3, \dots, a_n ; далее – a_2 с a_3, a_4, \dots, a_n и так до a_{n-1} . Результаты сравнений y_{ij} проставляются в соответствующие клетки квадратной матрицы парных сравнений, размерностью n :

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mn} \end{pmatrix}.$$

По формуле определяются веса каждого из рассматриваемых ВРК с БВС:
– при использовании аддитивной модели:

$$w_i = \sum_{j=1}^n y_{ij};$$

– мультипликативной модели:

$$w_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^n y_{ij}}.$$

Далее веса нормируются $w'_i = w_i / \sum_{k=1}^n w_k$.

В результате составляется вектор $\bar{W}' = (w'_1, \dots, w'_n)$ нормированных весов комплексов.

Общий принцип выбора – наилучшим считается ВРК с БВС с наибольшим весом. Здесь значение веса является значением функции полезности альтернативы.

В рассматриваемых ниже моделях выбора альтернативы осуществляется комплексное использование выше приведенных методов – попарных сравнений и выбора по значениям функций полезности с построением матрицы решений. При этом наилучшей объявляется альтернатива, которой соответствует максимальное значение элемента вектора-строки функции полезности, рассчитываемой как $\bar{U} = \bar{W}' X$, где \bar{W}' – вектор-строка нормированных весов критериев, определенный методом попарных сравнений, а X – матрица решений, рассчитываемая специальным для каждого метода способом.

Метод взвешенных сумм

Составляется матрица решений $X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix}.$

Это делается, как при выборе альтернативы по значениям функций полезности (первый из представленных методов). Каждому из ВРК с БВС a_i последовательно проставляются оценки x_{ji} в балльной шкале измерения по всему множеству критериев $K = \{k_j\}$, $j=1, \dots, m$. Напрямую оценки могут назначаться и вербальным образом, например «приемлемо», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично», с дальнейшим соотносением точек на числовой оси.

С использованием метода попарных сравнений составляется вектор весов (аддитивная или мультипликативная модель) критериев $\bar{W} = (w_1, \dots, w_m)$, который затем нормируется и получается вектор $\bar{W}' = (w'_1, \dots, w'_m)$ нормированных весов критериев.

Рассчитывается вектор-строка функций полезности для каждого оцениваемого ВРК с БВС:

$$\bar{U} = \bar{W}' X = (w'_1, \dots, w'_m) \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} = (u_1, \dots, u_n).$$

Наилучшим объявляется тот ВРК, для которого функция полезности u_i (элемент вектора-строки \bar{U}) имеет максимальное значение.

Метод анализа иерархий

В отличие от метода взвешенных сумм в данном методе матрица решений составляется не прямой экспертной оценкой альтернатив, а с использованием их попарных сравнений для каждого критерия [4].

С использованием метода попарных сравнений составляется вектор \bar{W}' нормированных весов критериев (аддитивная или мультипликативная модель).

Для каждого критерия $k_j, j=1, \dots, m$ с использованием метода попарных сравнений составляется вектор-строка $\bar{x}_j = (x_{j1}, \dots, x_{jn})$ нормированных весов оценки альтернатив $a_i, i=1, \dots, a_n$ (аддитивная или мультипликативная модель).

Составляется матрица решений. Строками этой матрицы являются векторы нормированных весов оценки альтернатив:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \vdots \\ \bar{x}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_{11}, \dots, x_{1n}) \\ \vdots \\ (x_{m1}, \dots, x_{mn}) \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} = X.$$

Рассчитывается вектор функций полезности альтернатив $\bar{U} = \bar{W}' X$.

Наилучшей объявляется та альтернатива, для которой функция полезности u_i (элемент вектора \bar{U}) имеет максимальное значение.

Предпочтительным методом выбора ВРК с БВС является:

- тот, который в большей степени опирается на объективные оценки, основанные на обработке числовых значений показателей с использованием математических методов, и в меньшей степени – на субъективные решения лица, принимающего решение и экспертов;
- наименее трудоемкий, обеспечивающий решение задачи за приемлемое время.

Следует отметить, что использование методов, опирающихся на субъективные решения, в свою очередь, приводит в общем случае к дополнительным затратам времени на проведение экспертных оценок.

Сравнительный анализ методов

Метод выбора альтернативы по значениям функций полезности (первый из рассмотренных) при известном правиле математического расчета функции полезности может характеризоваться как наименее трудоемкий. Составление матрицы решений, включающее процедуры выставления по каждому критерию баллов, опирается на обработку объективных значений показателей комплексов. Однако в этом методе предполагается реализация субъективных процедур. Одна из таких процедур – выставление баллов альтернативам. Но с учетом того, что значения критериев, оставшихся после сужения их множества, в основном измеряются в шкалах отношений, задача выставления баллов

в принципе решается сравнительно легко. Гораздо более сложной является задача установления правила, по которому определяется функция полезности. Здесь субъективный фактор проявляется в наивысшей степени.

По сравнению с рассмотренным методом попарных сравнений в отношении субъективности решений является более простым. Осуществить многокритериальное сравнение двух комплексов несколько проще, чем присвоить комплексам баллы по всем критериям и разработать правило определения функции полезности [5]. Однако и здесь установление правила многокритериального сравнения двух комплексов характеризуется достаточно высокой степенью субъективности.

В методах взвешенных сумм и анализа иерархий задачи установления выше упомянутых правил заменены определением нормированных весов критериев с использованием метода попарных сравнений значений этих критериев. Эта процедура также является субъективной. Однако она является значительно определенной – оценить предпочтение одного из двух критериев для оценки качества выполнения конкретной задачи гораздо легче, чем решать рассмотренные проблемы, связанные с использованием первых двух методов. Следует отметить, что составление матрицы решений при реализации метода анализа иерархий является объективной процедурой, опирающейся на математические операции обработки конкретных данных, измеряемых в основном в шкалах отношений [6]. При использовании ЭВМ эта процедура может быть выполнена автоматически. При реализации метода взвешенных сумм составление матрицы решений обладает некоторой субъективностью, аналогичной выставлению баллов, присущему первому методу. Вместе с тем оба рассматриваемых метода (особенно последний) предусматривают проведение огромного числа операций попарных сравнений, что делает их более трудоемкими при реализации.

Из изложенного следует, что наиболее предпочтительным для математического обеспечения методики выбора рационального варианта компоновки и оснащения ВРК с БВС с использованием ЭВМ является метод анализа иерархий, позволяющий по значениям выбранного критерия осуществлять автоматическое попарное сравнение комплексов. Вместе с тем в этом методе для определения нормированных весов критериев предусматривается выполнение и субъективной процедуры – их попарные сравнения, количество которых может быть довольно большим ($m^2 - m$, где m – количество сравниваемых критериев). Поэтому при реализации этого метода необходимо принимать решение о целесообразности сужения множества критериев, в частности – их объединения.

Остальные методы выбора ВРК целесообразно применять при наличии уже установленных ранее упоминаемых правил.

Вопрос о предпочтении того или иного метода по достижению сходимости результатов выбора с рациональным вариантом может быть решен только на основе накопления опыта, получения статистического материала по каждой из выполняемых задач [7]. На основе его анализа целесообразно формировать объективную информацию о свойствах рационального варианта для той или иной ситуации, использование которой позволит скорректировать величины весов критериев и правила формирования функции полезности, сводя к минимуму субъективный фактор.

Литература

1. Применение беспилотных летательных аппаратов при разведке труднодоступных и масштабных зон чрезвычайных ситуаций / И.М. Янников [и др.] // Вектор науки ТГУ. 2012. № 3 (21). С. 49–53.
2. Емельянов С.В., Ларичев О.И. Многокритериальные методы принятия решений. М.: Знание, 1985. С. 32.
3. Беляев И.П. Основы теории принятия решений. М.: МГСУ, 2005.
4. Саати Т. Принятие решений – Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.

5. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки. М.: Наука, 1973. 161 с.
6. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. 2 изд., перераб. и доп. М.: Статистика, 1980. 264 с.
7. Разработка тактико-технических требований к беспилотным летательным аппаратам, принимаемым на вооружение в МЧС России / М.В. Савин [и др.]: Отчет о НИР. М., 2015. 123 с.

References

1. Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov pri razvedke trudnodostupnyh i masshtabnyh zon chrezvychajnyh situacij / I.M. Jannikov [i dr.] // Vektor nauki TGU. 2012. № 3 (21). S. 49–53.
2. Emel'janov S.V., Larichev O.I. Mnogokriterial'nye metody prinjatija reshenij. M.: Znanie, 1985. S. 32.
3. Beljaev I.P. Osnovy teorii prinjatija reshenij. M.: MGSU, 2005.
4. Saati T. Prinjatje reshenij – Metod analiza ierarhij. M.: Radio i svjaz', 1993. 320 s.
5. Beshelev S.D., Gurvich F.G. Jekspertnye ocenki. M.: Nauka, 1973. 161 s.
6. Beshelev S.D., Gurvich F.G. Matematiko-statisticheskie metody jekspertnyh ocenok. 2 izd., pererab. i dop. M.: Statistika, 1980. 264 s.
7. Razrabotka taktiko-tehnicheskijh trebovanij k bespilotnym letatel'nyh apparatam, prinimaemym na vooruzhenie v MChS Rossii / M.V. Savin [i dr.]: Otchet o NIR. M., 2015. 123 s.