

УДК 629.76: 519.8: 623.454.244: 621.373.8: 681.7.068

М. И. Решетников, Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева, Миасс

В. Г. Зезин, кандидат технических наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе

МЕТОДИКО-ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ВЫБОРА ТИПА СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПИРОСРЕДСТВ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ СУЩЕСТВЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Представлены метод и его программная реализация для многокритериального выбора типа системы инициирования пиросредств ракетного комплекса в условиях существенной неопределенности, использующие принцип нечеткого логического вывода Беллмана – Заде и метод иерархий Саати.

Ключевые слова: нечетко-логический вывод, система инициирования пиросредств, принцип Беллмана – Заде.

На этапе проектных проработок проектанту приходится решать задачу о выборе наилучшего варианта исполнения систем ракетного комплекса, в частности системы инициирования пиросредств. Этот выбор зачастую приходится делать по целому комплексу противоречивых критериев в условиях значительной степени неопределенности, особенно на ранних стадиях проектирования.

В настоящее время при выборе системы все еще достаточно широко распространен традиционный подход, когда производится сравнение различных вариантов по одному-двум критериям, имеющим надежно определяемое численное выражение (например, масса, вероятность безотказной работы). Непосредственно решение о выборе принимается конструктором, по существу субъективно эвристически, с учетом, по возможности, и других критериев, характеризующих качественно (например, безопасность, стойкость к внешним факторам, степень отработки). Вместе с тем постоянно возрастающие требования к качеству разработки РКТ при ужесточении финансирования обуславливают необходимость разработки метода многокритериального выбора, дающего интегральный показатель, который характеризует качество системы в целом с учетом всех частных критериев, а также программного инструмента, позволяющего проектанту оперативно оценивать различные варианты исполнения систем и условий их применения. Именно этого требует современная идеология системного подхода к разработке.

Данную задачу будем решать, используя для моделирования неопределенностей теорию нечетких множеств [1, 2, 3], а для построения комплексного критерия качества – принцип Беллмана – Заде [4, 5, 6].

Суть предлагаемого подхода заключается в следующем. Рассматривается множество типов систем инициирования $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$, каждая из которых должна удовлетворять множеству ограничений $G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ и оценивается по критериям из

множества $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$. Пусть $\mu_{C_i}(S_j) \in [0, 1]$ – оценка степени соответствия каждой системы S_j каждому критерию C_i , а $\mu_{G_i}(S_j) \in [0, 1]$ – каждому ограничению G_i . Тогда можно ввести нечеткие множества критериев \tilde{C}_i и ограничений \tilde{G}_i , определенные на универсуме S :

$$\tilde{C}_i = \left\{ \frac{\mu_{C_i}(S_1)}{S_1}, \frac{\mu_{C_i}(S_2)}{S_2}, \dots, \frac{\mu_{C_i}(S_k)}{S_k} \right\},$$

$$\tilde{G}_i = \left\{ \frac{\mu_{G_i}(S_1)}{S_1}, \frac{\mu_{G_i}(S_2)}{S_2}, \dots, \frac{\mu_{G_i}(S_k)}{S_k} \right\},$$

где степени принадлежности $\mu_{C_i}(S_j), \mu_{G_i}(S_j)$ есть результаты указанных выше оценок.

Согласно принципу Беллмана – Заде [4] наилучшей будет альтернатива, которая в наибольшей степени одновременно удовлетворяет всем ограничениям и критериям, а нечеткое решение представляет собой пересечение нечетких множеств ограничений и частных критериев [4, 5]:

$$\tilde{D} = \tilde{G}_1 \cap \tilde{G}_2 \cap \dots \cap \tilde{G}_n \cap \tilde{C}_1 \cap \tilde{C}_2 \cap \dots \cap \tilde{C}_m,$$

что соответствует операции конъюнкции соответствующих функций принадлежности:

$$\mu_D = \mu_{G_1} \wedge \mu_{G_2} \wedge \dots \wedge \mu_{G_n} \wedge \mu_{C_1} \wedge \mu_{C_2} \wedge \dots \wedge \mu_{C_m}. \quad (1)$$

Для учета различной важности критериев и ограничений вводятся коэффициенты относительной важности ограничений $\alpha_i \in (0, 1), i = \overline{1, n}$, и критери-

ев $\beta_j \in (0, 1), j = \overline{1, m}$, такие, что $\sum_{i=1}^n \alpha_i + \sum_{j=1}^m \beta_j = 1$,

и тогда вместо (1) для определения функции принадлежности используется формула [7]

$$\mu_D = (\mu_{G_1})^{\alpha_1} \wedge (\mu_{G_2})^{\alpha_2} \wedge \dots \wedge (\mu_{G_n})^{\alpha_n} \wedge (\mu_{C_1})^{\beta_1} \wedge (\mu_{C_2})^{\beta_2} \wedge \dots \wedge (\mu_{C_m})^{\beta_m}.$$

Таким образом, получаем следующее нечеткое множество \tilde{D} итоговых оценок качества альтернатив из универсума S :

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{\mu_D(S_1)}{S_1}, \frac{\mu_D(S_2)}{S_2}, \dots, \frac{\mu_D(S_k)}{S_k} \right\}.$$

Полученное нечеткое множество \tilde{D} дает в качестве наилучшего варианта D тот, у которого наибольшая функция принадлежности:

$$D = \arg \max (\mu_D(S_1), \mu_D(S_2), \dots, \mu_D(S_k)).$$

Для определения функций принадлежности применим метод парных сравнений вариантов системы по каждому критерию с помощью 9-балльной шкалы Саати [3, 8]. Для этого экспертно определяется уровень преимущества a_{ij} системы S_i над системой S_j ($i, j = \overline{1, k}$) с использованием данных табл. 1.

Таблица 1. Шкала оценок Саати

Уровень преимущества S_i над S_j	a_{ij}	Уровень преимущества S_j над S_i	a_{ji}
Отсутствует	1	Почти явное	6
Почти слабое	2	Явное	7
Слабое	3	Почти абсолютное	8
Почти существенное	4	Абсолютное	9
Существенное	5		

Результаты представляются в виде матрицы $A = \{a_{ij}\}, i, j = \overline{1, k}$. Степени принадлежности принимаются равными соответствующим координатам собственного вектора $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ матрицы парных сравнений A :

$$\mu(S_i) = w_i, \quad i = \overline{1, k}.$$

Собственный вектор находится из следующей системы уравнений:

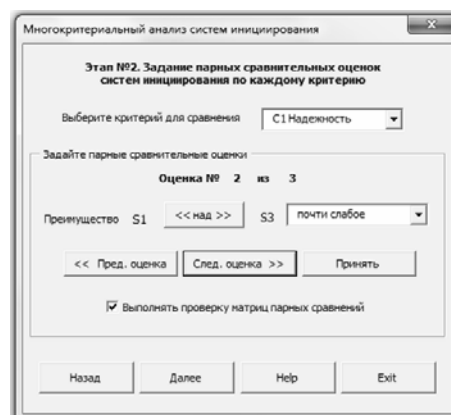
$$\begin{cases} AW = \lambda_{\max} W, \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1, \end{cases} \quad (2)$$

где λ_{\max} – максимальное собственное значение матрицы A .

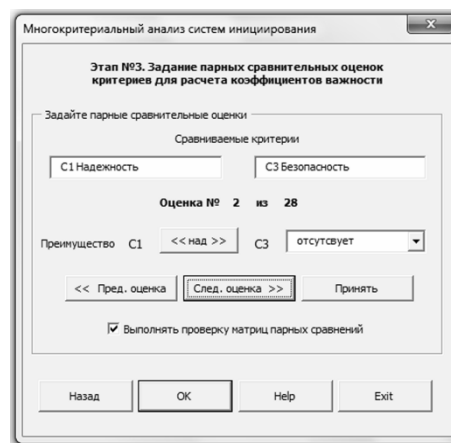
Для определения коэффициентов относительной важности критериев также применяется процедура парных сравнений по шкале Саати.

Изложенный алгоритм не требует большой вычислительной работы, поэтому программой реализации метода выбрана среда VBA, а методико-программный модуль выполнен в виде надстройки к MS Excel. Для поиска максимального собственного значения матриц используется итерационный алгоритм, линейная система уравнений (2) решается ме-

тодом исключения Гаусса. Ввод данных, необходимых для анализа, осуществляется в специальные диалоговые окна (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Диалоговые окна ввода данных для многокритериального анализа

В процессе ввода предусмотрен контроль непротиворечивости экспертных оценок альтернатив по различным критериям путем анализа элементов матриц парных сравнений [9]. Вывод результатов расчетов – матриц парных сравнений, их собственных значений, степеней принадлежности, коэффициентов относительной важности и нечетких множеств – производится на табличные и графические листы Excel.

В качестве примера применения программы сравним три вида проектируемых систем иницирования: низковольтную S_1 , высоковольтную S_2 и лазерную S_3 с целью выбора наилучшего варианта. Сравнение систем будем проводить по критериям: надежность функционирования (C_1); габаритно-массовые характеристики (C_2); безопасность при эксплуатации (C_3); стойкость к внешним факторам (C_4); диагностируемость при наземной эксплуатации (C_5); стоимость (C_6); долговечность (C_7); энергопотребление (C_8).

Полученные в результате расчетов степени принадлежности $\mu_C(S_i)$ и коэффициенты относитель-

ной важности β_i приведены на графике рис. 2, а, а показатели качества систем по каждому критерию с учетом коэффициентов относительной важности – на рис. 2, б.

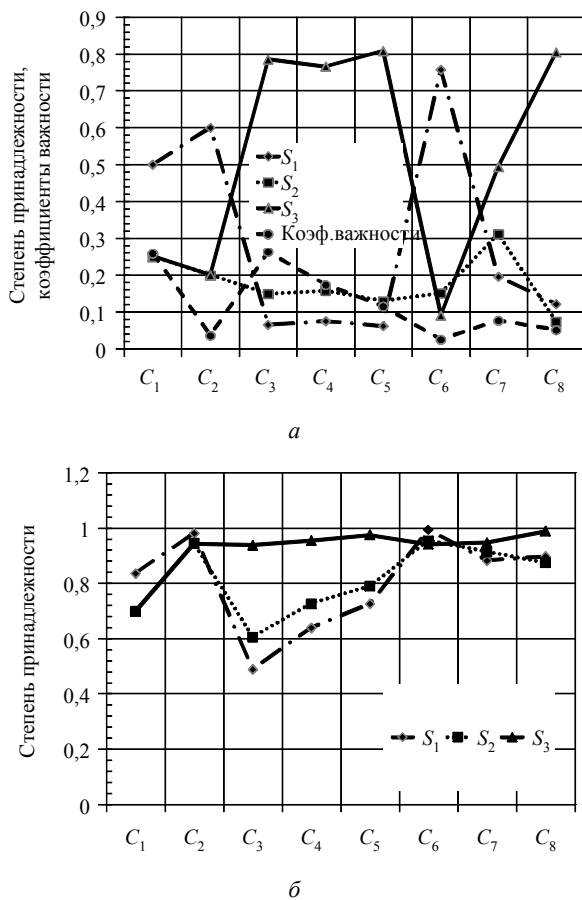


Рис. 2. Степени принадлежности систем: а – нечетким множествам критериев и коэффициенты относительной важности; б – концентрированным нечетким множествам решений

Таким образом, нечеткое множество итоговых оценок имеет вид

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{0,489}{S_1}, \frac{0,606}{S_2}, \frac{0,699}{S_3} \right\}.$$

Следовательно, наилучшей системой инициирования в рассматриваемом примере будет система S_3 – лазерная.

Очевидно, что полученный результат решения по сути дела зависит от субъективного мнения экспертов, проводящих парные оценки. Проверим, как скажется на результате решения вариативность экспертных оценок относительно базового варианта, за который примем выполненный выше расчет (см. рис. 2). Несмотря на то, что при грамотной и тщательно выполненной экспертизе трудно ожидать появления погрешности экспертной оценки, превышающей одну ступень шкалы Саати, вариации будем выполнять в пределах двух ступеней, например, от слабого преимущества до существенного.

Так как для наилучшей системы S_3 критичным является параметр «надежность» (см. рис. 2, а), и по

этому параметру лазерная и низковольтная системы отличаются несущественно, то исследовалось влияние изменения преимущества системы S_1 над S_3 по критерию C_1 . Результаты расчетов показаны на рис. 3. Здесь через $\mu_D(S_1)_0$, $\mu_D(S_2)_0$ обозначены степени принадлежности систем S_1 и S_2 итоговому решению базового варианта расчета. Из приведенных данных видно, что система S_3 по-прежнему остается лучшей, хотя системы S_3 и S_2 сближаются по результирующему показателю качества.

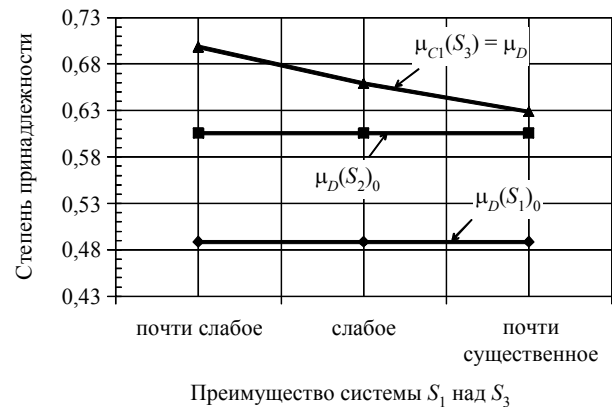


Рис. 3. Влияние уровня преимущества системы S_1 над S_3 по критерию «надежность» на результат решения

Анализ данных рис. 2, а показывает, что наилучшая в конечном итоге система S_3 имеет низкую степень принадлежности нечетким множествам критериев C_2 (массовые характеристики) и C_6 (стоимость) без учета их концентрирования. Одновременно эти критерии имеют и низкие коэффициенты важности $\beta_{C_2} = 0,036$ и $\beta_{C_6} = 0,025$. Поэтому исследовалось, как изменятся коэффициенты важности β_{C_2} , β_{C_6} и степени принадлежности $\mu_{C_i}(S_3)$, $i = 2, 6$, при увеличении преимущества критериев C_2 и C_6 над остальными. Результаты расчетов показаны в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты важности

Коэффициент важности	Базовый вариант	Увеличение преимущества критерия	
		на одну ступень	на две ступени
β_{C_2}	0,0356	0,049	0,057
β_{C_6}	0,025	0,032	0,042
$\mu_{C_2}(S_3)$	0,944	0,925	0,912
$\mu_{C_6}(S_3)$	0,942	0,924	0,904

Как видно из этих данных, увеличение преимущества критериев C_2 и C_6 над остальными в пределах двух ступеней шкалы Саати привело к увеличению коэффициентов важности в 1,5-1,7 раза. Однако это не сказалось сколько-нибудь существенным образом на величинах степеней принадлежности вследствие малости коэффициентов важности по абсолютной величине. Так, степени принадлежности по критериям C_2 и C_6 уменьшаются примерно лишь на 5%

в абсолютном выражении, а изменение степеней принадлежности по остальным критериям значительно меньше.

Таким образом, метод многокритериального анализа с использованием принципа Беллмана – Заде и парных оценок по шкале Саати при тщательной выполненной экспертизе позволяет получить адекватную оценку качества сравниваемых альтернатив. При значимом различии альтернатив результат сравнительного анализа является устойчивым к возможной вариативности парных сравнительных оценок, обусловленной субъективностью мнений эксперта.

Разработанный методико-программный модуль используется в практике проектно-конструкторских работ по системам инициирования в Государственном ракетном центре им. академика В. П. Макеева. Он может также применяться для многокритериального сравнительного анализа в условиях неопределенности и других систем (технических, экономических и пр.), для которых могут быть составлены парные сравнительные оценки их качества.

Библиографические ссылки

1. Силов В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М. : ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.
2. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. литер., 1981. – 208 с.
3. Борисов А. Н., Крумберг О. А., Федоров И. П. Принятие решений на основе нечетких моделей. Примеры использования. – Рига : Знание, 1990. – 184 с.
4. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедура принятия решений : сб. переводов. – М. : Мир, 1976. – С. 172–215.
5. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с. : ил.
6. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 3. – С. 150–154.
7. Yager P. Multiple objective decision-making using fuzzy sets // Int. J. Man-Mach. Stud. – 1979. – Vol. 9. – No. 4. – P. 375–382.
8. Саати Т. Математические модели конфликтных ситуаций : пер. с англ. – М. : Сов. радио, 1977. – 304 с.
9. Применение аппарата нечеткой логики к решению задачи выбора типа системы инициирования пирострел ракетного комплекса : отчет о НИР / ЮУрГУ ; рук. Зезин В. Г., исполн. Зезин В. Г., Решетников М. И. – Миасс, 2014. – 141 с. – Библиогр. с. 89. – Инв. № 171249-ГиТ/02.

M. I. Reshetnikov, Academician V. P. Makeev State Rocket Centre, Miass

V. G. Zezin, PhD in Engineering, Associate Professor, South Ural State University (Miass branch)

Method and Software Module for Selection of Type of Rocket Complex Pyrodevices Activation System under Conditions of Essential Uncertainty

The paper presents the method and its software implementation for multi-criteria selection of the type of rocket complex pyro devices activation system within essential uncertainty. The method applies the Bellman-Zadeh fuzzy logic inference approach and Saaty hierarchy method.

Keywords: fuzzy logic inference, pyro devices activation system, Bellman-Zadeh approach.

Получено 22.04.2014

УДК 621.778

И. Б. Покрас, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Г. А. Чикуров, кандидат технических наук, докторант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

М. И. Касимов, магистрант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ СМАЗКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ СМАЗОК

Приведена расчетная схема для волочения проволоки с использованием сборной волоки. Приведены этюры скоростей течения смазки по участкам сборной волоки и формулы для определения давлений на входе в очаг деформации для разных этюров скоростей. Рассмотрен комплексный подход к определению условий, необходимых для создания режима жидкостного трения при волочении в сборной волоке.

Ключевые слова: сборная волока, напорный вкладыш, калибрующий вкладыш, кажущаяся вязкость, упругие деформации, неньютоновская жидкость.

Создание режима жидкостного трения в процессах ОМД обусловлено гидродинамическим эффектом смазки. В процессе волоче-

ния возникновение гидродинамического эффекта смазки связано с относительным скольжением наклоненных друг к другу поверхностей заготовки