

УДК 629.76: 519.8: 623.454.244: 621.373.8: 681.7.068: 519.8

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА
ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА
СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА**

В.Г. Зезин, М.И. Решетников

Предложен метод многокритериального выбора наилучшего варианта конструктивно-схемного исполнения вспомогательных систем ракетного комплекса, основанный на нечетком логическом выводе, позволяющем адекватно учитывать неопределенности, присущие процессу разработки, оперировать гетерогенной информацией (качественного и количественного характера) о проектируемых системах.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, нечеткая логика, нечеткопродукционная система, лингвистическая переменная.

Вспомогательные системы ракетно-космической техники, которым относятся системы наддува, заправки, системы инициирования пиросредств, отделения и т.д. выполняют важную роль при эксплуатации и функционировании ракетного комплекса (РК). От совершенства их конструктивно-схемного исполнения в значительной степени зависят не только успешное выполнение программы запуска и полета и эксплуатационные характеристики, но зачастую, и энергомассовое совершенство РК в целом. Задача выбора наилучшего варианта исполнения вспомогательных систем остается актуальной на всех этапах создания РК от начальной стадии проектирования до разработки рабочей документации, так как разработка ракетного комплекса – процесс динамический, в течение которого происходит постоянное согласование параметров отдельных систем, уточнение предъявляемых к ним требований. Этот фактор обуславливает и значительную долю неопределенности постановки задачи выбора наилучшего варианта, так как критерии выбора систем и ограничения на целевую функцию на каждой конкретной стадии разработки могут быть сформулированы только с некоторой степенью нечеткости. Кроме того, существует нечеткость исходной информации, обусловленная физическим содержанием критериев выбора: если такие показатели качества, как масса или надежность могут быть оценены количественно с достаточной степенью объективности, то этого нельзя сказать, например, о безопасности, оценка которой производится экспертно. При этом альтернативные варианты должны сравниваться по целому комплексу зачастую противоречивых критериев и ограничений. Как видим, задача выбора наилучшего варианта исполнения вспомогательной системы РК представляет собой задачу многокритериального анализа альтернатив в условиях нечеткой информации.

Таким образом, имеем множество $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ альтернативных вариантов исполнения систем РК. Традиционными методами выполнения проектно-конструкторских проработок для каждой системы s_i может быть получена оценка ее соответствия частным критериям c_i и ограничениям g_i , имеющим качественное либо количественное выражение, то есть могут быть заданы множества $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ и $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$. В соответствии с системным подходом к разработке, необходимо для каждой альтернативы сформировать единый интегральный показатель качества w , то есть задать отображение:

$$f: C_1 \times C_2 \times \dots \times C_m \times G_1 \times G_2 \times \dots \times G_n \rightarrow W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}. \quad (1)$$

Разрабатываемый метод принятия решений «погружен» в нечеткую среду, находящуюся под воздействием флуктуаций внешних факторов. Следовательно, решать рассматриваемую задачу необходимо с использованием нечетких моделей, несомненным достоинством которых является возможность параллельного оперирования гетерогенной информацией, представленной в виде сложных качественных лингвистических описаний и количественных данных [1, 2, 3]. При нечетко-множественном подходе оценки соответствия систем критериям и ограничениям представляют собой нечеткие множества \tilde{C}_i и $\tilde{G}_i, i = \overline{1, k}$. Сформировав нечеткое множество решений $\tilde{W} = \{w_i, \mu_W(w_i)\}, i = \overline{1, k}$, мы найдем наилучший вариант, как элемент этого множества с наибольшей степенью принадлежности $\mu_W(w_i)$.

Рассмотрим возможные методы решения интересующей нас задачи. На начальном этапа разработки РК, когда формируется облик ракеты, доступны только очень грубые оценки характеристик систем, которые чаще всего формулируются в виде экспертных высказываний типа «система s_1 Θ лучше/хуже системы s_2 по параметру p », где Θ – модификатор, имеющий смысл «значительно», «существенно» и т. п. Здесь под нечеткой переменной p понимаются частные критерии качества и проектные ограничения, то есть элементы множеств \tilde{C}_i и \tilde{G}_i . Согласно принципу нечеткого обобщения [2, 3] отображение (1) и совокупность нечетких множеств \tilde{C}_i и \tilde{G}_i однозначно порождают нечеткое отображение $\tilde{F}_i: C_1 \times C_2 \times \dots \times C_m \times G_1 \times G_2 \times \dots \times G_n \rightarrow W$ с функцией принадлежности, определяемой формулой

$$\mu_W(w) = \min_{\substack{i=1, m \\ j=1, n}} \left[\mu_{C_i}(c_i), \mu_{G_j}(g_j) \right]. \quad (2)$$

Согласно правил алгебры нечетких множеств выражение (2) соответствует операции пересечения нечетких множеств критериев \tilde{C}_i и ограничений \tilde{G}_i . Физически это означает, что разрабатываемые системы должны соответствовать всем критериям и ограничениям одновременно, а нечеткое решение есть:

$$\tilde{W} = \tilde{C}_1 \times \tilde{C}_2 \times \dots \times \tilde{C}_m \times \tilde{G}_1 \times \tilde{G}_2 \times \dots \times \tilde{G}_n.$$

Такой метод нечеткого логического вывода предложен Р. Беллманом и Л. Заде в работе [4] и получил широкое распространение в системном анализе. Таким образом, если удастся найти степени принадлежности, входящие в (2), то наилучшая система s_p , найдется как:

$$s_p : \mu_W(w_p) = \max_{i=1,k} \mu_W(w_i).$$

Для определения степеней принадлежности $\mu_{C_i}(c_i)$ и $\mu_{G_j}(g_j)$, с учетом сделанного выше замечания относительно формы выражения оценок качества систем, удобно применить метод парных сравнений [5]. Для этого экспертно определяется уровень преимущества a_{ij} системы s_i над системой s_j с использованием 9 бальной шкалы Саати [6], табл. 1.

Таблица 1

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

Так как по своему смыслу $a_{ij} = \mu_C(c_i) / \mu_C(c_j)$, $i = \overline{1,k}$, $j = \overline{1,k}$, то коэффициенты a_{ij} удовлетворяют системе уравнений:

$$\sum_{j=1}^k a_{ij} \mu_C(c_j) = k \mu_C(c_i), \quad i = \overline{1,k}. \quad (3)$$

С другой стороны система (3) есть задача на собственные значения и собственные векторы матрицы $\mathbf{A} = [a_{ij}]$, $i = \overline{1,k}$, $j = \overline{1,k}$. Таким образом, если в результате попарных сравнений построена матрица \mathbf{A} , то степени принадлежности могут быть определены как компоненты собственного вектора этой матрицы, соответствующего ее максимальному собственному значению. При этом дополнительно используется условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^k \mu_C(c_i) = 1.$$

Для учета того, что различные частные критерии и ограничения могут иметь неодинаковую важность при принятии решения, в соответствии с подходам предложенном в [7], используется операция концентрирования нечетких множеств. И тогда вместо формулы (2) применяется выражение:

$$\mu_w(w) = \min_{\substack{i=1,m \\ j=1,n}} \left[\mu_{C_i}^{\alpha_i}(c_i), \mu_{G_j}^{\beta_j}(g_j) \right],$$

где для определения показателей степени α_i и β_j также может использоваться метод парных сравнений.

Изложенный метод многокритериального анализа алгоритмически прост, не требует большой вычислительной работы, поэтому был реализован в среде VBA в виде надстройки к MS Excel. Это дает возможность в полной мере использовать интерфейс Excel при работе с табличными данными и графическим материалом, оперативно проводить оценки различных вариантов, исследовать влияние точности экспертных оценок на робастность итогового решения и пр. Фрагменты интерфейса программы показаны на рис. 1.

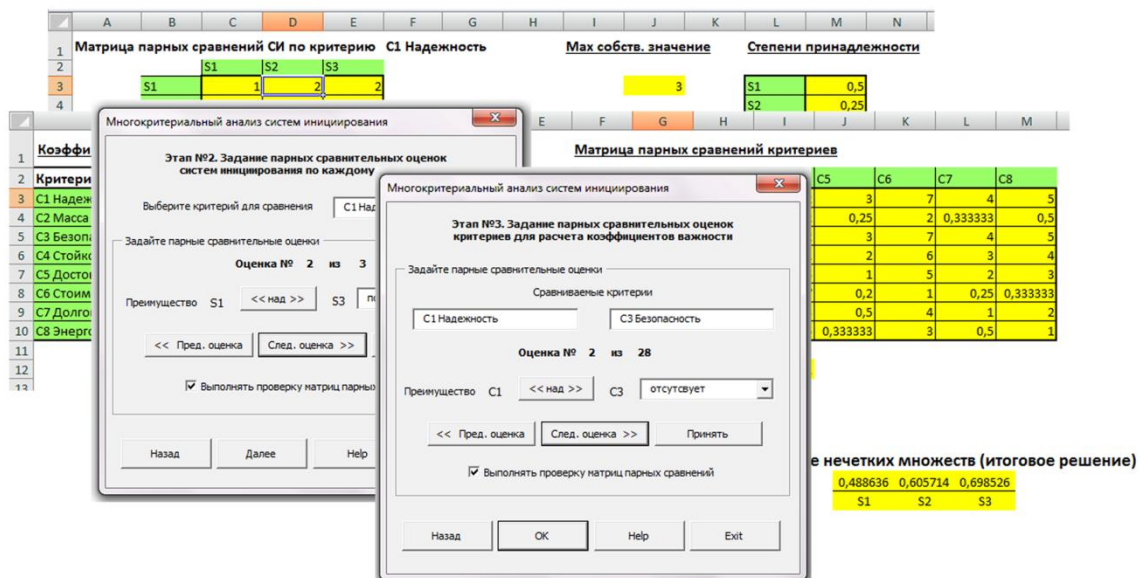


Рис. 1. Фрагменты интерфейса программы многокритериального анализа с использованием принципа Беллмана-Заде

На более поздних этапах разработки, когда выполнены детальные проработки, такие характеристики систем, как масса, габариты, надежность и т.п. имеют уже в достаточной степени достоверную количественную оценку, что необходимо учитывать в алгоритме выбора наилучшего варианта. Для этого целесообразно использовать продукционные нечеткие системы [3, 8, 9]. В данном методе входные c_i , g_j и выходная w величины описываются лингвистическими переменными, связь между которыми устанавливается системой логических правил. Нечеткие правила близки к логическим моделям и адекватно отражают знания эксперта в данной проблемной области. Сам процесс нечеткого вывода представляет собой алгоритм определения степени истинности нечетких заключений правил на основе известной

степени истинности нечетких условий. В настоящее время разработано несколько десятков алгоритмов нечеткого вывода [3, 8, 9], которые используются для решения различных типов задач. Большинство из них используют прямой метод вывода, основанный на правиле нечеткий модус поненс. Для нашей задачи принятия решения наиболее удобен алгоритм Мамдани, в котором система правил, устанавливающая взаимосвязь между множеством $V = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$ входных лингвистических переменных (оценок соответствия систем частным критериям c_i и ограничениям g_i) и выходной лингвистической переменной (обобщенным показателем качества систем) w записывается в виде

$$\begin{aligned} & \text{IF } (\beta_1 = \tilde{B}_{1j_1}) \text{ AND } (\beta_2 = \tilde{B}_{2j_1}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (\beta_n = \tilde{B}_{nj_1}) \\ & \text{OR } (\beta_1 = \tilde{B}_{1j_2}) \text{ AND } (\beta_2 = \tilde{B}_{2j_2}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (\beta_n = \tilde{B}_{nj_2}) \\ & \dots \\ & \text{OR } (\beta_1 = \tilde{B}_{1j_{k_j}}) \text{ AND } (\beta_2 = \tilde{B}_{2j_{k_j}}) \text{ AND } \dots \text{ AND } (\beta_n = \tilde{B}_{nj_{k_j}}) \\ & \text{THEN } w = \tilde{D}_j, \quad (F = s_j), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (4)$$

где \tilde{B}_{ij_p} – лингвистический терм, которым оценивается переменная β_i в строке с номером j_p ($p = \overline{1, k_j}$); k_j количество строк-конъюнкций; \tilde{D}_j – лингвистический терм, которым оценивается выходная переменная w в j -ом правиле; F – коэффициент достоверности правила (вес), величина которого для j -го правила равна s_j ; n – количество входных переменных; m – количество термов, используемых для лингвистической оценки выходной переменной w .

Все лингвистические термы в (4) представляют собой нечеткие множества с соответствующими функциями принадлежности на универсумах входных X_i и выходной Y переменных: $\mu_{B_{ij_p}}(x_i): X_i \rightarrow [0, 1]$, $x_i \in X_i$ и $\mu_{D_j}(y): Y \rightarrow [0, 1]$, $y \in Y$.

Алгоритм вывода включает следующие этапы [3, 9].

1. Фаззификация входных переменных. Так как оценки соответствия систем критериям и ограничениям имеют вид конкретных не нечетких величин $\beta_i = a_i$ ($a_i \in X_i$), то должна быть проведена их фаззификация (приведение к нечеткости). Для этого для каждой входной переменной с использованием функций принадлежности находится степень принадлежности b_{ij_p} значения a_i переменной β_i соответствующему нечеткому терму \tilde{B}_{ij_p} . Эти значения функций принадлежности:

$$b_{ijp} = \mu_{B_{ijp}}(a_i), \quad i = \overline{1, n} \quad (5)$$

являются результатом фаззификации подусловий $\beta_i = \tilde{B}_{ijp}$ и принимаются за степень их истинности.

2. Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий d_j по каждому из правил системы нечеткого вывода по известной степени истинности соответствующих подусловий. При этом для определения результата нечеткой конъюнкции обычно используется операция \min , а для определения результата нечеткой дизъюнкции – операция \max или операция граничной суммы:

$$d_j = \max_{p=1, k_j} \left[\min_{i=1, n} (b_{ijp}) \right], \quad j = \overline{1, m} \text{ или } d_j = \min \left\{ \sum_{p=1}^{k_j} \left[\min_{i=1, n} (b_{ijp}) \right], 1 \right\}, \quad j = \overline{1, m}.$$

3. Активизация представляет собой процедуру нахождения степени истинности каждого из заключений правил нечетких продукций. Для рассматриваемого формата правил она равна произведению степени истинности условия d_j на весовой коэффициент правила s_j . После чего находится функция принадлежности заключения в j -ом правиле, то есть усеченная функция принадлежности термина \tilde{D}_j :

$$\mu_{D_j}^*(y) = \text{imp}(c_i s_i, \mu_{D_j}(y)) = \min_{y \in Y} (c_i s_i, \mu_{D_j}(y)), \quad (6)$$

где imp – нечеткая импликация, которая в алгоритме Мамдани реализуется операцией минимума.

4. На этапе аккумуляции происходит объединение нечетких множеств, определяемых функциями принадлежности (6), что дает функцию принадлежности выходной лингвистической переменной. В качестве операции объединения чаще всего используют операцию максимума:

$$\mu_W(y) = \max_{j=1, m} \left[\mu_{D_j}^*(y) \right]. \quad (7)$$

5. Дефаззификация позволяет, имея функцию принадлежности (7), получить конкретное не нечеткое значение выходной переменной w , соответствующей вектору значений входных переменных $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Для этого наиболее часто применяют метод центра тяжести:

$$w = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \mu_W(y) dy}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_W(y) dy},$$

Где y_{\min} , y_{\max} – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества w .

Выполнив по описанному алгоритму расчеты выходной характеристики для каждой системы из множества S , найдем наилучшую альтернативу, как систему с наибольшей величиной показателя качества w .

Для практической реализации системы нечетких продукций могут использоваться программные комплексы, имеющиеся в настоящее время на рынке программных продуктов, например, расширение Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB или программная среда fuzzyTECH. Со своей стороны можем отметить положительный опыт применения последнего продукта, который позволяет формировать иерархические структуры базы правил и тем самым разрабатывать нечеткие модели большой размерности. В качестве примера можно привести результаты сравнительного многокритериального анализа трех типов систем инициирования пиросредств: низковольтной s_1 , высоковольтной s_2 и лазерной s_3 [10]. Анализ проводился по 20 частным критериям. Результаты расчетов итогового показателя качества систем приведены в табл. 2.

Таблица 2

Система инициирования пиросредств	s_1	s_2	s_3
Итоговый показатель качества w , %	50,9	45,3	96

На рис. 2 показана поверхность нечеткого вывода для входных переменных «Надежность» и «Безопасность при эксплуатации», оказывающих наибольшее влияние на итоговый показатель качества систем.

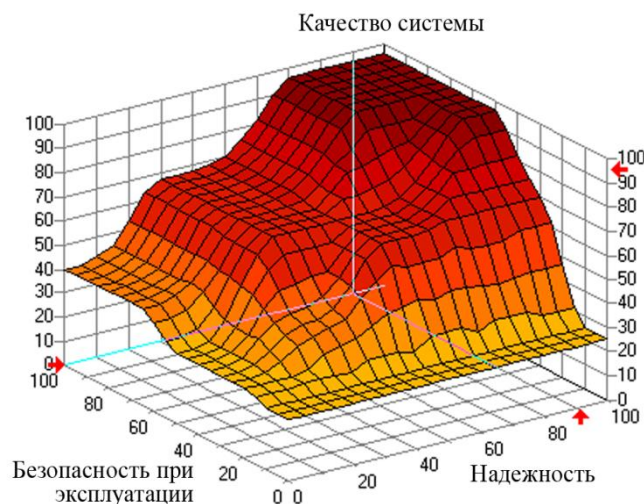


Рис. 2. Поверхность нечеткого вывода для доминирующих входных переменных

Таким образом, на основе теоретических положений нечеткого логического вывода разработаны два типа методик многокритериального сравнительного анализа и принятия решения по выбору наилучшего варианта ис-

полнения вспомогательных систем ракетного комплекса. На начальном этапе проектирования предложено использовать принцип Беллмана-Заде в сочетании с методом иерархий Саати, а на более поздних стадиях разработки РК – нечетко-продукционные системы. Изложенный подход к выбору проектно-конструкторских решений в настоящее время находит применение в Государственном ракетном центре им. академика В.П. Макеева.

Библиографический список

1. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман; пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
2. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде; пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 163 с.
3. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
4. Беллман, Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде / Вопросы анализа и процедура принятия решений: сб. переводов. – М.: Мир, 1976. – С. 172–215.
5. Борисов, А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей : Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига.: Знание, 1990. – 184 с.
6. Саати, Т. Математические модели конфликтных ситуаций / Т. Саати; пер. с англ. – М.: Сов. Радио, 1977. – 304 с.
7. Yager P. Multiple objective decision-making using fussy sets // Int. J. Man-Mach. Sfid., 1979. Vol. 9. № 4. Pp. 375–382 с.
8. Ахрем, А.А. Нечеткий логический вывод в системе принятия решений / А.А. Ахрем, М.Р. Ашинянц, С.А. Петров // Труды ИСА РАН. – 2007. – Т. 29. – С. 265–275.
9. Борисов, В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
10. Применение аппарата нечеткой логики к решению задачи выбора типа системы инициирования пиросредств ракетного комплекса: отчет о НИР / ЮУрГУ; рук. В.Г. Зезин, исполн. В.Г. Зезин, М.И. Решетников. – Миасс, 2014. – 141 с. – Инв. № 171249-ГиТ/02.

[К содержанию](#)