Методика выбора оптимального схемного решения в нечетких условиях на основе многокритериального анализа вариантов при равновесных и неравновесных критериях

12, декабрь 2012

DOI: 10.7463/1212.0465867

Жилейкин М. М., Калимулин М. Р., Мирошниченко А. В.

УДК. 62-18

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

jileykin_m@mail.ru

kalimulin-marat@yandex.ru

avm179@yandex.ru

Введение

Одним из важнейших этапов процесса формирования технического облика вновь создаваемого транспортного средства является проведение инженерного анализа разработки, формирование схемных решений, удовлетворяющих полученным значениям определяющих параметров, выполнение эскизного проекта. При этом решаются следующие задачи [1].

- Предварительное формирование облика машины, отвечающего требованиям технического задания. Формируется допустимая область существования проекта, где находится допустимое решение, описываемое параметрами начального приближения.
- Оптимизация проектных параметров ОЛВКТС по выбранному критерию с учетом ограничений, вытекающих из требований технического задания и действующих нормативных документов.
- Параметрический анализ, направленный на оценку чувствительности проекта к изменению его альтернатив (вариантов схемных решений), параметров и ограничений.
- Уточнение характеристик изделия и документирование результатов проектирования.

Этот этап также включает в себя работы по анализу полученных схемных решений по результатам эскизного проектирования и выбору оптимального варианта. На этом этапе возникают следующие проблемы.

В процессе принятия решения проводится многокритериальный анализ в условиях большого количества неопределенностей, когда цели и ограничения заданы нечеткими множествами. В данных условиях принятие решения – это выбор альтернативы, которая одновременно удовлетворяет и нечетким целям, и нечетким ограничениям. Решение задачи выбора оптимального схемного решения возможно с помощью теории принятия решений в нечетких условиях по схеме Беллмана-Заде на основе многокритериального анализа вариантов при равновесных и неравновесных критериях [2]. Веса критериев получают на основе парных сравнений [3].

Методика выбора оптимального схемного решения в нечетких условиях

Рассмотрим процесс принятия решений на примере разработки особо легкого высокоподвижного колесного транспортного средства (ОЛВКТС) в условиях неопределенности, когда цели и ограничения заданы нечеткими множествами. Принятие решения - это выбор альтернативы, которая одновременно удовлетворяет и нечетким целям, и нечетким ограничениям.

На предыдущих этапах выполнения работ по формированию технического облика ОЛВКТС должны быть определены:

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ - множество вариантов, которые подлежат многокритериальному анализу;

$G = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$ - множество количественных и качественных критериев, которыми оцениваются варианты.

Задача многокритериального анализа состоит в упорядочивании элементов множества X по критериям из множества G .

Пусть $\mu_{G_i}(x_j)$ - число в диапазоне $[0,1]$, которое характеризует уровень оценки варианта $x_j \in X$ по критерию $G_i \in G$: чем больше число $\mu_{G_i}(x_j)$, тем выше оценка варианта x_j по критерию G_i , $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, k$. Тогда критерий G_i можно представить в виде нечеткого множества $\tilde{G}_i$ на универсальном множестве вариантов X [4]:

$$\tilde{G}_i = \left(\frac{\mu_{G_i}(x_1)}{x_1}, \frac{\mu_{G_i}(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu_{G_i}(x_k)}{x_k} \right), \quad (1)$$

где $\mu_{G_i}(x_j)$ - степень принадлежности элемента x_j нечеткому множеству $\tilde{G}_i$.

Находить степени принадлежности нечеткого множества (1) удобно методом построения функций принадлежности на основе парных сравнений по шкале профессора

Разработанные варианты схемных решений отличаются типом силовой установки, расположением моторно-трансмиссионного блока (спереди, сзади, посередине), а также массо-габаритными характеристиками. Значения определяющих параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Значения определяющих параметров для разработанных вариантов схемных решений
ОЛВКТС

№	Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
1	Максимальная скорость движения, км/ч	86	86	86	95	110
2	Запас хода	750	750	750	500	900
3	Удельная мощность, кВт/т (отношение мощности двигателя к полной массе машины)	36,7	36,7	36,7	42	40
4	Дорожный просвет	0,315	0,315	0,315	0,27	0,26
5	Максимальный угол преодолеваемого подъема, град	23	23	23	27	30
6	Угол поперечной устойчивости, град	32	34	34	35	38
7	Максимальный динамический фактор	0,77	0,77	0,77	0,81	0,83
8	Удельная грузоподъемность (отношение массы перевозимого груза к полной массе машины)	0,35	0,35	0,35	0,3	0,44

Для проверки основных принципиальных технических решений необходимо выбрать наиболее приемлемый вариант, создать макетный образец и провести его испытания.

Выбор оптимального схемного решения

Для нахождения функции принадлежности $\mu_{G_i}(x_j)$ воспользуемся методикой, разработанной в [6]. На основании заключений эксперта были составлена матрица парных сравнений рангов на основе 9-балльной шкалы Саати для всех определяющих параметров (таблицы 2 – 9).

Таблица 2.

Матрица парных сравнений значимости определяющих параметров ОЛВКТС по шкале
Саати для параметра «Максимальная скорость»

№ параметра из таблицы 1	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1/2	1/3
2	1	1	1	1/2	1/3
3	1	1	1	1/2	1/3
4	2	2	2	1	1/4
5	3	3	3	4	1

Таблица 3.

Матрица парных сравнений значимости определяющих параметров ОЛВКТС по шкале
Саати для параметра «Запас хода»

№ параметра из таблицы 1	1	2	3	4	5
1	1	1	1	4	1/5
2	1	1	1	4	1/5
3	1	1	1	4	1/5
4	1/4	1/4	1/4	1	1/7
5	5	5	5	7	1

Таблица 4.

Матрица парных сравнений значимости определяющих параметров ОЛВКТС по шкале
Саати для параметра «Удельная мощность»

№ параметра из таблицы 1	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1/5	1/4
2	1	1	1	1/5	1/4
3	1	1	1	1/5	1/4
4	5	5	5	1	2
5	4	4	4	1/2	1

Таблица 5.

Матрица парных сравнений значимости определяющих параметров ОЛВКТС по шкале
Саати для параметра «Дорожный просвет»

№ параметра из таблицы 1	1	2	3	4	5
1	1	1	1	4	4
2	1	1	1	4	4
3	1	1	1	4	4
4	1/4	1/4	1/4	1	1
5	1/4	1/4	1/4	1	1

Таблица 6.

Матрица парных сравнений значимости определяющих параметров ОЛВКТС по шкале
Саати для параметра «Максимальный угол преодолеваемого подъема»

№ параметра из таблицы 1	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1/4	1/6
2	1	1	1	1/4	1/6
3	1	1	1	1/4	1/6
4	4	4	4	1	1/4
5	6	6	6	4	1

Таблица 7.

Матрица парных сравнений значимости определяющих параметров ОЛВКТС по шкале
Саати для параметра «Угол поперечной устойчивости»

№ параметра из таблицы 1	1	2	3	4	5
1	1	1/2	1/2	1/3	1/5
2	2	1	1	1	1/3
3	2	1	1	1	1/3
4	3	1	1	1	1/3
5	5	3	3	3	1

Таблица 8.

Матрица парных сравнений значимости определяющих параметров ОЛВКТС по шкале Саати для параметра «Максимальный динамический фактор»

№ параметра из таблицы 1	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1/4	1/5
2	1	1	1	1/4	1/5
3	1	1	1	1/4	1/5
4	4	4	4	1	1/2
5	5	5	5	2	1

Таблица 9.

Матрица парных сравнений значимости определяющих параметров ОЛВКТС по шкале Саати для параметра «Удельная грузоподъемность»

№ параметра из таблицы 1	1	2	3	4	5
1	1	1	1	2	1/4
2	1	1	1	2	1/4
3	1	1	1	2	1/4
4	1/2	1/2	1/2	1	1/6
5	4	4	4	6	1

Применяя формулы (2) к матрицам парных сравнений (таблицы 2 – 9), получим следующие нечеткие множества:

$$\begin{aligned}
\tilde{G}_1 &= \left(\frac{0,125}{x_1}, \frac{0,125}{x_2}, \frac{0,125}{x_3}, \frac{0,15}{x_4}, \frac{0,475}{x_5} \right); \\
\tilde{G}_2 &= \left(\frac{0,12}{x_1}, \frac{0,12}{x_2}, \frac{0,12}{x_3}, \frac{0,05}{x_4}, \frac{0,59}{x_5} \right); \\
\tilde{G}_3 &= \left(\frac{0,083}{x_1}, \frac{0,083}{x_2}, \frac{0,083}{x_3}, \frac{0,48}{x_4}, \frac{0,271}{x_5} \right); \\
\tilde{G}_4 &= \left(\frac{0,29}{x_1}, \frac{0,29}{x_2}, \frac{0,29}{x_3}, \frac{0,07}{x_4}, \frac{0,06}{x_5} \right); \\
\tilde{G}_5 &= \left(\frac{0,08}{x_1}, \frac{0,08}{x_2}, \frac{0,08}{x_3}, \frac{0,17}{x_4}, \frac{0,595}{x_5} \right); \\
\tilde{G}_6 &= \left(\frac{0,08}{x_1}, \frac{0,15}{x_2}, \frac{0,15}{x_3}, \frac{0,16}{x_4}, \frac{0,46}{x_5} \right); \\
\tilde{G}_7 &= \left(\frac{0,08}{x_1}, \frac{0,08}{x_2}, \frac{0,08}{x_3}, \frac{0,27}{x_4}, \frac{0,49}{x_5} \right); \\
\tilde{G}_8 &= \left(\frac{0,13}{x_1}, \frac{0,13}{x_2}, \frac{0,13}{x_3}, \frac{0,08}{x_4}, \frac{0,53}{x_5} \right).
\end{aligned} \tag{5}$$

Из (5) следует, что вариант схемного решения №5 является лучшим по критериям $G_1, G_2, G_5, G_6, G_7, G_8$ (номера критериев – см. таблицу 1). Вариант схемного решения № 4 является лучшим по критериям G_3 , варианты №№ 1, 2, 3 – лучшими по критерию G_4 .

Наилучшим вариантом будем тот, который одновременно лучший по всем критериям. Коэффициенты весомости определяющих параметров (ранги) были рассчитаны по методике, изложенной в работе [6], имеют различные значения, которые приведены в таблице 10. Нечеткое решение $\tilde{D}$ находим по формуле (3) для неравновесных критериев.

Таблица 10.

Коэффициенты весомости (ранги) параметров, определяющих технический облик
ОЛВКТС

№	Параметр	Значения коэффициентов весомости (ранги)
1	Максимальная скорость движения	0,03
2	Запас хода	0,13
3	Удельная мощность, кВт/т (отношение мощности двигателя к полной массе машины)	0,03
4	Дорожный просвет	0,11
5	Максимальный угол преодолеваемого подъема	0,11
6	Угол поперечной устойчивости	0,44
7	Максимальный динамический фактор	0,04
8	Удельная грузоподъемность (отношение массы перевозимого груза к полной массе машины)	0,11

$$\begin{aligned}
 \tilde{G}_1 &= \left(\frac{0,125^{0,03}}{x_1}, \frac{0,125^{0,03}}{x_2}, \frac{0,125^{0,03}}{x_3}, \frac{0,15^{0,03}}{x_4}, \frac{0,475^{0,03}}{x_5} \right) = \left(\frac{0,94}{x_1}, \frac{0,94}{x_2}, \frac{0,94}{x_3}, \frac{0,95}{x_4}, \frac{0,98}{x_5} \right); \\
 \tilde{G}_2 &= \left(\frac{0,12^{0,13}}{x_1}, \frac{0,12^{0,13}}{x_2}, \frac{0,12^{0,13}}{x_3}, \frac{0,05^{0,13}}{x_4}, \frac{0,59^{0,13}}{x_5} \right) = \left(\frac{0,76}{x_1}, \frac{0,76}{x_2}, \frac{0,76}{x_3}, \frac{0,68}{x_4}, \frac{0,93}{x_5} \right); \\
 \tilde{G}_3 &= \left(\frac{0,083^{0,03}}{x_1}, \frac{0,083^{0,03}}{x_2}, \frac{0,083^{0,03}}{x_3}, \frac{0,48^{0,03}}{x_4}, \frac{0,271^{0,03}}{x_5} \right) = \left(\frac{0,93}{x_1}, \frac{0,93}{x_2}, \frac{0,93}{x_3}, \frac{0,98}{x_4}, \frac{0,96}{x_5} \right); \\
 \tilde{G}_4 &= \left(\frac{0,29^{0,11}}{x_1}, \frac{0,29^{0,11}}{x_2}, \frac{0,29^{0,11}}{x_3}, \frac{0,07^{0,11}}{x_4}, \frac{0,06^{0,11}}{x_5} \right) = \left(\frac{0,87}{x_1}, \frac{0,87}{x_2}, \frac{0,87}{x_3}, \frac{0,75}{x_4}, \frac{0,73}{x_5} \right); \\
 \tilde{G}_5 &= \left(\frac{0,08^{0,11}}{x_1}, \frac{0,08^{0,11}}{x_2}, \frac{0,08^{0,11}}{x_3}, \frac{0,17^{0,11}}{x_4}, \frac{0,595^{0,11}}{x_5} \right) = \left(\frac{0,76}{x_1}, \frac{0,76}{x_2}, \frac{0,76}{x_3}, \frac{0,82}{x_4}, \frac{0,94}{x_5} \right); \\
 \tilde{G}_6 &= \left(\frac{0,08^{0,44}}{x_1}, \frac{0,15^{0,44}}{x_2}, \frac{0,15^{0,44}}{x_3}, \frac{0,16^{0,44}}{x_4}, \frac{0,46^{0,44}}{x_5} \right) = \left(\frac{0,33}{x_1}, \frac{0,43}{x_2}, \frac{0,43}{x_3}, \frac{0,45}{x_4}, \frac{0,71}{x_5} \right); \\
 \tilde{G}_7 &= \left(\frac{0,08^{0,04}}{x_1}, \frac{0,08^{0,04}}{x_2}, \frac{0,08^{0,04}}{x_3}, \frac{0,27^{0,04}}{x_4}, \frac{0,49^{0,04}}{x_5} \right) = \left(\frac{0,90}{x_1}, \frac{0,90}{x_2}, \frac{0,90}{x_3}, \frac{0,95}{x_4}, \frac{0,97}{x_5} \right); \\
 \tilde{G}_8 &= \left(\frac{0,13^{0,11}}{x_1}, \frac{0,13^{0,11}}{x_2}, \frac{0,13^{0,11}}{x_3}, \frac{0,08^{0,11}}{x_4}, \frac{0,53^{0,11}}{x_5} \right) = \left(\frac{0,80}{x_1}, \frac{0,80}{x_2}, \frac{0,80}{x_3}, \frac{0,76}{x_4}, \frac{0,93}{x_5} \right).
 \end{aligned} \tag{6}$$

Пересечение нечетких множеств (6) дает такие степени принадлежности нечеткого решения $\tilde{D}$:

$$\begin{aligned}\mu_{\tilde{D}}(x_1) &= \min(0,94; 0,76; 0,93; 0,87; 0,76; 0,33; 0,90; 0,80) = 0,33; \\ \mu_{\tilde{D}}(x_2) &= \min(0,94; 0,76; 0,93; 0,87; 0,76; 0,43; 0,90; 0,80) = 0,43; \\ \mu_{\tilde{D}}(x_3) &= \min(0,94; 0,76; 0,93; 0,87; 0,76; 0,43; 0,90; 0,80) = 0,43; \\ \mu_{\tilde{D}}(x_4) &= \min(0,95; 0,68; 0,98; 0,75; 0,82; 0,45; 0,95; 0,76) = 0,45; \\ \mu_{\tilde{D}}(x_5) &= \min(0,98; 0,93; 0,96; 0,73; 0,94; 0,71; 0,97; 0,93) = 0,71.\end{aligned}$$

В результате получаем нечеткое множество

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{0,33}{x_1}, \frac{0,43}{x_2}, \frac{0,43}{x_3}, \frac{0,45}{x_4}, \frac{0,71}{x_5} \right\},$$

которое свидетельствует о преимуществе проекта №5 над всеми остальными. Таким образом, проект №5 лучше других одновременно удовлетворяет все критерии с учетом их важности.

Нечеткие множества, показывающие, насколько полно проекты №№ 1...5 удовлетворяют критериям $G_1...G_8$, запишем так:

$$\begin{aligned}x_1 &= \left(\frac{0,94}{G_1}, \frac{0,76}{G_2}, \frac{0,93}{G_3}, \frac{0,87}{G_4}, \frac{0,76}{G_5}, \frac{0,33}{G_6}, \frac{0,90}{G_7}, \frac{0,80}{G_8} \right); \\ x_2 &= \left(\frac{0,94}{G_1}, \frac{0,76}{G_2}, \frac{0,93}{G_3}, \frac{0,87}{G_4}, \frac{0,76}{G_5}, \frac{0,43}{G_6}, \frac{0,90}{G_7}, \frac{0,80}{G_8} \right); \\ x_3 &= \left(\frac{0,94}{G_1}, \frac{0,76}{G_2}, \frac{0,93}{G_3}, \frac{0,87}{G_4}, \frac{0,76}{G_5}, \frac{0,43}{G_6}, \frac{0,90}{G_7}, \frac{0,80}{G_8} \right); \\ x_4 &= \left(\frac{0,95}{G_1}, \frac{0,68}{G_2}, \frac{0,98}{G_3}, \frac{0,75}{G_4}, \frac{0,82}{G_5}, \frac{0,45}{G_6}, \frac{0,95}{G_7}, \frac{0,76}{G_8} \right); \\ x_5 &= \left(\frac{0,98}{G_1}, \frac{0,93}{G_2}, \frac{0,96}{G_3}, \frac{0,73}{G_4}, \frac{0,94}{G_5}, \frac{0,71}{G_6}, \frac{0,97}{G_7}, \frac{0,935}{G_8} \right).\end{aligned}\tag{7}$$

Графики функций принадлежности нечетких множеств (7) приведены на рис. 1.

Рис. 1. Сравнение проектов с учетом важности критериев

Из рис. 1 видно, что проект №5 по всем критериям, кроме G_4 «Дорожный просвет», превосходит остальные проекты.

Выводы

- Разработан метод выбора оптимального схемного решения, отличающийся тем, что выбор проводится в нечетких условиях на основе многокритериального анализа вариантов при равновесных и неравновесных критериях по схеме Беллмана-Заде.
- Анализ конструктивных схем возможной реализации ОЛВКТС для горных условий эксплуатации на базе отечественных серийно выпускаемых агрегатов, проведенный методами нечеткого многокритериального анализа, позволил выбрать оптимальное схемное решение.

Список литературы

1. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет. / Под общ. ред. Б.Н. Белоусова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 728 с.
2. Bellman R.E., Zadeh L.A. Decision-Making in Fuzzy Environment // Management Science. – 1970. – Vol. 17, № 4. – P. 141-160.
3. 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.
4. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

5. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с. [Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, 1980.].
6. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: учебное пособие. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ, 2010. – 316 с.

Procedure of choosing an optimal circuit decision in fuzzy conditions on the basis of multi-criteria analysis of alternatives with equilibrium and non-equilibrium criteria

12, December 2012

DOI: [10.7463/1212.0465867](https://doi.org/10.7463/1212.0465867)

Jileikin M.M., Kalimulin M.R., Miroshnichenko A.V.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

jileykin_m@mail.ru

kalimulin-marat@yandex.ru

avm179@yandex.ru

One of the most important stages during formation of technical characteristics of a new vehicle is carrying out engineering analysis of the product, formation of circuit design which meets obtained values of influential parameters, realization of the draft design. Under these conditions, decision-making means choosing an alternative which simultaneously meets both fuzzy objectives and fuzzy constraints. The authors of the article developed a method of choosing an optimal circuit design which is characterized by selection in fuzzy conditions on the basis of a multi-criteria analysis of alternatives in equilibrium and non-equilibrium criteria according to the Bellman-Zadeh scheme. The analysis of design maps of possible realization of extra-light high Doppler wheeled vehicles for mountain operational conditions on the basis of domestic production units was carried out by the methods of fuzzy multi-criteria analysis and allowed to choose an optimal circuit design.

Publications with keywords:[determine the parameters](#), [formation of the technical aspect](#), [the optimal circuit decision](#), [multi-criteria analysis](#)

Publications with words:[determine the parameters](#), [formation of the technical aspect](#), [the optimal circuit decision](#), [multi-criteria analysis](#)

References

1. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoi gruzopod'emnosti. Konstruktsiia. Teoriia. Raschet* [Wheel vehicles specially the big carrying capacity. Construction. Theory. Calculation]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 728 p.

2. Bellman R.E., Zadeh L.A. Decision-Making in Fuzzy Environment. *Management Science*, 1970, vol. 17, no. 4, pp. 141-160.
3. Rotshtein A.P., Shtovba S.D. Nechetkii mnogokriterial'nyi analiz variantov s primeneniem parnykh sravnenii [Fuzzy multi-criteria analysis of options with the use of pairwise comparisons]. *Izv. RAN. Teoriia i sistemy upravleniia* [Journal of Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2001, no. 3, pp. 150-154.
4. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Design of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow, Goriachaia liniia -Telekom, 2007. 288 p.
5. Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 1980. (Russ. ed.: Saati T. *Priniatie reshenii. Metod analiza ierarkhii*. Moscow, Radio i sviaz', 1993. 278 p.).
6. Iakh"iaeva G.E. *Nechetkie mnozhestva i neironnye seti* [Fuzzy sets and neural networks]. Moscow, Internet-Universitet Informatsionnykh Tekhnologii; BINOM, 2010. 316 p.