

Принятие решений при проектировании железных дорог в нечеткой среде с использованием лингвистических критериев

А. А. Перельгина, В. А. Подвербный✉

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ vpodverbnyi@mail.ru

Резюме

В настоящее время в отечественной железнодорожной отрасли существуют проблемы, связанные с изысканием и проектированием новых железнодорожных линий. Ряд российских и зарубежных ученых посвятили свои труды вопросам проектирования железных дорог. Одним из важных этапов является определение направления для новой железнодорожной линии. На предпроектной стадии бывает сложно или слишком трудно определить точные значения по ряду показателей. На лицо, принимающее решение, ложится большая ответственность. Целью настоящей статьи является применение математического подхода в процессе принятия решений при выборе варианта направления новой железнодорожной линии. Новая железнодорожная линия проектируется в районе с преобладанием карстовых пород, основной задачей является прохождение линии в непосредственной близости к месторождениям каменного угля. Авторами запрокированы четыре варианта железнодорожной линии IV категории. Расчет значений степени предпочтения одного из вариантов оценивается по трем показателям с применением метода анализа альтернативных решений. Метод основан на теории нечетких множеств, использует нечеткое отношение порядка на множестве векторных лингвистических оценок, заданных лицом, принимающим решение. На первом этапе вычисляются степени предпочтения для каждого из вариантов по заданным критериям. На втором этапе вычисляются значения функций принадлежности. Затем степени предпочтения для вариантов рассчитываются согласно заданным критериям. На заключительном этапе показатели сравниваются, и выбирается вариант с наивысшей степенью предпочтения. Применение предлагаемого метода анализа вариантов в условиях неопределенности поможет специалистам в области изысканий и проектирования железных дорог в анализе и обосновании принимаемых решений.

Ключевые слова

оптимальное принятие решений в нечеткой среде, изыскания и проектирование железных дорог, лингвистические оценки, многокритериальный выбор, нечеткое отношение предпочтений

Для цитирования

Перельгина, А.А. Принятие решений при проектировании железных дорог в нечеткой среде с использованием лингвистических критериев / А. А. Перельгина, В. А. Подвербный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 200–208. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).200-208

Информация о статье

поступила в редакцию: 12.12.2020, поступила после рецензирования: 22.12.2020, принята к публикации: 17.01.2021

Decision-making in designing railways in a fuzzy environment using linguistic criteria

А. А. Perelygina, V. A. Podverbnyi✉

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ vpodverbnyi@mail.ru

Abstract

At present, research in the field of railway design is of great scientific and practical importance for solving a number of problems in the transport industry. Often, at the pre-project stage, designers are faced with the task of choosing solutions in conditions of uncertainty associated with incomplete or inaccurate initial data. The aim of the work is to develop a system for supporting project decision-making, to help specialists in the analysis and justification of decision-making on the project. The paper considers an example of making design solutions under uncertainty, based on the theory of fuzzy sets using linguistic estimates. Four variants of the railway line of the fourth category were designed, and the calculation of the degree of preference for the four alternatives is estimated by three indicators. Each of the designed options has its own advantages and disadvantages. To analyze the degree of preference for alternatives, the paper considers the use of the method of analysis of alternative solutions. The method based on the theory of fuzzy sets uses a fuzzy order relation on a set of vector linguistic estimates set by the decision-maker. At the first stage, the values of the membership function of the form are calculated for each r-th criterion. At the second stage, the values of the membership functions are calculated. Next, the degrees of preference for each alternative are calculated according to the specified criteria. At the final stage, the alternatives are compared, and the option with the highest degree of preference is

selected. The application of the proposed method of analysis of variations in conditions of uncertainty will help specialists in the field of survey and design of railroads in the analysis and justification of decisions.

Keywords

optimal decision-making in a fuzzy environment, survey and design of railways, linguistic estimates, multi-criteria selection, fuzzy preference relationships

For citation

Pereygina A. A., Podverbnyi V. A. Prinyatie reshenii pri proektirovanii zheleznykh dorog v nechetkoi srede s ispol'zovaniem lingvisticheskikh kriteriev [Decision-making in designing railways in a fuzzy environment using linguistic criteria]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 200–208. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).200-208

Article Info

Received: 12.12.2020, Revised: 22.12.2020, Accepted: 17.01.2021

Введение

Железнодорожный транспорт занимает ведущее место в транспортной системе страны. В рамках реализации проекта ОАО «РЖД» «Цифровая железная дорога» особое внимание уделяется применению цифровых технологий, математических методов для решения технических задач транспортной отрасли.

Железная дорога является сложной многофункциональной технической системой большого линейного протяжения, располагающейся в различных природных и техногенных условиях. В современных условиях развития транспорта, увеличения грузооборота и пассажирооборота вопрос поиска новых подходов в проектировании железных дорог является актуальным [1].

Проектирование технических систем представляет собой сложный процесс, основанный на последовательности принятия проектных решений. Проекты новых железнодорожных линий разрабатываются с учетом потребностей промышленности, населенных пунктов, других видов транспорта, требований охраны окружающей среды и в соответствии с требованиями нормативных документов [2].

Часто на предпроектной стадии проектировщики сталкиваются с задачами выбора решений в условиях неопределенности, причинами которой являются неполные или неточные исходные данные.

На предпроектной стадии принимаются важные решения о дальнейшем развитии района проектирования. Решения, принимаемые инженерами-проектировщиками на данной стадии в условиях неопределенности и неполных данных чрезвычайно важны, их цена очень высока [3]. Поэтому важным является вопрос разработки системы поддержки принимаемых решений на предпроектной стадии. Такая система поможет специалистам при анализе и обосновании проектных решений в задачах различного уровня сложности. Например, при обосновании стратегий развития объектов мультимодальной транспортной сети и выборе вариантов изменения облика и мощности ее объектов [4], при выборе вариантов развития транспортной инфраструктуры

для мультимодальных перевозок с целью интеграции транспортной системы Российской Федерации в международные транспортные коридоры [5], вариантов развития железнодорожной сети государства с учетом ее транзитного потенциала [6] и вариантов защитных сооружений от опасных природных процессов [7], а также при выборе наилучшего варианта обеспечения надежности железнодорожного пути на основе управления этапами его жизненного цикла [8].

Существует ряд методов принятия проектных решений, направленных на реализацию задач в условиях неопределенности [9–13].

В статье рассмотрен тестовый пример проектирования железнодорожной линии IV категории с учетом региональных особенностей Восточной Сибири. Выбранный участок проектирования располагается в Черемховском районе Иркутской области.

На значительной площади Черемховского района преобладают карстовые породы, что представляет определенные сложности в проектировании железнодорожной линии. Подземные формы карста имеют высокий коэффициент пустотности карбонатных пород (около 20 %) на значительных площадях. Карст на поверхности проявлен в прибрежной части р. Белой и р. Ангары, формы карста разнообразны [14].

Карстовые воронки имеют диаметр от 1–2 до 300 м, глубина их достигает 20 м, преобладают воронки диаметром от 8 до 30 м при глубине 2–10 м, с крутизной стенок от 30 до 50° [14].

Часть воронок заполнена суглинками и на поверхности они проявляются в виде плоских блюдец глубиной 2–5 м. В результате слияния нескольких воронок местами появляются сложные воронки, состоящие из нескольких впадин, разделенных неглубокими перемычками [14].

Проектирование новых железнодорожных линий в районах карстообразования сопровождается дополнительными изысканиями по сбору подробных данных о геологическом строении района проектирования. При помощи геофизической разведки и бурения определяют степень опасности возможных просадок земляного полотна и других сооружений [15].

В проекте железнодорожной линии, при ее прохождении через карстоопасные участки, обязательно предусматривают мероприятия против активизации карстовых процессов, такие как отвод от полотна железной дороги поверхностных вод, устройство преграждающего дренажа подземных вод, ликвидация пустот путем взрывания, заполнение пустот через буровые скважины глинистоцементным раствором и др. [15].

Строительство железных дорог в карстоопасных областях ведут с особой осторожностью, а при проектировании стараются минимизировать прохождение железнодорожной линии по закарстованным участкам.

Следует также отметить, что при соединении опорных пунктов проектируемой железнодорожной линии желательнее обеспечить прохождение линии в непосредственной близости к месторождениям каменного угля в Черемховском районе Иркутской области.

Метод анализа альтернативных решений

В статье рассмотрен пример принятия проектного решения в нечеткой среде с использованием лингвистических оценок с использованием теории нечетких множеств.

Так как на предпроектной стадии сложно и трудно определить точные значения по ряду показателей, предлагается использовать лингвистические оценки, лингвистические оценки критериев, словесные, приближенные оценки.

Один из подходов к решению таких задач на основе теории нечеткой полезности приведен в работе [16]. Здесь предлагается применить метод анализа альтернативных решений в нечеткой среде [17].

Для проведения расчетов и сравнения вариантов необходимо формализовать значения критериев и с помощью расчета количественных значений предпочтительности и дальнейшего ранжирования проектируемых вариантов получить оптимальное решение.

Задачам принятия решений в нечеткой среде присуще существование множества альтернатив.

Исполнение каждой отдельной альтернативы ведет к некоторым последствиям – исходам альтернатив. Альтернативы – варианты решений, квалифицируются по различным показателям эффективности исходов альтернатив [18–24].

Проведение анализа опирается на мнение проектной команды или непосредственно лица, принимающего решения.

Задачу принятия решений можно представить в виде модели:

$$\langle A, E, X, K, P \rangle, \quad (1)$$

где A – множество вариантов проектного решения (множество альтернатив); E – среда задачи, определяющая условия, в которых она решается; X – множество исходов; K – векторный критерий оценки

исходов; P – структура предпочтений (определяет процедуру сравнения оценок $K(X)$) [19].

Каждому отдельному варианту решений (альтернативе) $a_i \in A$, будет соответствовать один единственный детерминированный или случайный исход $x_i \in X$. Исход характеризуется векторной оценкой $K(x_i)$.

Процедура сравнения оценок $K(x_i)$, проходит согласно уставленной ранее структуре предпочтений P [17].

Результатом проведения анализа вариантов (альтернатив) в условиях неопределенности будет являться нахождение наиболее предпочтительного, удовлетворяющего всем ограничениям задачи варианта проектного решения.

Пример принятия решений в нечеткой среде

Задача принятия решений по выбору варианта направления проектируемой железнодорожной линии представлена далее (рис. 1).

Учитывая региональные особенности и цели проектирования железнодорожной линии, были запроектированы четыре варианта направления: $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$: a_1 – южный вариант направления; a_2 – центральный вариант направления; a_3 – северный вариант направления; a_4 – комбинированный вариант направления.

Определены критерии оценок исходов $K = \{K_1, K_2, K_3\}$, где K_r – оценки исходов по критериям: K_1 – длина варианта направления; K_2 – протяженность варианта направления по геологически неблагоприятным карстоопасным участкам района проектирования; K_3 – приближение варианта направления к очагу месторождений каменного угля.

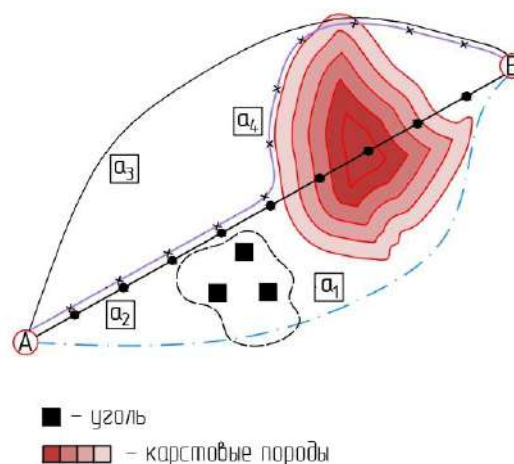


Рис. 1. Варианты проектных решений
Fig.1. Design solution options

Каждый из проектируемых вариантов имеет свои достоинства и недостатки.

Южный вариант направления имеет среднюю протяженность линии, полностью обходит геологически неблагоприятные участки (области закарстованных пород), находится вблизи от очага месторождений полезных ископаемых.

Центральный вариант направления имеет низкую протяженность линии, очень высокую протяженность участков железнодорожной линии, которые проходят по закарстованным местам, при этом линия находится вблизи от очага месторождений полезных ископаемых.

Северный вариант направления имеет высокую протяженность линии, практически максимально обходит геологически неблагоприятные участки (области закарстованных пород), однако имеет очень большое расстояние до очага месторождений полезных ископаемых.

Комбинированный вариант направления трассы имеет очень высокую протяженность линии, частично проходит по закарстованным участкам и находится вблизи от очага месторождений полезных ископаемых.

Решение задачи заключается в определении варианта решения с наибольшим значением отношения предпочтительности:

$$K(a_i) = \frac{\max_j}{i} \sum_r w_r \mu_{\geq}(x_i, x_j). \quad (2)$$

Для каждого варианта a_i и по каждому критерию K_i назначаются оценки в форме нечетких чисел – лингвистических оценок.

Значения оценок по лингвистическим критериям формируют матрицу лингвистических критериев (табл.).

Лингвистические критерии
Linguistic criteria

Варианты направления проектируемой железной дороги	Значения лингвистических критериев по вариантам направления проектируемой железной дороги		
	K_1	K_2	K_3
a_1	С	ОН	ОВ
a_2	Н	ОВ	В
a_3	В	Н	ОН
a_4	ОВ	С	В

Примечание. ОН (очень низкий) = {1,0/1; 0,7/2; 0,2/3}; Н (низкий) = {0,4/1; 0,9/2; 1,0/3; 0,3/4}; С (средний) = {0,4/4; 1/5; 0,8/4; 0,5/7; 0,1/8}; В (высокий) = {0,2/7; 0,7/8; 1,0/9; 0,8/10}; ОВ (очень высокий) = {0,1/8; 0,5/9; 1,0/10}.

Универсальное множество, на котором определены нечеткие числа, представлено в виде десятибалльной шкалы $Y = \{1, 2, \dots, 10\}$ (рис. 2).

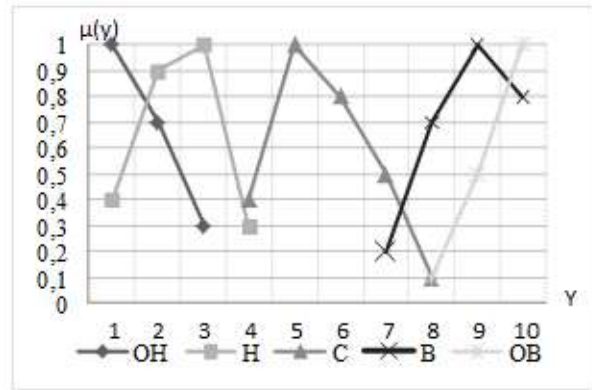


Рис.2. Функции принадлежности нечетких оценок
Fig. 2. Membership functions for fuzzy estimates

Проектная команда или лицо, принимающее решение, задают вектор предпочтений – вектор весовых коэффициентов $W = \{w_1, w_2, w_3\}$, задающих важность каждого критерия.

В данной задаче в качестве лица, принимающего решение, выступают авторы статьи.

Вектор весовых коэффициентов был задан следующим образом: $W = \{0,2; 0,3; 0,5\}$, из чего следует, что для проектировщика наиболее важно пройти вблизи месторождений каменного угля $w_3 = 0,5$, при этом по возможности избегая участков закарстованных пород $w_2 = 0,3$ и не удлиняя чрезмерно вариант направления проектируемой железнодорожной линии $w_1 = 0,2$.

Значения функции принадлежности вычисляются по формуле:

$$\mu_{<}(K_r(a_1), K_r(a_2)), K_r(a_3), K_r(a_4)) = \sum_{s=1}^n p_{K_r(a_1)}(y_s) \left(1 - \sum_{j=1}^s p_{K_r(a_2)}(y_j) \right). \quad (3)$$

Опираясь на формулу расчета вероятности, определяют $(P_A(y))$:

$$p_{K_r(a_i)}(y_s) = \frac{\mu_{K_r(a_i)}(y_s)}{\sum_{y \in S_{K_r(a_i)}} \mu_{K_r(a_i)}(y)}, \quad (4)$$

где $r = 1, 2, 3; i = 1, 2, 3, 4$.

Каждому лингвистическому критерию K_r для проектируемого варианта a_i соответствует оценка, принадлежащая множеству $\{OH, H, C, B, OB\}$; так, например, $K_1(a_1) = C, K_1(a_2) = H$.

Каждой оценке соответствует своя функция принадлежности нечеткого числа (см. рис. 2). Например, $\mu_{K_1(a_1)}(y_1) = 0,4; \mu_{K_1(a_1)}(y_2) = 1$.

Следовательно:

$$\sum_{y \in S_{K_1(a_1)}} \mu_{K_1(a_1)}(y) = 0,4 + 1 + 0,8 + 0,5 + 0,1 = 6,4;$$

$$\sum_{y \in S_{K_1(a_2)}} \mu_{K_1(a_2)}(y) = 0,4 + 0,9 + 1 + 0,3 = 2,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_1(a_3)}} \mu_{K_1(a_3)}(y) = 0,2 + 0,7 + 1 + 0,8 = 2,7;$$

$$\sum_{y \in S_{K_1(a_4)}} \mu_{K_1(a_4)}(y) = 0,1 + 0,5 + 1 = 1,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_2(a_1)}} \mu_{K_2(a_1)}(y) = 1 + 0,7 + 0,2 = 1,9;$$

$$\sum_{y \in S_{K_2(a_2)}} \mu_{K_2(a_2)}(y) = 0,1 + 0,5 + 1 = 1,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_2(a_3)}} \mu_{K_2(a_3)}(y) = 0,4 + 0,9 + 1 + 0,3 = 2,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_2(a_4)}} \mu_{K_2(a_4)}(y) = 0,4 + 1 + 0,8 + 0,5 + 0,1 = 6,4;$$

$$\sum_{y \in S_{K_3(a_1)}} \mu_{K_3(a_1)}(y) = 0,1 + 0,5 + 1 = 1,6;$$

$$\sum_{y \in S_{K_3(a_2)}} \mu_{K_3(a_2)}(y) = 0,2 + 0,7 + 1 + 0,8 = 2,7;$$

$$\sum_{y \in S_{K_3(a_3)}} \mu_{K_3(a_3)}(y) = 1 + 0,7 + 0,2 = 1,9;$$

$$\sum_{y \in S_{K_3(a_4)}} \mu_{K_3(a_4)}(y) = 0,2 + 0,7 + 1 + 0,8 = 2,7;$$

Тогда

$$\mu_{<}(K_1(a_1), K_1(a_2)) = \mu_{<}(C, H) = \frac{0,4}{6,4} \left(1 - \frac{0,4 + 0,9 + 1}{2,6} \right) = 0,007;$$

$$\mu_{<}(K_2(a_1), K_2(a_2)) = \mu_{<}(OH, OB) = 0;$$

$$\mu_{<}(K_3(a_1), K_3(a_2)) = \mu_{<}(OB, B) = \frac{0,1}{1,6} \left(1 - \frac{0,2}{2,7} \right) +$$

$$+ \frac{0,5}{1,6} \left(1 - \frac{0,2 + 0,7}{2,7} \right) + \frac{1,0}{1,6} \left(1 - \frac{0,2 + 0,7 + 1}{2,7} \right) = 0,45.$$

Вычисление нечеткого отношения

$$\mu_{\geq}(K_r(a_1), (K_r(a_2))) :$$

$$\mu_{\geq}(K_r(a_1), (K_r(a_2))) = 1 - \mu_{<}(K_r(a_1), (K_r(a_2))) ;$$

$$\mu_{\geq}(K_1(a_1), K_1(a_2)) = 0,993$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_1), K_2(a_2)) = 1 ;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_1), K_3(a_2)) = 0,55 .$$

Находим степени предпочтения для a_1 :

$$\mu_{\geq}(K(a_1), K(a_2)) = \sum_r w_r \mu_{\geq}^r(a_1, a_2) = 0,2 \times 0,993 + 0,3 \times 1 + 0,5 \times 0,55 = 0,77 .$$

Предпочтительность первого варианта $\mu_{\geq}(a_1) = 0,77$.

Далее произведем расчет степени предпочтения для второго варианта a_2 .

Вычисляем значения функции принадлежности $\mu_{<}(K_r(a_2), (K_r(a_1)))$:

$$\mu_{<}(K_1(a_2), (K_1(a_1))) = \mu_{<}(H, C) = 0 ;$$

$$\mu_{<}(K_2(a_2), (K_2(a_1))) = \mu_{<}(OB, OH) = 0 ;$$

$$\mu_{<}(K_3(a_2), (K_3(a_1))) = \mu_{<}(B, OB) = \frac{0,2}{2,7} (1 - 0) +$$

$$+ \frac{0,7}{2,7} (1 - 0) + \frac{1}{2,7} \left(1 - \frac{0,1}{1,6} \right) + \frac{0,8}{2,7} \left(1 - \frac{0,1 + 0,5}{1,6} \right) = 0,865 .$$

Находим нечеткое отношение $\mu_{\geq}(K_r(a_2), (K_r(a_1)))$:

$$\mu_{\geq}(K_1(a_2), K_1(a_1)) = 1 ;$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_2), K_2(a_1)) = 1 ;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_2), K_3(a_1)) = 0,135 .$$

Находим степень предпочтения проектируемого варианта a_2 :

$$\mu_{\geq}(K(a_2), K(a_1)) = \sum_r w_r \mu_{\geq}^r(a_2, a_1) = 0,2 \times 1 + 0,3 \times 1 + 0,5 \times 0,135 = 0,56 .$$

Предпочтительность второго варианта $\mu_{\geq}(a_2) = 0,56$.

Произведем расчет степени предпочтения третьего варианта a_3 .

Вычисление значения функции принадлежности $\mu_{<}(K_r(a_3), (K_r(a_4)))$:

$$\mu_{<}(K_1(a_3), (K_1(a_4))) = \mu_{<}(B, OB) = \frac{0,2}{2,7} (1 - 0) + \frac{0,7}{2,7} (1 - 0) +$$

$$+ \frac{1}{2,7} \left(1 - \frac{0,1}{1,6} \right) + \frac{0,8}{2,7} \left(1 - \frac{0,1 + 0,5}{1,6} \right) = 0,865 .$$

$$\mu_{<}(K_2(a_3), (K_2(a_4))) = \mu_{<}(H, C) = 0 ;$$

$$\mu_{<}(K_3(a_3), (K_3(a_4))) = \mu_{<}(OH, B) = 0 .$$

Вычисляем нечеткое отношение

$$\mu_{\geq}(K_r(a_3), (K_r(a_4))) :$$

$$\mu_{\geq}(K_1(a_3), K_1(a_4)) = 0,135 ;$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_3), K_2(a_4)) = 1 ;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_3), K_3(a_4)) = 1 .$$

Вычисляем степень предпочтения a_3 :

$$\mu_{\geq}(K(a_3), K(a_4)) = \sum_r w_r \mu_{\geq}^r(a_3, a_4) = 0,2 \times 0,135 + 0,3 \times 1 + 0,5 \times 1 = 0,83 .$$

Предпочтительность третьего варианта $\mu_{\geq}(a_3) = 0,83$.

Рассчитаем степень предпочтения варианта a_4 .

Вычисление значения функции принадлежности $\mu_{<}(K_r(a_4), (K_r(a_3)))$:

$$\mu_{<}(K_1(a_4), (K_1(a_3))) = \mu_{<}(OB, B) = \frac{0,1}{1,6} \left(1 - \frac{0,2}{2,7} \right) +$$

$$+ \frac{0,5}{1,6} \left(1 - \frac{0,2 + 0,7}{2,7} \right) + \frac{1,0}{1,6} \left(1 - \frac{0,2 + 0,7 + 1}{2,7} \right) = 0,45;$$

$$\mu_{<}(K_2(a_4), (K_2(a_3))) = \mu_{<}(C, H) = \frac{0,4}{6,4} \left(1 - \frac{0,4 + 0,9 + 1}{2,6} \right) =$$

$$= 0,007;$$

$$\mu_{<}(K_3(a_4), (K_3(a_3))) = \mu_{<}(B, OH) = 0.$$

Определяем нечеткое отношение $\mu_{\geq}(K_r(a_4), (K_r(a_3)))$:

$$\mu_{\geq}(K_1(a_4), K_1(a_3)) = 0,55;$$

$$\mu_{\geq}(K_2(a_4), K_2(a_3)) = 0,993;$$

$$\mu_{\geq}(K_3(a_4), K_3(a_3)) = 1.$$

Находим степень предпочтения варианта a_4 :

$$\mu_{\geq}(K(a_4), K(a_3)) = \sum_r w_r \mu_{\geq}^r(a_4, a_3) = 0,2 \times 0,55 +$$

$$+ 0,3 \times 0,993 + 0,5 \times 1 = 0,9.$$

Предпочтительность четвертого варианта $\mu_{\geq}(a_4) = 0,90$.

Для удобства работы инженера-проектировщика – лица, принимающего решение, с описанной выше методикой составлена программа в Microsoft Excel (рис. 3).

Следует отметить, что при решении задач выбора в условиях неопределенности при использовании теории нечетких множеств возможны ситуации, при которых выбор неочевиден. В таком случае рекомендуется применять индексы ранжирования [25].

Заключение

В ходе проведенного исследования получены следующие основные выводы:

1. Рассмотрена проблема принятия решений в проектировании железных дорог на предпроектной стадии.

2. Предложен тестовый пример выбора варианта направления проектируемой железнодорожной линии IV категории в Черемховском районе Иркутской области. Линия проектируется с целью обеспечения вывоза каменного угля. Район проектирования характеризуется значительным развитием процессов карстообразования.

3. Задача решена на основе метода анализа альтернативных решений в нечеткой среде.

Запроектированы четыре варианта направления: южный, центральный, северный, комбинированный.

Определены три критерия оценок исходов: длина варианта направления, его протяженность по геологически неблагоприятным карстоопасным участкам района проектирования и приближение к очагу месторождений каменного угля.

Задан вектор весовых коэффициентов $W = \{0,2, 0,3, 0,5\}$.

Определены предпочтительности вариантов:

– первый $\mu_{\geq}(a_1) = 0,77$;

– второй $\mu_{\geq}(a_2) = 0,56$;

– третий $\mu_{\geq}(a_3) = 0,83$;

– четвертый $\mu_{\geq}(a_4) = 0,90$.

Для выбора рекомендуется комбинированный вариант направления с наибольшей предпочтительностью, т. е. четвертый вариант $\mu^{\geq}(a^4) = 0,90 = \max$.



Рис.3. Скриншот программы принятия решений
Fig. 3. Screenshot of the decision-making program

Комбинированный вариант направления проектируемой линии имеет очень высокое значение длины направления, что является некоторым его недостатком, но при этом средняя протяженность участков, проходящих по карстоопасным местам и высокое значение по самому важному, третьему критерию в данной задаче для лица, принимающего решение, – критерию приближения варианта направления к очагу месторождений каменного угля.

Выбор четвертого варианта обоснован.

4. Однако следует заметить, что на выбор варианта направления проектируемой линии значительное влияние оказывает вектор предпочтений – вектор весовых коэффициентов $W = \{0,2; 0,3; 0,5\}$. По-

этому на лицо, принимающие решение, ложится большая ответственность не только по разработке вариантов проектного решения, выбору набора критериев для сравнения вариантов, но и по назначению вектора предпочтений. Впрочем, это не является недостатком метода.

По мнению авторов важно заменить решения, принимаемые интуитивно, на решения, принимаемые на основе современных математических методов.

Теория нечетких множеств и лингвистические оценки по критериям могут успешно применяться в задачах принятия решений в проектировании железных дорог.

Список литературы

1. Перельгина А.А. Пример принятия решения в области проектирования железных дорог / А.А. Перельгина, В.А. Подвербный // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы Девятой Междунар. науч.-практ. конф., 10–13 апреля 2018 г. Иркутск: ИрГУПС, 2018. Т. 1. С. 606–611.
2. Свод правил. Инфраструктура железнодорожного транспорта. Общие требования. СП 237.1326000.2015. Введ. 01.07.2015. М.: Минтранс РФ, 2014. 58 с.
3. Предпроектные соображения по строительству железнодорожного пути по направлению «Окино-Ключевское месторождение угля. Гусиноозерская ГРЭС» / И.В. Благоразумов, К.А. Кирпичников, Е.В. Непомнящих и др. // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2013. Вып. 1. С. 39–42.
4. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V., Shvartcfel V.S. Set-theoretic Model of Strategies of Development for Objects of Multimodal Transport Network // Procedia Engineering, Vol. 165 (2016), Pp. 1547–1555.
5. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V. Strategy development management of Multimodal Transport Network // MATEC Web of Conferences 86, 05024 (2016), IPISE-2016. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168605024>.
6. Перспективы проектирования и строительства железных дорог Монголии / П. Бат-Эрдэнэ, В.А. Подвербный // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. Вып. 3. С. 34–41.
7. Проектирование противоловиных сооружений на Восточно-Сибирской железной дороге / В.А. Подвербный, Е.В. Филатов, Б.П. Мухаров // Особенности проектирования и строительства железных дорог в условиях Дальнего Востока : межвуз. сб. науч. тр.; под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2009. С. 245–255.
8. Ковенькин Д.А. Этапы жизненного цикла верхнего строения железнодорожного пути / Д.А. Ковенькин, В.А. Подвербный // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. под ред. В.С. Шварцфельда. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2015. Вып. 3. С. 151–157.
9. Подвербный В.А. Методы принятия проектных решений в строительстве: учебно-методическое пособие / В.А. Подвербный, П.Н. Холодов, К.М. Титов. Иркутск: ИрГУПС, 2010. 72 с.
10. Алтунин А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: монография / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. Тюменский гос. ун-т. Тюмень, 2000. 352 с.
11. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. Рига: Зинатне, 1990. 184 с.
12. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; перевод с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио связь, 1993. 278 с.
13. Холодов П.Н. Выбор оптимального решения в проектировании железных дорог на основе многокритериальной оценки : дис. канд. техн. наук : 05.22.06 : защищена 12.02.2012 / Холодов Пётр Николаевич. 166 с.
14. Солоненко В.П. Карст Восточной Сибири / В.П. Солоненко // Спелеология и карстология. № 12. Симферополь. 2014. С. 17–25.
15. Кантор И.И. Изыскания и проектирование железных дорог / И.И. Кантор. М.; ИКЦ «Академкнига», 2003. 288 с.
16. Подвербный В.А. Выбор варианта железной дороги на основе критерия нечеткой полезности / В.А. Подвербный // Транспортное строительство. 2000. № 7. С. 10–13.
17. Толмачев С.Г. Принятие проектных решений на основе нечеткого отношения предпочтения / С.Г. Толмачев // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 34–39.
18. Павлов А.Н. Принятие решений в условиях нечеткой информации: учеб. пособие для вузов / А.Н. Павлов, Б.В. Соколов. СПб.: ГУАП, 2006. 72 с.
19. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica Verlag, Heidelberg, 2001. 798 p.
20. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. М.: Мир, 1976. 168 с.

21. Толмачев С.Г. Задача организации единого информационного пространства для поддержки принятия проектных решений в условиях нечеткой исходной информации / С.Г. Толмачев // Изв. ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение. 2013. Вып. 4. С. 29–33.
22. Wang Y.J., Kao C.S., Liu L.J. The Selection of Sales Managers in Enterprise by Fuzzy Multi-criteria Decision-making // Proc. of the Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI 2010), Sanya, China, Oct. 23–24, 2010. Part II. P. 142–151.
23. Ведерников Ю.В. Метод многокритериального предпочтения сложных систем / Ю.В. Ведерников // Информационно управляющие системы. 2009. № 1(38). С. 52–59.
24. Чернов В.Г. Основы теории нечетких множеств. Решение задач многокритериального выбора альтернатив : учеб. пособие / В.Г. Чернов ; Владим. гос. ун-т. Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. 100 с.
25. Подвербный В.А. Выбор проектного решения в нечеткой среде на основе индексов ранжирования / В.А. Подвербный // Железнодорожный транспорт. Серия «Строительство. Проектирование»: ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС. 2000. Вып. 2–3. С. 34–47.

References

1. Pereyagina A.A., Podverbnyi V.A. Primer prinyatiya reshenii v oblasti proektirovaniya zheleznykh dorog [An example of decision making in the field of railway design]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy devyatoi vserossiiskoi nauchno -prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, 10-13 aprelya 2018 g. [Transport infrastructure of the Siberian region: Materials of the Ninth Intern. scientific-practical Conf., April 10-13, 2018]*. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. Vol. 1. Pp. 606–611.
2. Infrastruktura zheleznodorozhnogo transporta. Obshchie trebovaniya: SP 237.1326000.2015. Vved. 01.07.2015. Utv. Priказom Mintransa Rossii No. 208 ot 06.07.2015, 58 str. [Infrastructure of railway transport. General requirements: SP 237.1326000.2015. Introd. January 07, 2015. Approved by the Order of the Ministry of Transport of Russia No. 208 dated July 06, 2015, 58 p.].
3. Blagorazumov I.V., Kirpichnikov K.A., Nepomnyashchikh E.V. et al. Predproektnye soobrazheniya po stroitel'stvu zheleznodorozhnogo puti po napravleniyu «Okino-Klyuchevskoe mestorozhdenie uglya. Gusinoozerskaya GRES» [Pre-project considerations for the construction of a railway track in the direction of “Okino – Klyuchevskoe coal deposit-Gusinoozerskaya GRES”]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog : sb. nauch. tr. [Projecting the development of the regional network of railways: collection of scientific tr.]*. In Shvartsfeld V.S. (ed.) Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2013. Iss. 1. Pp. 39–42.
4. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V., Shvartsfeld V.S. Set-theoretic Model of Strategies of Development for Objects of Multimodal Transport Network. *Procedia Engineering*, Vol. 165 (2016), Pp. 1547–1555.
5. Nesterova N.S., Goncharuk S.M., Anisimov V.A., Anisimov A.V. Strategy development management of Multimodal Transport Network. *MATEC Web of Conferences* 86, 05024 (2016), IPICSE-2016. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168605024>.
6. Bat-Erdene P., Podverbnyi V.A. Perspektivy proektirovaniya i stroitel'stva zheleznykh dorog Mongolii [Prospects for designing and building railways in Mongolia]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog : sb. nauch. tr. [Projecting the development of the regional network of railways: sb. nauch. tr.]*. In Shvartsfel'd V.S. (ed.) Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2015. Iss. 3. Pp. 34–41.
7. Podverbnyi V.A., Filatov E.V., Mukharov B.P. Proektirovanie protivolavinykh sooruzhenii na Vostochno-Sibirskoi zheleznoi doroge [The design of anti-avalanche structures on the East Siberian railway]. *Osobennosti proektirovaniya i stroitel'stva zheleznykh dorog v usloviyakh Dal'nego Vostoka : mezhvuz. sb. nauch. tr. [Features of design and construction of railways in the conditions of the Far East: an interuniversity coll. of acad. articles]*. In Shvartsfel'd V.S. (ed.) Khabarovsk: Publishing House of DVGUPS, 2009. Pp. 245–255.
8. Koven'kin D.A., Podverbnyi V.A. Etapy zhiznennogo tsikla verkhnego stroeniya zheleznodorozhnogo puti [Stages of the railway track structure life cycle]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog : sb. nauch. tr. [Projecting the development of the regional network of railways: the coll. of acad. articles]*. In Shvartsfel'd V.S. (ed.) Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2015. Iss. 3. Pp. 151–157.
9. Podverbnyi V.A. Metody prinyatiya proektnykh reshenii v stroitel'stve: uchebno – metodicheskoe posobie [Methods for making design decisions in construction: a study guide]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2010. 72 p.
10. Altunin A.E., Semukhin M.V. Modeli i algoritmy prinyatiya rechenii v nechetkikh usloviyakh [Models and algorithms of decision-making in fuzzy conditions: a monograph]. Tumen', TGU Publ., 2000. 352 p.
11. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. Prinyatie reshenii na osnove nechetkikh modelei: primery ispol'zovaniya [Decision-making based on fuzzy models: Usage examples]. Riga, Zinatne Publ., 1990. 184 p.
12. Saaty T.L. Prinyatiya reshenii. Metod analiza ierarkhii [Decision-making. The method of the analysis of hierarchies]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 278 p.
13. Kholodov P.N. Vybor optimal'nogo resheniya v proektirovanii zheleznykh dorog na osnove mnogokriterial'noi otsenki: dis. kand. tekhn. nauk: 05.22.06 : zashishena 12.02.02. 166 p. [The choice of the optimal solution in the design of railways based on multi-criteria assessment: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.06: defended February 12, 2012]
14. Solonenko V.P. Karst Vostochnoi Sibiri [Karst of Eastern Siberia]. *Speleologiya i karstologiya [Speleology and karstology]*, No. 12. Simferopol', 2014. Pp. 17–25.
15. Kantor I.I. Izyskanie i proektirovanie zheleznykh dorog [Research and design of railways]. Moscow: IKC “Akademkni-ga” Publ., 2003. 288 p.

16. Podverbnyi V.A. Vybor varianta zheleznoi dorogi na osnove kriteriya nechetkoi poleznosti [The choice of the railway option on the basis of the criterion of fuzzy utility]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction], 2000. No. 7. Pp. 10–13.
17. Tolmachev S.G., Prinyatie proektnykh reshenii na osnove nechetkogo otnosheniya predpocheniya [Adoption of design decisions based on a fuzzy preference relation] *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2014. No. 5. Pp. 34–39.
18. Pavlov A.N., Sokolov B.V. Prinyatiya reshenii v usloviakh nechetkoi informatsii [Decision-making in the conditions of the fuzzy information]. Saint-Petersburg, GUAP Publ., 2006. 72 p.
19. Piegat A. Fuzzy modeling and control. Physica Verlag, Heidelberg, 2001. 798 p.
20. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh reshenii [The concept of a linguistic variable and its application to the approximate solution-making]. Moscow, Mir Publ., 1976. 168 p.
21. Tolmachev S.G. Zadacha organizatsii edinogo informatsionnogo prostranstva dlya podderzhki prinyatiya proektnykh reshenii v usloviyakh nechetkoi iskhodnoi informatsii [The task of organizing a single information space to support the adoption of design decisions in conditions of fuzzy initial information]. *Izvestiya GUAP. Aerokosmicheskoe priborostroeniye* [News of SU-AI. Aerocosmic instrument engineering], 2013. No. 4. Pp. 29–33.
22. Wang Y.J., Kao C.S., Liu L.J. The selection of sales managers in enterprise by fuzzy multi-criteria decision-making. *Proc. of the Intern. Conf. on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI 2010), Sanya, China, Oct. 23–24, 2010.* Part II. P. 142–151.
23. Vedernikov Yu. V. Metod mnogokriterial'nogo predpocheniya slozhnykh sistem [A method of multi-criterion prioritization of complex systems]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2009. No. 1. Pp. 52–59.
24. Chernov V.G. Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv. Reshenie zadach mnogokriterial'nogo vybora al'ternativ : ucheb. posobie [The basics of fuzzy sets theory. Solving problems of multicriterial choice on the basis of geometrical projection of fuzzy sets]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2007. No. 1. Pp. 46–51.
25. Podverbnyi V.A. Vybor proektnogo resheniya v nechetkoi srede na osnove indeksov ranzhirovaniya [The choice of a design solution in a fuzzy environment based on ranking indices]. *Zheleznodorozhnyi transport. Seriya «Stroitel'stvo. Proektirovaniye»* [Railway Transport. Series "Construction. Design"] EI / TSNIITEI IPU Publ., 2000. Iss. 2-3. Pp. 34–47.

Информация об авторах

Перельгина Анастасия Анатольевна – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: perelygina_aa@irgups.ru

Подвербный Вячеслав Анатольевич – д-р техн. наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vpodverbnyi@mail.ru

Information about the authors

Anastasiya A. Perelygina – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: perelygina_aa@irgups.ru

Vyacheslav A. Podverbnyi – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: vpodverbnyi@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).208-215

УДК 519. 542.7

Экспериментальная проверка качества адаптации математической модели контактной сети для расчета частоты колебаний

А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, А. В. Тарасенко ✉

Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Российская Федерация

✉ alessandro-tar@yandex.ru

Резюме

На сегодняшний день одним из главных параметров работы контактной сети является натяжение проводов. Изменение натяжения контактных проводов обеспечивает наибольшее влияние не только на показатели контактной подвески, но и на режим работы системы токосъема. В качестве математической модели предлагается использовать растянутый стержень, позволяющий измерять частоту колебаний контактных проводов в горизонтальной плоскости. Запись колебаний проводов осуществляется с помощью датчика ускорений (акселерометра), который устанавливается между струнами на контактном проводе. Сигнал преобразуется посредством быстрого преобразования Фурье в частотный спектр колебаний. На основании полученных частот определяется натяжение контактных проводов. В статье представлена программа экспериментальных исследований по измерению частот поперечных колебаний контактного провода. Экспериментальные испытания проводились на специальном стенде в лабораторных условиях. Данная программа учитывает факторы, влияющие на частоту колебаний проводов. Для оценки влияния факторов разработана программа полного факторного эксперимента. Полученные расчетные и экспериментальные значения частоты колебаний проводов позволяют оценить адекватность математической модели контактной сети с помощью критерия Фишера и определить среднюю абсолютную ошибку достоверности. Благодаря своевременному контролю натяжения проводов в реальном масштабе времени появляется возможность повысить работоспособность всей системы токосъема, безопасность движения поездов, а также на основе поступающих сведений о нарушениях в работе уточнить прогнозные модели и избежать нерациональных расходов.

Ключевые слова

частота колебаний, натяжение контактного провода, испытательный стенд, полный факторный эксперимент