

ЗАДАЧА ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТНЫХ РАБОТ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ В НЕЧЕТКОЙ ПОСТАНОВКЕ

THE TASK OF PLANNING REPAIR WORK ON THE ROAD NETWORK IN A FUZZY FORMULATION

A. Tesar
O. Ivashchuk

Summary: This article is devoted to the planning of repair and restoration work on sections of the road network. The necessity of dynamic adjustment of the repair work plan is justified considering many factors: weather conditions, availability and quality of road construction materials, traffic intensity, etc. The formalized statements of the planning problem in the form of a clear optimization problem and a planning problem in fuzzy conditions are given. An approach to solving the planning problem in a fuzzy formulation is proposed, which consists in moving from solving one problem in a fuzzy formulation to a set of optimization problems for all levels in a clear formulation.

Keywords: repair work, road network, mobile laboratory, planning, fuzzy staging.

Цесарь Алексей Александрович

Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет
4drv@mail.ru

Иващук Ольга Александровна

Доктор технических наук, профессор,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет
ivaschuk@bsu.edu.ru

Аннотация. Настоящая статья посвящена вопросам планирования ремонтно-восстановительных работ на участках улично-дорожной сети. Обоснована необходимость динамической корректировки плана ремонтных работ с учетом многих факторов: погодных условий, наличием и качеством дорожно-строительных материалов, интенсивностью движения и др. Приведены формализованные постановки задачи планирования в виде четкой задачи оптимизации и задачи планирования в нечетких условиях. Предложен подход к решению задачи планирования в нечеткой постановке, заключающийся в переходе от решения одной задачи в нечеткой постановке, к множеству задач оптимизации для всех уровней в четкой постановке.

Ключевые слова: ремонтные работы, улично-дорожная сеть, передвижная лаборатория, планирование, нечеткая постановка.

Введение

На протяжении последних лет в г. Москве реализуется широкомасштабная программа ремонта объектов улично-дорожной сети (УДС). Ежегодно ремонтируется более 20 миллионов квадратных метров покрытия. В список объектов включаются как основные магистрали, участки Московской кольцевой автомобильной дороги, так и дороги в административных округах. В программу ремонта включаются участки, для которых достигается наибольший эффект от вложенных затрат на ремонт, что обеспечивает наиболее рациональное распределение выделенных средств. Основу для планирования дают данные диагностики, отражающие фактическое транспортно-эксплуатационное состояние участков дорог [1]. Практика планирования с использованием показателя обеспеченности расчётной скорости движения [2] позволяет присвоить повышенный приоритет тем участкам, которые не соответствуют требованиям по обеспечению безопасности дорожного движения. Использование показателя обеспеченности расчётной скорости движения применимо как в случае выделения достаточного объема финансирования, так и в случае неполного финансового обеспечения. В этом случае опорный план ремонта корректируется за счет подбора альтернативных видов работ (Рис. 1).

Однако план ремонта необходимо динамично корректировать с учетом многих факторов: погодных условий, наличием и качеством дорожно-строительных материалов, интенсивностью движения и др. [3]. Таким образом, в процессе планирования ремонтных работ имеет место нечеткость при описании объекта планирования.

Модели и методы

Формальная постановка четкой задачи оптимизации представляется как $x^* = \underset{x \in C}{\text{Arg max}} \phi(x)$, где $\phi(x)$ — критерий, заданный на множестве допустимых альтернативных действий $C \in X$ [4,5]. Задача определения нечеткой цели трактуется следующим образом [6–8]. Имеется множество альтернативных действий лица, принимающего решение (ЛПР) — X и состояний участков УДС Y . ЛПР могут удовлетворять различные состояния системы в различной степени. При этом основной задачей является достижение цели $\tilde{G} \subseteq Y$, которая представляет нечеткое подмножество состояний участков УДС. Кроме того, действия выбираются в условиях ограничений $\tilde{C} \subseteq Y$, которое также представляет нечеткое подмножество.

Отображение действия в состояние $\tilde{f} : X \rightarrow Y$ представляется нечетким отношением. В такой постановке необходимо выбрать действие, одновременно удовлет-

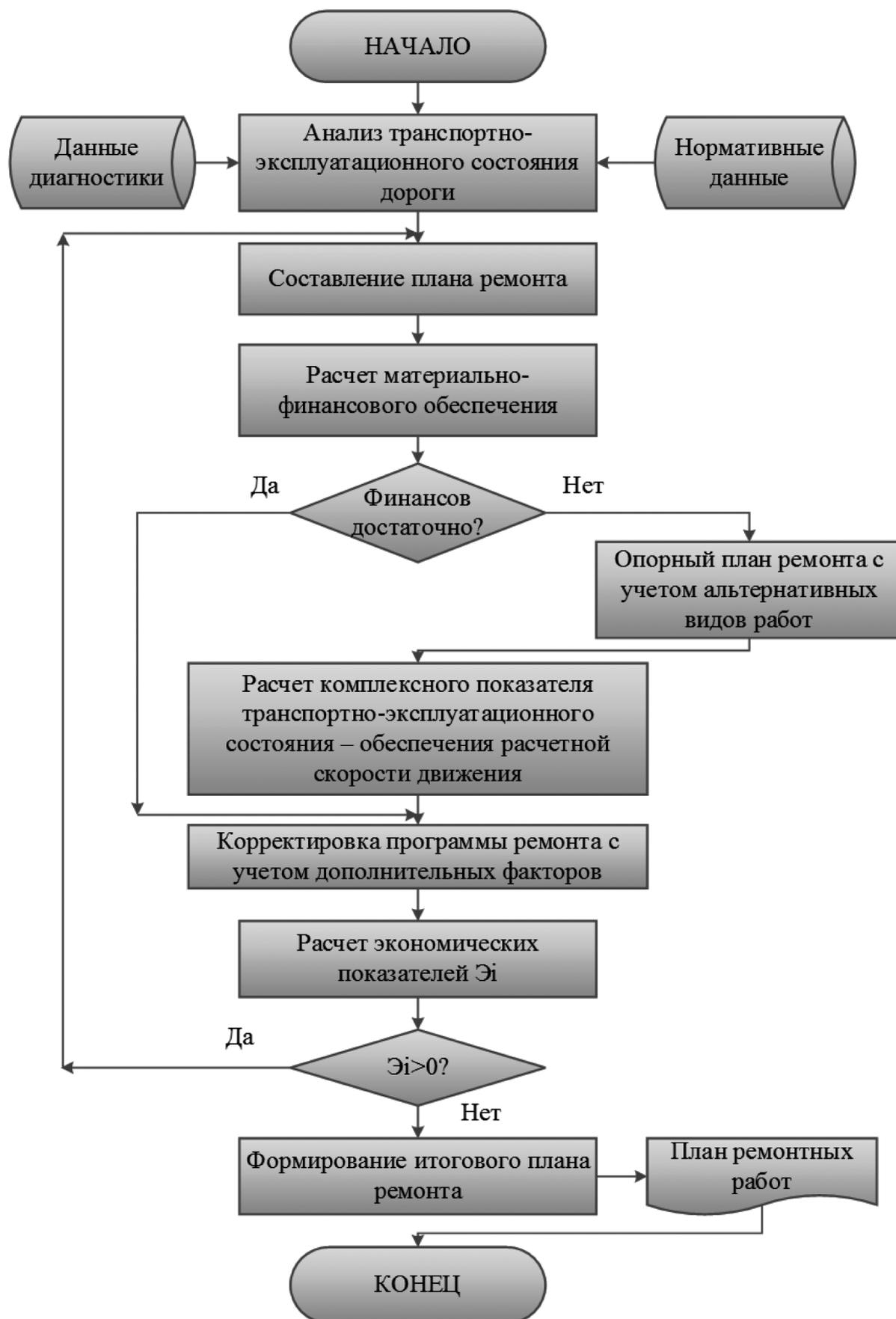


Рис. 1. Алгоритм планирования ремонтно-восстановительных работ

воряющее и цели \tilde{G} и ограничениям \tilde{C} . В случае тождественности отображения \tilde{f} и совпадении множеств действий и результатов цель и ограничения будут представлять нечеткие подмножества множества X . При этом нечеткое множество действий \tilde{D} , удовлетворяющее и цели, и ограничениям, будет определяться пересечением $\tilde{D} = \tilde{G} \cap \tilde{C}$. То есть в нечеткой постановке цели и ограничения выступают симметрично [9–11].

Данный подход к решению оптимизационной задачи при нечетких целях и ограничениях базируется на методе Беллмана–Заде [12], в котором предполагается представление цели и ограничений в одном и том же пространстве.

Формализованное описание задачи планирования в нечетких условиях может быть представлено в виде [13,14]:

$$M = (R, S, P_i, \varphi, f, \psi, \chi, \lambda) \quad (1)$$

где: R — ресурсы; S — внутреннее состояние системы; P_i — программа выполнения решения;

$\varphi : R \times c_i \rightarrow V(R)$ — функционал оценки ресурсов, предназначенных для достижения заданной цели;

f — функционал оценки результата в зависимости от текущего состояния ресурса и решения, где $t \in T = \{1, 2, \dots\}$ — дискретные моменты времени;

$\psi : V(R(t+1)) \times P_{i,l} \rightarrow P_{i,g} (g \in I)$ — функция выбора решения, учитывающая оценку возможных результатов;

$\chi : P_{i,g} \times S \rightarrow P_{i,g}^k$ — функция выбора программы выполнения решения $P_{i,g}$ для заданных внутренних состояний;

$\lambda : P_{i,l} \times S \rightarrow [0, 1]$ — нечеткое бинарное отношение, определяющее оценку программы для заданного внутреннего состояния.

Пусть планируется проведение множества ремонтов, а по одному из них будет оценочная приемка с бальной шкалой $Y = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. При этом для получения соответствующего балла необходима более качественная работа, требующая больших затрат времени и ресурсов [3,15]. Пусть компанию вполне устраивают баллы 4 и 5, совсем не устраивают 1 и 2, бал 3 устраивает частично. Тогда нечеткая переменная цели \tilde{G} будет определяться функцией принадлежности:

$$\mu_{\tilde{G}}(y) = \langle (1 | 0); (2 | 0); (3 | 0,5); (4 | 1); (5 | 1) \rangle \quad (2)$$

Однако в силу параллельной реализации других проектов имеются ограничения. Поэтому если для сдачи объекта при качестве на уровне 1 и 2 не вызывает сомнений, то для остальных это несколько проблематично. Поэтому ограничения \tilde{C} могут быть представлены множеством:

$$\mu_{\tilde{C}}(y) = \langle (1 | 1); (2 | 1); (3 | 0,7); (4 | 0,6); (5 | 0,3) \rangle \quad (3)$$

При этих значениях цели и ограничений пересечение $\tilde{D} = \tilde{G} \cap \tilde{C}$ будет определяться как:

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{D}}(x) &= \min[\mu_{\tilde{G}}(x); \mu_{\tilde{C}}(x)] = \\ &= \langle (1 | 0); (2 | 0); (3 | 0,5); (4 | 0,6); (5 | 0,3) \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

Решение этой задачи также нечетко, но интерпретация результата может быть как «готовиться примерно на четвертый бал по качеству»

Множество недоминируемых действий (UA) для нечеткого описания проблемы будет определяться через функцию принадлежности (ФП), которая может быть представлена как:

$$\mu_{\tilde{R}}^{UA}(x) = \inf_{x' \in X} \sup_{y', y'' \in Y, y'' \in R_{y'}} \min[\mu_{\tilde{G}}(x'); \mu_{\tilde{C}}(x, y'')] \quad (5)$$

Результаты

При формировании плана ремонтно-восстановительных работ на объектах УДС одной из наиболее важных задач является выбор очередного участка, который необходимо включить в опорный план проведения работ. При планировании ремонтно-восстановительных работ на участках УДС выбор предпочтения, в основном определяется ЛПР на основе его субъективных оценок текущей ситуации и динамики цели, а также выбранной структуры этапов решения задачи. Для оценки меры перехода участка УДС из одного состояния в другое, используем аппарат нечетких ситуационных сетей [16–20]. При построении нечеткой ситуационной сети будем использовать обозначения:

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_l\}$ — множество дефектов (характеристических признаков), описывающих динамику текущего состояния участка УДС (колейность, ровность, выбоины, трещины, сеть трещин, ремонтные карты, выбоины);

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ — множество технологических процессов, направленных на ремонт выделенного участка RN (капитальный ремонт, ремонт, ямочный ремонт, содержание);

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ — множество состояний, которое может принимать участок УДС в результате ремонтных операций (ремонт начат, ремонт не начат, ремонт остановлен, ремонт закончен...).

Естественно, что все представленные компоненты (X, Y, S) связаны между собой. При этом имеют место бинарные отношения A и B , которые задают важность характеристических признаков y_i для участка УДС x_k и меру принадлежности каждого признака y_i каждому состоянию s_j . Введем функционалы, которые определяются данными отношениями: $\xi_A : X \times Y \rightarrow [0,1]$ — функция принадлежности A , где $\xi_A(x_e, y_j)$ — определяет важность признака:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} y_1 & y_2 & \dots & y_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_i \end{matrix} & \begin{matrix} \xi_{1,1} & \xi_{1,2} & \dots & \xi_{1,n} \\ \xi_{2,1} & \xi_{2,2} & \dots & \xi_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \xi_{e,j} \\ \xi_{i,1} & \xi_{i,2} & \dots & \xi_{i,n} \end{matrix} \end{matrix}$$

$\mu_B : Y \times S \rightarrow [0,1]$ — функция принадлежности B , где $\mu_B(y_j, s_k)$ определяет меру принадлежности признака:

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} s_1 & s_2 & \dots & s_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{matrix} & \begin{matrix} \mu_{1,1} & \mu_{1,2} & \dots & \mu_{1,m} \\ \mu_{2,1} & \mu_{2,2} & \dots & \mu_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \mu_{j,k} \\ \mu_{n,1} & \mu_{n,2} & \dots & \mu_{n,m} \end{matrix} \end{matrix}$$

Оба эти отношения задаются матрицами, которые, в общем случае, получаются на основании проведения экспертных оценок ЛПР. В качестве ЛПР, как правило, выступает руководитель или группа лиц, обладающих необходимыми полномочиями. Пусть эти матрицы равны:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0.8 & 0.3 & 0.0 & 0.6 & 0.3 & 0.4 & 0.0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0.8 & 0.3 & 0.0 & 0.4 & 0.7 & 0.2 & 0.0 \\ 0.6 & 0.4 & 0.1 & 0.4 & 0.7 & 0.2 & 0.0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0.8 & 0.3 & 0.7 \\ 0.1 & 0.8 & 0.4 & 0.3 & 0.9 & 0.3 & 0.8 \\ 0.3 & 0.6 & 0.2 & 0.6 & 0.3 & 0.1 & 0.9 \\ 0.2 & 0.8 & 0.1 & 0.9 & 0.1 & 0 & 1.0 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0.7 & 0.4 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0.3 & 0.9 & 0.7 & 0.4 & 0.2 \\ 0.1 & 0.0 & 0.2 & 0.7 & 1.0 \\ 0.8 & 1.0 & 0.8 & 0.2 & 0.8 \\ 0.4 & 0.1 & 0.3 & 0.7 & 0.3 \\ 0.1 & 0.4 & 0.7 & 0.9 & 0.1 \\ 0.8 & 0.6 & 0.1 & 0.3 & 1.0 \end{matrix} \end{matrix}$$

Эти две базовые матрицы на основании некоторой композиции позволяют построить матрицу $T = \{t(x_i, s_j)\}$, где $t(x_i, s_j)$ определяют некоторую взвешенную меру предпочтения состояния s_j , в котором должен находиться участок УДС при выборе технологии ремонта x_k .

Преобразование матриц определяет функцию принадлежности нового бинарного отношения на основании выражения:

$$\forall x_i \in X, \forall y_j \in Y, \forall s_l \in S : t(x_i, s_l) = \frac{\sum_y o_A(x_i, y_j) \mu_B(y_j, s_l)}{\sum_y o_A(x_i, y_j)} \quad (6)$$

Если первичные бинарные отношения ξ и μ выпуклы, то можно показать, что полученная функция принадлежности также представляет собой выпуклое нечеткое подмножество [21,22].

В общем случае выпуклая комбинация нечетких множеств определяется следующим образом. $\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n$ — нечеткие величины, определенные на заданных универсальных множествах X_1, \dots, X_n . Определены весовые коэффициенты w_1, \dots, w_n , для которых выполняются условия $\forall i, w_i \geq 0, \sum_{i=1}^n w_i = 1$. Выпуклая комбинация нечетких величин $\tilde{A}_1, \dots, \tilde{A}_n$ представляет собой нечеткую величину \tilde{A} на декартовом произведении универсальных множеств $X = X_1 \times \dots \times X_n$ с функцией принадлежности, которая задается как $\forall x_i \in X_i, \mu_A(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \mu_{A_i}(x_i)$.

Для матрицы W выполняется следующее соотношение:

$$\forall x_i \in X, \forall y_j \in Y, \forall s_l \in S, \lambda \in [0,1]$$

$$t[\lambda(x_1, s_l) + (1 - \lambda)(x_2, s_l)] < \min[t(x_1, s_l), t(x_2, s_l)] \quad (7)$$

Поскольку все преобразования задач и состояний $t(x_i, s_j)$ выпуклые, то по определению пересечение тоже выпукло, на основании чего строится матрица:

$$W = \begin{pmatrix} t(x_1, s_1) \& t(x_1, s_2) \& \dots \& t(x_1, s_k) \\ t(x_2, s_1) \& t(x_2, s_2) \& \dots \& t(x_2, s_k) \\ \dots \& \dots \& \dots \& \dots \\ t(x_n, s_1) \& t(x_n, s_2) \& \dots \& t(x_n, s_k) \end{pmatrix}$$

Введем пороговое значение разбиения множества состояний участка УДС на основании обнаруженных дефектов x_i :

$$\tau(\min_{i,r} \max_x [t(x_i, s_i), t(x_i, s_r)]) \quad (8)$$

Для заданного порогового значения τ это подмножество состояний s_i может быть представлено в виде нечеткого τ -уровневого подмножества:

$$M_i \in M_i$$

$$M_i = \{x / t(x_i) \geq \min_{i,r} \max_x [t(x_i, s_i), t(x_i, s_r)]\} \quad (9)$$

Предположим, что множество технологий $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$, которые некоторым образом характеризуют состояние, разбиты на подмножества $y_1 = \{T_1^1, T_2^1, T_3^1\}$, $y_2 = \{T_1^2, T_2^2\}$, $y_3 = \{T_1^3, T_2^3\}$. Разбиение выполнено таким образом, чтобы связать их элементы с дефектами, для которых они более важны. Так, для x_1 — kolejность важны признаки T_1^1, T_1^2, T_2^3 — характеризующие состояние участка УДС как аварийное.

Применяя соотношение (15) к заданным ранее матрицам бинарных отношений A и B , получим матрицу T :

$$T_{i,j} = \frac{\sum_{j=1}^n A_{i,j} \cdot B_{j,i}}{\sum_{j=1}^n A_{i,j}} \quad (10)$$

$T=$	0.538	0.575	0.475	0.404	0.313
	0.529	0.475	0.400	0.429	0.288
	0.550	0.503	0.363	0.427	0.463
	0.477	0.477	0.377	0.490	0.477
	0.450	0.486	0.403	0.506	0.531
	0.580	0.623	0.407	0.377	0.610
	0.629	0.745	0.468	0.316	0.655

Далее на основании соотношения (16), получим матрицу W :

$W=$	0.520	0.490	0.502	0.434	0.562	0.582	0.592	0.466	0.428	0.573
	0.534	0.416	0.544	0.423	0.450	0.602	0.546	0.508	0.509	0.512
	0.551	0.533	0.401	0.422	0.590	0.564	0.484	0.522	0.610	0.439
	0.429	0.609	0.406	0.412	0.429	0.590	0.559	0.403	0.556	0.448
	0.437	0.475	0.481	0.577	0.516	0.576	0.432	0.489	0.430	0.415
	0.526	0.521	0.468	0.578	0.463	0.597	0.564	0.479	0.450	0.450
	0.519	0.412	0.515	0.421	0.596	0.432	0.605	0.410	0.474	0.488

Затем выполняются процедура поиска максимальных значений в каждом столбце матрицы W :

$$W_{mm} = \{0.551; 0.609; 0.544; 0.578; 0.596; 0.602; 0.605; 0.522; 0.610; 0.573\}$$

После чего ищется минимальный элемент из всех максимальных (он равен 0.522). Если величина порогового значения $\tau = 0.38$, то на основании этой величины получаем перечень наиболее предпочтительных состояний на каждом этапе проведения ремонтных работ:

- $M_1 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$,
- $M_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$,
- $M_3 = \{x_1, x_4, x_5, x_6, x_7\}$,
- $M_4 = \{x_1, x_3, x_4, x_5\}$,
- $M_5 = \{x_1, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$.

Представленные подмножества M_i определяют совокупность состояний, которые представляются целыми на каждом этапе проведения ремонтных работ. Так, состояние s_1 — проводится ремонт, является более предпочтительным во всех случаях, в то время как s_4 — остановлен ремонт, только при наличии дефектов $\{x_1, x_3, x_4, x_5\}$.

Обсуждение результатов

Полученные в результате расчета группы состояний, дают возможность построения фрагмента нечеткой ситуационной сети (Рис. 2), позволяющей разметить дуги сети мерами предпочтений переходов между текущими и целевыми состояниями.

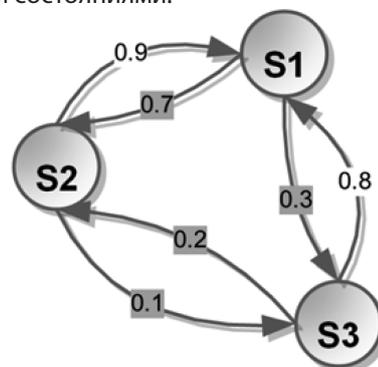


Рис. 2. Нечеткая ситуационная сеть выбора состояний

Бывает, что данной информации недостаточно для определения перехода в одно выбранное состояние s_{i+1} . В связи с этим предполагается рассмотрение альтернативного множества состояний s_{i+1} , характеризующихся совокупностью признаков $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$. В этом случае предполагается, что известны результаты их попарного сравнения по всем признакам [15]. Это задается в виде отношения $\varphi_j, j \in J = \{1, 2, \dots, n\}$ и ставится задача формирования рационального выбора из $(s_{i+1}, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$, используя подобную имеющуюся информацию.

Процедура формирования плана ремонтных работ в нечеткой постановке состоит в последовательном выполнении следующих шагов:

1. Формирование нечеткого отношения Q_1 с функцией принадлежности:

$$\mu_{Q_1}(s_{i+1}, s_{i+k}) = \min(\mu_1(s_{i+1}, s_{i+k}), \dots, \mu_n(s_{i+1}, s_{i+k})) \quad (11)$$

2. Формирование нечеткого подмножества недоминируемых альтернатив (UA) для нечеткого отношения Q_1 :

$$\begin{aligned} (s_2, \mu_{Q_1}) : \mu_{Q_2}^{UA}(s_{i+k}) = \\ = 1 - \sup_{s \in S} [\mu_{Q_2}(s_{i+1}, s_{i+k}), \mu_{Q_1}(s_{i+k}, s_{i+1})] \end{aligned} \quad (12)$$

3. Формирование нечеткого отношения Q_2 в виде свертки отношений:

$$\mu_{Q_2}(s_{i+1}, s_{i+k}) = \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \mu_j(s_{i+1}, s_{i+k}), \text{ где } 0 \leq \lambda \leq 1, \quad (13)$$

4. Формирование нечеткого подмножества UA для нечеткого отношения Q_2 :

$$\begin{aligned} (s_2, \mu_{Q_2}) : \mu_{Q_2}^{UA}(s_{i+1}) = \\ = 1 - \sup_{s \in S} [\mu_{Q_2}(s_{i+k}, s_{i+1}) - \mu_{Q_2}(s_{i+1}, s_{i+k})] \end{aligned} \quad (14)$$

5. Формирование пересечения множеств $\mu_{Q_1}^{UA}$ и $\mu_{Q_2}^{UA}$ и выбор рационального варианта:

$$S_2^{UA} = \{s_{i+1} / s_{i+1} \in S_2, \mu^{UA}(s_{i+1}) = \sup_s \mu(s_{i+1}^1)\} \quad (15)$$

Пусть состояния s_5 и s_9 альтернативные состояния, т. е. $s_2 = \{s_5, s_9\}$. Пусть задана степень допустимости альтернатив $v(s_5) = 0,6$ и $v(s_9) = 1,0$, т. е. $v(s_{i+1})$ определяет степень предпочтения перехода из s_i в s_{i+1} . Пусть каждое из состояний s_5 и s_9 описывается тремя технологиями y_1, y_2, y_3 и заданы три одинаково важных отношения предпочтения $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$:

$$\begin{aligned} \varphi_1 = \{[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 1]; [(s_9, s_5) | 0]; [(s_9, s_9) | 1]\}, \\ \varphi_2 = \{[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; [(s_9, s_5) | 1]; [(s_9, s_9) | 1]\}, \\ \varphi_3 = \{[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; [(s_9, s_5) | 0]; [(s_9, s_9) | 1]\}. \end{aligned} \quad (16)$$

С учетом меры допустимости вариантов отношения $\varphi_j, j = 1, 2, 3$, преобразуем на основании правила $\varphi_j^1 = \begin{cases} 1, \text{если } (s_{j+1}) > v(s_{j+k}) \\ 0, \text{если } (s_{j+1}) \leq v(s_{j+k}) \end{cases}$, которое приводит к следующим результатам:

$$\begin{aligned} \varphi_1^1 = \{[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; [(s_9, s_5) | 1]; [(s_9, s_9) | 1]\}, \\ \varphi_2^1 = \{[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; [(s_9, s_5) | 1]; [(s_9, s_9) | 1]\}, \\ \varphi_3^1 = \{[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; [(s_9, s_5) | 1]; [(s_9, s_9) | 1]\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Находим результирующие отношения предпочтения $\varphi_1^1/\varphi_1, \varphi_2^1/\varphi_2, \varphi_3^1/\varphi_3$:

$$\begin{aligned} \varphi_1^1 | F_1 = \left\{ \begin{aligned} &[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; \\ &[(s_9, s_5) | 0]; [(s_9, s_9) | 1] \end{aligned} \right\}, \\ \varphi_2^1 | F_2 = \left\{ \begin{aligned} &[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; \\ &[(s_9, s_5) | 1]; [(s_9, s_9) | 1] \end{aligned} \right\}, \\ \varphi_3^1 | F_3 = \left\{ \begin{aligned} &[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; \\ &[(s_9, s_5) | 1]; [(s_9, s_9) | 1] \end{aligned} \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Формируем отношение Q_1 с функцией принадлежности

$$\mu_{Q_1}(s_{i+1}, s_{i+k}) = \left\{ \begin{aligned} &[(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; \\ &[(s_9, s_5) | 0]; [(s_9, s_9) | 1] \end{aligned} \right\}.$$

Получаем подмножество UA:

$$\mu_{Q_1}^{UA}(s_{i+1}) = [(s_5 | 1); [s_9 | 1].$$

Далее формируем отношение

$$Q_2 = 1 / 2(\varphi_1(s_5, s_9) + \varphi_2(s_5, s_9) + \varphi_3(s_5, s_9)):$$

$$\begin{aligned} \mu_{Q_2}^{UA}(s_{i+1}, s_{i+k}) = [(s_5, s_5) | 1]; [(s_5, s_9) | 0]; \\ [(s_9, s_5) | 2 / 3]; [(s_9, s_9) | 1] \end{aligned}.$$

Получаем подмножество UA задаваемое

$$\mu_{Q_2}^{UA}(S_2) = [(s_5 | 1 / 3); [s_9 | 1].$$

Результирующее множество UA представляет собой пересечение множеств μ_{Q_1} и $\mu_{Q_2}^{UA}(S_2)$, что дает $\mu^{UA}(S_2) = [(s_5 | 1 / 3); [s_9 | 1]$. В результате, в качестве рационального решения выбирается s_9 с максимальной мерой недоминируемости.

Заключение

В реальных условиях планирования возникает необходимость учета разнообразных факторов, что приводит к нечеткой постановке задачи планирования ремонтно-восстановительных работ. Полученные результаты можно использовать как при постановке задачи планирования в виде четкой задачи оптимизации, так и в случае планирования в нечетких условиях. Причем, и в том случае, когда нечеткими являются только ограничения, а критерий является четким [23]. Предложенный подход к решению задачи планирования в нечеткой постановке, позволяет перейти от решения одной задачи в нечеткой постановке, к множеству задач оптимизации для всех уровней в четкой постановке. Для определения меры предпочтения переходов между текущими и целевыми состояниями при формировании плана ремонтно-восстановительных работ можно использовать аппарат нечетких ситуационных сетей, с применением предложенной авторами процедуры планирования. Описанный подход позволяет проводить составление обоснованного плана проведения ремонтно-восстановительных работ на участках УДС в нечеткой постановке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев, Ю.Э., Немчинов, Д.М., Янковский, Л.В., Кочетков, А.В. Информационное обеспечение системы ремонта улично-дорожной сети мегаполиса. Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Выпуск 3, май — июнь 2014. — С.1–16.
2. Васильев, А.П. Ремонт и содержание автомобильных дорог // Справочная энциклопедия дорожника: в 2 т. — Т. 2. — М.: Информавтодор, 2004. — 1129 с.
3. Васильев, Ю.Э. Статистические методы организации контроля качества при производстве дорожно-строительных материалов / Ю.Э. Васильев, В.В. Каменев, В.Л. Шляфер, А.В. Кочетков // Качество. Инновации. Образование. 2011. № 5. — С. 28–31.
4. Кудрявцев, Е.М. Исследование операций в задачах, алгоритмах и программах. — М.: Радио и связь, 1984. — 183 с.
5. Моисеев, Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. / Н.Н. Моисеев. — М.: Наука, 1975. — 528 с.
6. Алтуни, А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография / А.Е. Алтуни, М.В. Семухин. — Тюмень: Тюменский государственный университет, 2000. — 352 с.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта /Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 312 с. (Проблемы искусственного интеллекта).
8. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А. Н. Борисов и др. М.: Радио и связь, 1989. — 304 с.
9. Chen, L., Pan, W. Review fuzzy multi-criteria decision-making in construction management using a network approach. Applied Soft Computing. 2021, Vol. 102, Iss. 4, 107103. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107103>.
10. Evtifeev, A.A., Zaeva, M.A. Method of Applying Fuzzy Situational Network to Assess the Risk of the Industrial Equipment Failure. Procedia Computer Science. 2021, Vol. 190, pp. 241–245.
11. Rivera-Niquepaа, J.D., De Oliveira-De Jesus, P.M., Castro-Galeano, J.C., Hernández-Torres D. Planning stand-alone electricity generation systems, a multiple objective optimization and fuzzy decision-making approach. Heliyon. 2020, Vol. 6, e03534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03534>.
12. De Campos Sauza, P.V., Lughofer, E., Guimaraes, A.J. An interpretable evolving fuzzy neural network based on self-organized direction-aware data partitioning and fuzzy logic neurons. Applied Soft Computing. 2021, Vol. 112, 107829. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107829>.
13. Zhang, F., Ju Y., Santibanez Gonzalez, E.R.D., Wang, A., Dong, P., Giannakis, M. Evaluation of construction and demolition waste utilization schemes under uncertain environment: A fuzzy heterogeneous multi-criteria decision-making approach. Journal of Cleaner Production. 2021, Vol. 313, Iss.1, 127907. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127907>.
14. Zolfaghari, S., Meysam Mousavi, S. A novel mathematical programming model for multi-mode project portfolio selection and scheduling with flexible resources and due dates under interval-valued fuzzy random uncertainty. Expert Systems with Applications. 2021, Vol. 182, Iss. 11, 115207. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115207>.
15. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. Основные положения. ОДН 218.0.006–2002. Утв. распоряжением Минтранса РФ от 03.10.2002 № ИС-840-Р.
16. Di Caprio, D., Ebrahimnejad, A., Alrezaamiri, H., J. Santos-Arteaga, F. A novel ant colony algorithm for solving shortest path problems with fuzzy arc weights. Alexandria Engineering Journal. 2022. Vol. 61, Issue 5, pp. 3403–3415. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.08.058>.
17. Mazzuto, G., Bevilacqua, M., Ciarapica, F.R. A heuristic scheduling algorithm based on fuzzy logic and critical chain project management // International Journal of Project Organization and Management. 2017. Vol. 9. No. 4. Pp. 303–327. <https://doi.org/10.1504/IJPO.2017.088244>.
18. Sidikov, I.H., D. Umurzakova, D. Adaptive Neurofuzzy Regulating System of the temperature Mode of the Drum Boiler, IJARSET, 2019. Vol. 6, Issue 1, pp. 7869–7873.
19. Wanga, L., Yang, H.Y., Zhang, S.W., Huang, H., Zhou, J. Intuitionistic Fuzzy Dynamic Bayesian Network and its Application to Terminating Situation Assessment. Procedia Computer Science. 2019, Vol. 154, pp. 238–248.
20. Zadeh, L.A. Fuzzy Sets / L.A. Zadeh // Information and Control, 1965. Vol.8, — pp. 338–353.
21. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. — 576 с.
22. Zhao, B., Chen, H., Gao, D., Xu, L. Risk assessment of refinery unit maintenance based on fuzzy second generation curvelet neural network. Alexandria Engineering Journal, 2020. Vol. 59, pp. 1823–1831. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.04.052>.
23. Fernandez-Basso, C., Dolores Ruiz, M., J.Martin-Bautista M. Spark solutions for discovering fuzzy association rules in BigData. International Journal of Approximate Reasoning/ 2021, Vol. 137, pp. 94–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2021.07.004>.

© Цесарь Алексей Александрович (4drv@mail.ru); Иващук Ольга Александровна (ivaschuk@bsu.edu.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»