

## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫХ НЕЧЕТКИХ ВЕЛИЧИН ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Розглянуто питання прогнозування часових характеристик руху вагонопотоків на основі нечіткого моделювання процесу перевезень.

Рассмотрены вопросы прогнозирования временных характеристик движения вагонопотоков на основе нечеткого моделирования процесса перевозок.

Based on the fuzzy modeling of railway operation processes, the issues of forecasting wagons movement periods have been considered.

### Введение

Для описания процессов управления сложными объектами и системами часто используется индуктивный подход к моделированию, позволяющий абстрагировать проблему и ограничиться построением более простой модели. В работе рассмотрено решение задачи прогнозирования временных параметров движения вагонопотоков. Анализ данных наблюдений показывает, что эти параметры имеют значительный разброс значений и не обладают свойством статистической однородности. Для моделирования такого рода процессов может быть успешно использована теория нечетких множеств [1]. Представление характеристик сложных объектов и процессов с использованием нечетких величин, моделей и методов нечеткого вывода достаточно известно в областях моделирования, анализа и управления. Разработка систем нечетких величин  $V_i(\mu, X)$ , с выбором значения  $X$  и соответствующей степени принадлежности  $\mu$ , представляет основной этап моделирования. Для построения баз знаний продукционных экспертных систем образуют пары из нечетких величин вида  $\pi_k(X_i^{(k)} \rightarrow X_j^{(k)})$ ,  $i, j \in N$ . При этом стандартная процедура поиска решений, нечеткий вывод, на основе моделей  $\{V_i(\mu, X)\}_N$  и  $\pi_k(X_i^{(k)} \rightarrow X_j^{(k)})$  с учетом степени соответствия переменных-посылок текущей ситуации состоит из следующих этапов:

1) расчет уровня соответствия  $\alpha_k$  всех переменных-посылок текущей ситуации;

2) модификации нечетких величин заключений  $X_j^{(k)}$  с использованием  $\alpha_k$ :  $\bar{X}_j^{(k)}(\alpha_k)$ ;

3) суперпозиция модифицированных переменных-заключений всех правил;

4) дефазификация – определение значения, которое принимается в качестве результирующего для переменной-заключения. При этом для интерпретации результата используют принцип максимума функции принадлежности, развитый в работах Р. Беллмана и Л. Заде.

В задачах моделирования процесса перевозок выбор способа представления данных для применения методов нечетких экспертных систем является важным этапом в построении модели. Он определяющим образом влияет как на точность, так и на область адекватности модели.

### Метод построения функции принадлежности для дискретных нечетких множеств

В работе [2] Р. Ягером предложен метод определения степеней принадлежности элементов нечеткого множества через оценку вероятности попадания величины в уровневые множества. Такая оценка может быть получена в результате обработки мнений экспертов. Методология основана на том, что если известны вероятности, с которыми экспертом выбираются элементы уровневых множеств заданного нечеткого подмножества, то эту информацию можно использовать для определения степеней принадлежности элементов.

Алгоритм определения степеней принадлежности следующий:

1. С каждым элементом множества  $x_i$  связывается величина  $T_i$ , характеризующая число появлений  $x_i$  в уровневых множествах.
2. Определяется объем выборки  $M$ , необходимый для успешной работы.

3. Единичный интервал делится на  $M$  частей равной длины, которые формируют множество  $S$ .
4. Выбирается случайным образом без возвращения элемент  $\alpha$  из  $S$ .
5. Выбираются все элементы  $X$ , принадлежащие множеству уровня  $\alpha$ .
6. Если  $k$  – число элементов, включенных в множество уровня, то каждому элементу  $x_i$  из этого множества уровня добавляется  $\frac{1}{k}$  к  $T_i$ .
7. Повторяются шаги 4–6, пока не будут использованы все  $\alpha$  из  $S$ .
8. Рассчитываются оценки вероятностей  $P(x_i): P(x_i) = \frac{T_i}{M}$ .
9. Оценки вероятностей  $P(x_i)$  упорядочиваются по возрастанию, и выполняется расчет степеней принадлежности элементов  $X$  по следующим формулам:

$$\mu_1 = nP(x_1),$$

$$\mu_2 = (n-1)P(x_2) + P(x_1),$$

$$\mu_3 = (n-2)P(x_3) + P(x_2) + P(x_1),$$

...

$$\mu_k = (n-k+1)P(x_k) + \sum_{i=1}^{k-1} P(x_i),$$

...

$$\mu_{n-1} = 2P(x_{n-1}) + \sum_{i=1}^{n-2} P(x_i),$$

$$\mu_n = \sum_{i=1}^n P(x_i).$$

Существенной особенностью метода является то, что он предназначен для работы с конечным нечетким множеством и дискретными величинами. Модели большинства процессов и систем описываются непрерывными параметрами.

### Метод определения функции принадлежности для непрерывного нечеткого множества

В задачах управления транспортными системами используются непрерывные величины, задающие время движения вагона. При этом необходимо определять степень принадлежности не элемента множества, а временного диапазона. Диапазон для уровня с более высокой степенью принадлежности должен быть вло-

жен в диапазон для уровня с более низкой степенью принадлежности, то есть функция принадлежности является унимодальной, что не выполняется для реальных данных наблюдений в задачах управления вагонопотоками (рис. 1–3).

В настоящей работе предложен метод определения функции принадлежности нечеткого множества для непрерывных величин, в основе которого лежит предложенный Р. Ягером подход. В связи со сложностью транспортной системы и большим объемом данных функции эксперта необходимо заменить автоматизированной процедурой обработки данных наблюдений из обучающей выборки.

Для построения характеристик вагонопотоков на основе нечеткой модели используется информация о временах движения каждого вагона  $\{t_i\}, i=1, N$  между заданными станциями, взятая за определенный период и по нужному роду подвижного состава, так как характеристики движения для различного рода подвижного состава существенно отличаются.

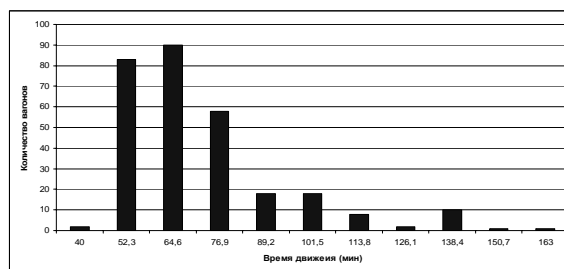


Рис. 1. Время движения между станциями Нижнеднепровск-Узел и Сухачевка

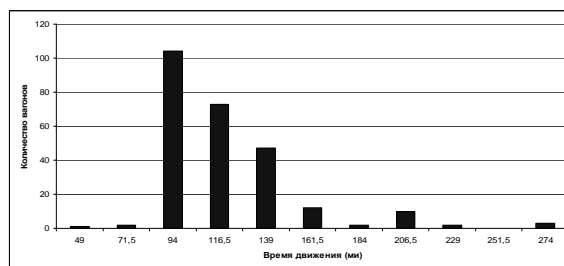


Рис. 2. Время движения между станциями Знаменка и Пятихатки

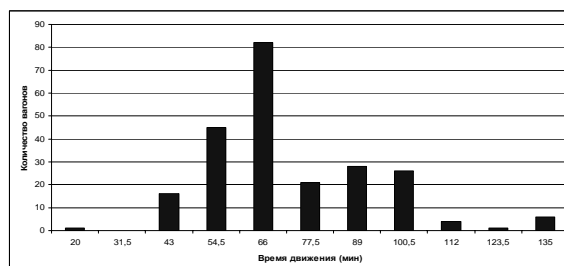


Рис. 3. Время движения между станциями Знаменка и Користовка

Учитывая, что для задач управления вагонопотоками нечеткое множество является непрерывным, оценивать по методу Р. Ягера будем временные интервалы. Для этого на первом этапе определяются количество и границы временных интервалов. Именно эти интервалы и являются элементами нечеткого множества, степень принадлежности которых множеству необходимо определить. На втором этапе, имитируя решения эксперта, необходимо оценить вероятности соответствия элементов множествам уровня и рассчитать степени принадлежности по предложенной Р. Ягером методике.

Таким образом, для использования метода Ягера необходимо предложить метод определения интервалов непрерывных величин и автоматизированную процедуру выбора множества уровня для каждого временного интервала.

#### Алгоритм определения временных интервалов

1. По экспериментальным данным о временах движения вагонов определяются  $t_{\min}$  и  $t_{\max}$ .
2. Выполняется дискретизация  $[t_{\min}, t_{\max}]$  на  $M$  непересекающихся интервалов  $\{[t_{\min}, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{M-1}, t_{\max}]\}$ ,  
 $t_{\min} < t_1 < t_2 < \dots < t_{M-1} < t_{\max}$ .
3. Определяется количество вагонов, времена движения которых попали в каждый интервал:  $\{k_i\}, i = 1, M$ .
4. Вводятся уровни  $\alpha_j$  путем деления диапазона  $[0, 1]$  на  $N$  равных частей.
5. Находится  $K = \max_{i=1, M} k_i$ .
6. Для каждого  $\alpha_j$  находятся  $t_{\min}^{\alpha_j} = \min_{i=1, M} t_i$  и  $t_{\max}^{\alpha_j} = \max_{i=1, M} t_i$  среди только тех  $t_i$ , для которых выполняется условие  $k_i \geq K \frac{j}{N}$  (рис. 4).

Далее, для множества, элементами которого являются построенные временные интервалы, применяем методику Р. Ягера. При этом, имитируя решения эксперта, к каждому  $\alpha$ -уровню относим все временные величины,

попавшие в соответствующий этому уровню интервал  $[t_{\min}^{\alpha_j}, t_{\max}^{\alpha_j}]$ .

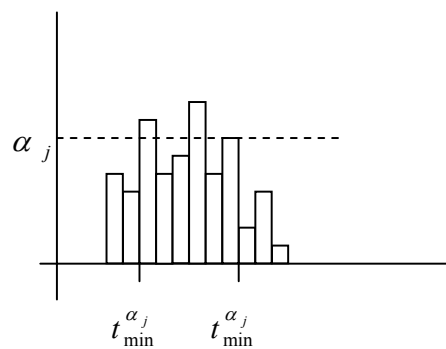


Рис. 4. Определение временного интервала для уровня  $\alpha_j$

Использование результатов повагонного информационного моделирования транспортных потоков позволяет идентифицировать структуру и рассчитать оценки параметров нечетких графов, характеризующих движение вагонов различного рода, в котором узлы – это станции, а дуги – пути движения вагонов. Множество узлов, дуг графа и веса дуг зависят от рода подвижного состава и от характеристик движения за взятый период.

Поскольку узлы графа соответствуют станциям, изменение местоположения вагона означает его перемещение по дуге графа, соединяющей разные станции. Выполнение операции на одной станции без перемещения вагона соответствует петле графа.

В графовой модели вес дуги является обобщенной характеристикой, он учитывает временные параметры движения и простоев на станциях всех вагонов за заданный период, а также величину вагонопотока.

В качестве модели, определяющей время движения по дуге, будем принимать нечеткую величину, построенную по предложенной выше методике.

Основным методом оценки значений временных характеристик вагонопотока для решения задачи прогнозирования времени движения вагона является построение нечеткого аналога топологического уравнения Мейсона [3]. Уравнение используется для определения характеристик специально введенной дуги. Такая дуга является эквивалентной заменой всего нечеткого потокового графа.

#### Выводы

В статье разработан метод моделирования непрерывных нечетких величин по эксперимен-

тальным данным, который основан на переходе от непрерывной величины к дискретной; предложен критерий для автоматизации определения принадлежности элемента множеству уровня; разработана процедура определения интервала, соответствующего заданному уровню принадлежности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст]: пер. с польск. / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия - Телеком, 2004. – 452 с.
2. Ягер, Р. Р. Множества уровня для оценки принадлежности нечетких подмножеств [Текст] // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: пер. с англ. / под ред. Р. Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 71-78.
3. Прогнозирование показателей движения вагонов иностранных собственников на основе нечетких моделей исходных данных. [Текст] / В. А. Андриющенко и др. // Вестник Днепроп. нац. ун-та жел.-дор. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – 2003. – Вып. 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2003. – С. 84-90.

Поступила в редколлегию 08.07.2008.