

В. А. АНДРЮЩЕНКО, В. В. СКАЛОЗУБ (ДИИТ), В. В. ВЕЛИКОДНЫЙ (Укрзализныця),  
С. Ю. ЦЕЙТЛИН (Информационно-статистический центр Приднепровской ж. д.)

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНОВ ИНОСТРАННЫХ СОБСТВЕННИКОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Побудовано аналоги топологічних рівнянь Мейсона для нечітких потокових графів. Розглянуто питання прогнозування строків руху інованів на основі нечітких даних про процеси перевезень.

Построены аналоги топологических уравнений Мейсона для нечетких потоковых графов. Рассмотрены вопросы прогнозирования сроков движения инованов на основе нечетких данных о процессах перевозок.

Analogues have been constructed of Mason topologic equations for flows graphs, described by fuzzy values. Based on the fuzzy data on railway operation processes, the issue of forecasting the foreign-owned wagons movement periods has been considered.

### Постановка задачи прогнозирования

Таблица 1

В связи с разделом вагонного парка стран СНГ стали актуальными задачи контроля сроков пребывания и своевременного возвращения вагонов государствам собственникам, а также разработки методики определения экономической целесообразности попутной погрузки инованов [1].

Одним из основных направлений решения этих задач является изучение и обобщение характеристик вагонопотоков по данным мониторинга процесса перевозок с использованием базы данных вагонной модели дороги (ВМД). На основе полученной информации о свойствах вагонопотоков осуществляется оперативное прогнозирование временных характеристик движения инованов различного рода.

Для решения задачи прогнозирования используются данные о выполнении операций с каждым вагоном (номер вагона, тип операции, дата и время, код станции) из заданного временного интервала, предшествующего прогнозируемому периоду.

Структура и характеристики вагонопотоков определяются с учетом специфики движения разного рода вагонов, а также с учетом технологических и экономических характеристик транспортных подсистем (сетей).

Сравнительный анализ данных ВМД показывает, что для каждого рода вагонов характерны свои особенности в объемах и сроках перевозок (табл. 1). Причем, разнородные вагонопотоки имеют не только количественные, но и качественные различия в структуре движения по транспортной сети.

### Среднее время движения инованов за период с 01.01.2002 по 15.05.2002

Участок	Крытые	Платформы	Полувагоны	Цистерны
Синельниково1 – Запорожье Левое	139,2	132,2	113,1	129,2
Синельниково1 – Мелитополь	–	215,0	279,0	279,4
Синельниково1 – Синельниково1	75,9	65,0	49,4	62,0
Запорожье Левое – Запорожье Левое	1687,6	1073,4	972,7	849,6
Запорожье Левое – Мелитополь	–	220,0	–	195,7

Рис. 1 показывает нестационарность параметров вагонопотоков. Например, рассмотрение параметров времени движения цистерн по сети за первую и вторую половину рассматриваемого периода позволило установить, что гипотеза о равенстве математического ожидания времен движения за первую и вторую половину анализируемого периода верна с уровнем значимости 0,2. Это свидетельствует о том, что различие средних значений за исследуемый период не является случайным, а временные параметры движения вагонов нестационарны. Анализ данных ВМД о движении инованов по полигону железных дорог, подобных рис. 1, не дает достаточных оснований для однозначного принятия основной гипотезы теории вероятности: о статистической однородности и несвязанности неконтролируемых в опытах процессов, которые вызывают стохастический ха-

раक्टर параметров железнодорожных перевозок [2]. При этом правомерным является применение моделей и методов, которые не требуют такого рода допущений. Далее будем рассматривать нечеткие модели данных [3], характеризующие процесс перевозок.

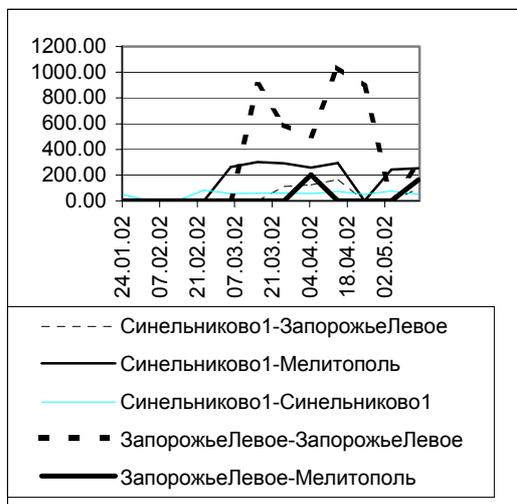


Рис. 1. Среднее время движения вагонов (цистерны)

### Прогнозирование с использованием нечетких множеств

При решении задачи прогнозирования в условиях, когда сложность объекта снижает эффективность традиционных методов, более успешно могут быть применены методы теории нечетких множеств [3], в частности, обеспечивающие получение прогнозов на основе продукционных правил [6].

Использование результатов повагонного моделирования неоднородных транспортных потоков на базе ВМД позволяет идентифицировать структуру и рассчитать оценки параметров нечетких графов, характеризующих движение вагонов различного рода, в котором узлы – это станции, а дуги – пути движения вагонов (рис. 2). Множество узлов, дуг графа и веса дуг зависят от рода подвижного состава и от характеристик движения за взятый период [4].

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 параметры движения и простоев на станциях всех вагонов за заданный период. Считается, что вес дуги имеет две составляющих – объемную и

временную. Объемная отражает относительную часть вагонопотока, который перемещается по дуге, временная – время перехода по дуге в минутах.

В качестве модели, определяющей время движения по дуге, будем принимать треугольную нечеткую величину  $(T_{\min}, T_i^*, T_{\max})$  [2; 3], где  $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  – минимальное и максимальное время перехода по дуге,  $T_i^*$  – время перехода, отмеченное у наибольшего количества вагонов за анализируемый период.

Объемная характеристика дуги описывается треугольной нечеткой величиной  $(\alpha_{\min}, \alpha_i^*, \alpha_{\max})$ , отражающей относительную долю вагонопотока дуги в общем выходе потока из узла.

Основным методом оценки значений временных характеристик вагонопотока для решения задачи является построение нечеткого аналога топологического уравнения Мейсона [5]. Уравнение используется для определения характеристик дуги, которая является эквивалентной заменой всего нечеткого потокового графа [4].

Охарактеризуем выполнение дуг графа  $G(U, \tilde{W})$  аналогом производящей функции ГЕРТ–систем [5] в форме пары двух нечетких величин  $\tilde{w}_{ij} = (\tilde{T}_{ij}; \tilde{\alpha}_{ij})$ , где величина  $\tilde{\alpha}_{ij}$  устанавливает, что операция дуги  $(i, j)$  будет иметь место, если имеет место узел  $i$ , а  $\tilde{T}_{ij}$  – временная характеристика этой операции. Величина  $\tilde{\alpha}_{ij}$  характеризует объемную составляющую дуги. Определим эквивалентные преобразования нечеткой сети  $G(U, \tilde{W})$  при ее «стягивании» в один узел для следующих случаев:

- п1) замена последовательности дуг  $(\tilde{w}_{ij}, \tilde{w}_{jk}) \Leftrightarrow \tilde{w}_{ik}$ ;
- п2) параллельные дуги  $(\tilde{w}_{ij}^a, \tilde{w}_{ij}^b) \Leftrightarrow \tilde{w}_{ij}^{a+b}$ ;
- п3) композиция элементов сети петля – дуга  $(\tilde{w}_{ii}^a, \tilde{w}_{ij}) \Leftrightarrow \tilde{w}_{ij}^a$ ;
- п4) две вложенные петли в узле – дуга  $(\tilde{w}_{ii}^a, \tilde{w}_{ii}^b, \tilde{w}_{ij}) \Leftrightarrow \tilde{w}_{ij}^{a \times b}$ .

Структура с вложенными петлями введена дополнительно к [5]. Ее производящая функция равна произведению рядов, порожденных петлями. В табл. 2 приведены алгоритмы расчета эквивалентных параметров преобразованных подсетей как нечетких треугольных величин.

Расчет нечетких характеристик эквивалентных подсетей

№ n/n	ГЕРТ-операции преобразования сетей	Аналоги операций над нечеткими дугами	Расчет эквивалентных величин
п1	$w_{ij} \times w_{jk} = w_{jk}$	$\tilde{w}_{ij} \tilde{+} \tilde{w}_{jk} = \tilde{w}_{jk}$	$(\tilde{T}_{ij} \tilde{+} \tilde{T}_{jk}; \tilde{\alpha}_{ij} \tilde{\times} \tilde{\alpha}_{jk})$
п2	$w_{ij}^a + w_{ij}^b = w_{ij}^{(a+b)}$	$(\tilde{w}_{ij}^a \circ \tilde{w}_{ij}^b) = \tilde{w}_{ij}^{(a+b)}$	$((\tilde{T}_{ij}^a \circ \tilde{T}_{ij}^b); \tilde{\alpha}_{ij}^a \tilde{+} \tilde{\alpha}_{ij}^b)$
п3	$w_{ij} / (1 - w_{ii}^a) = w_{ij}^a$	$\tilde{w}_{ij} \tilde{+} (1 - \alpha_{\Delta ii}^a)^{-1} \tilde{*} \tilde{T}_{ii}^a = \tilde{w}_{ij}^a$	$(\tilde{T}_{ij} \tilde{+} \text{inv}(1 + \text{im}(\tilde{\alpha}_{ii}^a)) \tilde{\times} \tilde{T}_{ii}^a; \tilde{\alpha}_{ij})$
п4	не определена	$\tilde{w}_{ij} \tilde{+} \prod_s ((1 - \alpha_{\Delta ii}^s)^{-1} \tilde{*} \tilde{T}_{ii}^s)$	$(\tilde{T}_{ij} \tilde{+} \text{inv}(1 + \text{im}(\tilde{\alpha}_{ii}^a)) \tilde{\times} \tilde{T}_{ii}^a \tilde{\times} \text{inv}(1 + \text{im}(\tilde{\alpha}_{ii}^b)) \tilde{\times} \tilde{T}_{ii}^b; \tilde{\alpha}_{ij})$

В таблице знаками  $\{\tilde{+}, \tilde{\times}\}$  обозначены операции нечеткого сложения и умножения соответственно, а  $\text{im}(*), \text{inv}(*)$  – являются операциями построения изображения и инверсии нечетких треугольных величин [3]. Знаком  $\{\circ\}$  обозначена операция суперпозиции нечетких величин. Константа 1 как «треугольная» величина представляется тройкой (1, 1, 1). Измененные по сравнению с [4] формулы расчета эквивалентных величин (4-й столбец из табл. 2) позволяют вычислять как временные, так и объемные характеристики вагонопотоков.

#### Метод расчета нечетких характеристик вагонопотоков по данным мониторинга процесса перевозок

Для определения характеристик вагонопотоков на основе нечеткой модели используются данные ВМД, взятые за предыдущий период по определенному роду подвижного состава. Исходные данные описывают местоположение каждого вагона и точное время окончания каждой проводимой с вагоном операции.

Алгоритм построения нечетких треугольных характеристик следующий:

1) расчет времени выполнения операций. Время выполнения операции определяется как разность времен окончания последующей и предыдущей операции;

2) определение весов дуг графа. Вес дуги имеет две составляющих – объемную и временную;

3) для определения временной характеристики дуги разобьем временной интервал ( $T_{\min}$ ,

$T_{\max}$ ) движения на  $N$  интервалов и построим распределение частот для количества вагонов по каждому временному участку. В качестве временной характеристики дуги принимаем треугольную нечеткую величину в виде тройки времен ( $T_{\min}, T_i^*, T_{\max}$ ), где  $T_i^*$  – интервал, на котором распределение имеет максимум;

4) для определения объемной характеристики дуги временной интервал наблюдения разбивается на  $K$  участков и по распределению частот относительного количества вагонов, проходящих по каждой дуге, выходящей из узла, принимается треугольная нечеткая величина ( $\alpha_{\min}, \alpha_i^*, \alpha_{\max}$ ) в качестве объемной характеристики дуги;

5) выполняются эквивалентные преобразования нечеткого графа с использованием операций из табл. 2.

#### Пример расчета нечетких характеристик

Рассмотрим построение нечеткого графа и расчет эквивалентных характеристик движения цистерн для направления Синельниково-1–Мелитополь Приднепровской дороги.

Данными для идентификации структуры графа являются данные из ВМД за период с 01.01.2002 по 15.05.2002.

Для цистерн узлами графа являются станции Синельниково-1, Запорожье-Левое, Запорожье-1, Запорожье-2, Мелитополь (рис. 2).

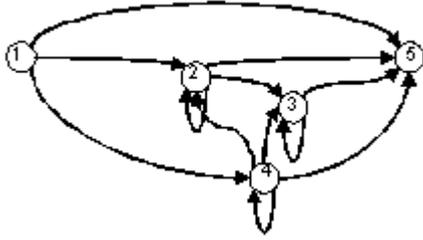


Рис. 2. Граф движения вагонопотоков (цистерны):  
1 – Синельниково-1; 2 – Запорожье-Левое;  
3 – Запорожье-2; 4 – Запорожье-1; 5 – Мелитополь

Построенные по приведенному выше алгоритму нечеткие временные характеристики дуг имеют значения:

$$\tilde{T}_{12} = (79; 140; 245);$$

$$\tilde{T}_{14} = (100; 130; 270);$$

$$\tilde{T}_{15} = (230; 285; 366);$$

$$\tilde{T}_{22} = (280; 600; 1792);$$

$$\tilde{T}_{23} = (13; 22; 38);$$

$$\tilde{T}_{25} = (163; 200; 211);$$

$$\tilde{T}_{33} = (3; 60; 1033);$$

$$\tilde{T}_{35} = (140; 162; 201);$$

$$\tilde{T}_{42} = (36; 40; 59);$$

$$\tilde{T}_{43} = (12; 13; 14);$$

$$\tilde{T}_{44} = (6; 22; 163);$$

$$\tilde{T}_{45} = (127; 136; 223).$$

Объемные характеристики дуг имеют значения:

$$\alpha_{12} = (0,170; 0,286; 0,395);$$

$$\alpha_{14} = (0,091; 0,194; 0,251);$$

$$\alpha_{15} = (0,463; 0,520; 0,584);$$

$$\alpha_{22} = (0,651; 0,752; 0,840);$$

$$\alpha_{23} = (0,140; 0,193; 0,233);$$

$$\alpha_{25} = (0,050; 0,055; 0,096);$$

$$\alpha_{33} = (0,618; 0,672; 0,728);$$

$$\alpha_{35} = (0,307; 0,328; 0,400);$$

$$\alpha_{42} = (0,083; 0,133; 0,154);$$

$$\alpha_{43} = (0,036; 0,072; 0,131);$$

$$\alpha_{44} = (0,514; 0,578; 0,596);$$

$$\alpha_{45} = (0,163; 0,217; 0,250).$$

Используя нечеткий аналог уравнения Мейсона для замкнутых графов, запишем структурное выражение для оценки времени движения цистерн из Синельниково-1 в Мелитополь:

$$\begin{aligned} \tilde{w}_E = & \tilde{w}_{15} \tilde{+} \left( \tilde{w}_{12} \tilde{+} \tilde{w}_{14} \tilde{\times} \frac{\tilde{w}_{42}}{1 - \tilde{w}_{44}} \right) \tilde{\times} \\ & \tilde{\times} \left( \frac{\tilde{w}_{25}}{1 - \tilde{w}_{22}} \tilde{+} \frac{\tilde{w}_{23}}{1 - \tilde{w}_{22}} \tilde{\times} \frac{\tilde{w}_{35}}{1 - \tilde{w}_{33}} \right) \tilde{+} \tilde{w}_{14} \tilde{\times} \\ & \tilde{\times} \left( \frac{\tilde{w}_{45}}{1 - \tilde{w}_{44}} \tilde{+} \frac{\tilde{w}_{43}}{1 - \tilde{w}_{44}} \tilde{\times} \frac{\tilde{w}_{35}}{1 - \tilde{w}_{33}} \right). \end{aligned}$$

В результате расчетов по правилам из табл. 2 получим

$$\tilde{w}_E = ((227; 327, 72; 3556) (0,52; 0,69; 0,92)).$$

Структура графа движения вагонов разного рода по одному и тому же направлению отличается. На рис. 3 показан граф движения крытых вагонов. Структурное выражение для оценки времени движения крытых вагонов будет иметь вид

$$\begin{aligned} \tilde{w}_E = & \tilde{w}_{45} \tilde{\times} \\ & \tilde{\times} \left( \tilde{w}_{14} \tilde{\times} \tilde{w}_{12} \tilde{\times} \left( \frac{\tilde{w}_{24}}{1 - \tilde{w}_{22}} \tilde{+} \frac{\tilde{w}_{24}}{1 - \tilde{w}_{22}} \tilde{\times} \frac{\tilde{w}_{34}}{1 - \tilde{w}_{33}} \right) \right). \end{aligned}$$

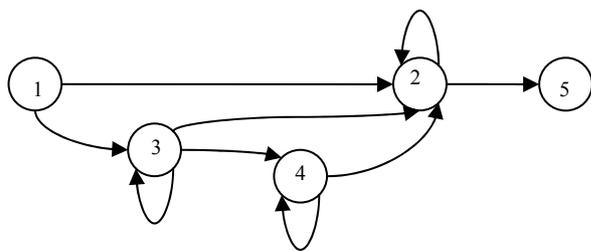


Рис. 3. Граф движения вагонопотоков (крытые вагоны):

1 – Синельниково-1; 2 – Запорожье-Левое;  
3 – Запорожье-2; 4 – Запорожье-1; 5 – Мелитополь

### Построение и использование нечетких правил вывода для прогнозирования параметров движения иновагонов

Построенные выше нечеткие величины применяются для формирования логических правил вывода в прогнозирующей экспертной системе.

Нечеткое правило логического вывода «если  $A$ , то  $B$ » представляет собой упорядоченную пару  $(\tilde{A}, \tilde{B})$ , где  $\tilde{A}$  – нечеткое подмножество пространства входных значений,  $\tilde{B}$  – нечеткое подмножество пространства выходных значений [3; 6]. Нечеткие правила вывода образуют базу правил (БП) системы прогнозирования. Для получения экспертного заключения используются все правила одновременно, но степень их влияния на окончательный результат различна. Особенность процедуры обработки правил состоит в том, что данные о расчетной ситуации, в которой происходит прогнозирование, отличаются от представленных в БП [6]. В нашем случае различие состоит в следующем: правила БП формируются при некотором конкретном распределении общего числа иновагонов по станциям, с учетом относительной части вагонов каждого рода. В ситуации, когда проводится прогнозирование, указанные характеристики отличаются от каждого из представленных в БП правил. Мера соответствия текущих значений распределения вагонов правилам БП характеризует вклад правила в прогнозируемые значения показателей.

Процедура обработки нечетких правил вывода состоит из следующих этапов:

1) вычисление степени истинности частей «если» всех правил – определение степеней принадлежности «текущих» входных значений нечетким подмножествам  $\tilde{A}$  правил вывода, составляющих БП;

2) вычисление нечетких подмножеств  $\tilde{B}_A$ , указанных в частях «то» правил вывода с учетом значений истинности, полученных на первом этапе;

3) суперпозиция полученных подмножеств  $\tilde{B}_A$ .

Для вычисления нечеткого подмножества  $\tilde{B}_A$  для каждого правила выполняется произведение нечетких величин  $\tilde{A}$  и  $\tilde{B}$  по правилу из табл. 2. Суперпозиция или объединение результатов всех правил вывода использует соответствующую операцию из табл. 2. Результатом работы экспертной системы является нечеткая величина «треугольного» вида, характеризующая оценку времени прохождения вагонами определенного рода заданной транспортной подсети. Обработка этих величин методом скаляризации [3] позволяет получить прогноз временных характеристик движения иновагонов.

### Анализ нечетких моделей данных о процессе перевозки вагонов

Для оценки адекватности построенных моделей учитывались все возможные пути движения между начальной и конечной станциями исследуемого участка по данным наблюдений. Использовались данные ВМД о движении всего объема иновагонов (крытых и цистерн) за указанный период. Для крытых вагонов количество узлов графа составило 99, количество дуг – 375, число возможных путей движения – 15020. Для цистерн эти величины имели следующие значения: 85 станций, 278 дуг, 118 возможных путей движения вагонов. Количество вагонов, используемых при построении моделей, составило 10647 для крытых вагонов и 81670 для цистерн. Для построения нечетких характеристик каждой дуги, топологического уравнения и вычисления характеристик дуги, являющейся эквивалентной заменой всего нечеткого потокового графа, разработан комплекс программ, позволивший полностью автоматизировать процесс построения модели и оценки результатов.

Методика оценки включает следующие шаги:

- Разделение полной информационной базы ВМД о движении иновагонов на две части – обучающую и проверочную.
- По обучающей выборке строится потоковый граф и определяются характеристики каждой дуги. При этом история движения вагона по предыдущим стан-

циям не учитывается. Свертка графа в виде нечеткой величины отражает итоговое время движения вагонов между начальной и конечной станциями.

- В проверочную выборку входят все те вагоны, которые проследовали полный путь от начальной станции (Синельниково-1) до конечной (Мелитополь). При этом маршрут движения через промежуточные станции во внимание не принимается.
- Для времен движения иновогонов из проверочной выборки также строится нечеткая характеристика треугольного вида.
- Сравнение нечеткой величины, соответствующей свертке потокового графа, с величиной для проверочной выборки выполняется по значениям, полученным путем скаляризации известным методом «центра тяжести».

Количество вагонов проверочной выборки составило 28 для крытых вагонов и 1814 для цистерн. Эквивалентные временные характеристики потоковых графов составили (237; 239; 542) минуты для крытых вагонов и (226; 402; 1078) минут для цистерн. Нечеткие временные характеристики для вагонов, прошедших полный путь между начальной и конечной станциями, составили (235; 296; 1465) минут для крытых вагонов и (211; 310; 2205) минут для цистерн. При скаляризации методом «центра тяжести» точность прогноза составила 40 % для крытых вагонов и 27 % для цистерн. Среднее время движения вагонов, прошедших полный путь, составило 781 минуту для крытых вагонов и 469 минут для цистерн.

Анализ распределения частот при построении весов дуг графа показал, что функция принадлежности смещена в сторону больших значений, что приводит к существенному накоплению погрешности при выполнении нечетких операций в соответствии с табл. 2. Для устранения эффекта накопления погрешности при выполнении расчетов использовались приведенные нечеткие временные характеристики дуг. Особенностью такой характеристики является способ ее построения. Методика построения следующая:

- Задаем число интервалов распределения. В качестве центрального значения приведенной нечеткой характеристики треугольного вида принимаем середину временного интервала с наибольшим количеством вагонов.

- Левую и правую вершины треугольника определяем как математическое ожидание тех времен движения, которые соответственно меньше или больше центрального значения.

При использовании приведенных нечетких величин эквивалентные временные характеристики потоковых графов составили (244; 254; 338) минуты для крытых вагонов и (364; 446; 607) минут для цистерн. Приведенные нечеткие временные характеристики для вагонов, прошедших полный путь между начальной и конечной станциями, составили (263; 296; 894,17) минут для крытых вагонов и (258,85; 310; 685,18) минут для цистерн. При скаляризации методом «центра тяжести» точность прогноза составила 34 % для крытых вагонов и 22 % для цистерн.

Выполнение операций над треугольными нечеткими величинами приводит к тому, что степень принадлежности становится нелинейной функцией времени. Поэтому кроме «треугольной» была рассмотрена модель «пятиугольных» нечетких величин. Расчеты показали, что их использование существенно не влияет на точность моделирования.

## Выводы

В работе исследована структура вагонопотоков иностранных собственников и установлено, что временные, объемные характеристики и маршруты движения иновогонов разного рода существенно отличаются. При моделировании вагонопотоков необходимо учитывать род подвижного состава как самостоятельную характеристику модели движения иновогонов.

На основе анализа данных ВМД о процессе движения иновогонов установлена нестационарность параметров вагонопотоков и ограниченность возможности использования статистических методов.

Разработаны два метода построения нечетких временных характеристик. Первый формирует нечеткую величину в интервале, охватывающем все возможные значения времен движения из обучающей выборки. Во втором случае формируется приведенная нечеткая величина, которая отражает времена движения не всего вагонопотока, а его большей части и сглаживает «выбросы» данных. Анализ показал, что при моделировании движения иновогонов не требуется более точное описание функций принадлежности (квадратическое и др.),

чем линейные «треугольные» нечеткие величины.

Для уменьшения погрешностей предложенных моделей разработан метод обработки потоковых графов, который включает построение приведенных нечетких величин, выполнение операций над нечеткими дугами графа, суперпозицию с учетом прецедентов, скаляризацию по «центру тяжести» полученной нечеткой величины.

Разработанные методы образуют прогнозирующую экспертную систему по оценке времени движения иновагонов с учетом текущего распределения иновагонов по станциям.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила эксплуатации, пономерного учета и расчетов за использование грузовых вагонов

собственности других государств. – К., 1996. – 82 с.

2. Пугачев В. С. Введение в теорию вероятностей. – М.: Наука, 1968. – 368 с.
3. Згуровский М. З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования. – К.: Вища школа, 1990. – 351 с.
4. Скалозуб В. В., Цейтлин С. Ю., Великодний В. В., Андриющенко В. А., Доманская Г. А., Зеленский Ю. В. Объектно-ориентированные модели стохастических нестационарных потоков в транспортных сетях // Системні технології, № 3 – Д., 2001. – С. 141–150.
5. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
6. Представление и использование знаний / Под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. – М.: Мир, 1989. – 220 с.

Поступила в редколлегію 22.09.03.