

УДК 656.2

Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов с использованием технологий вычислительного интеллекта

А. П. Бадецкий, О. А. Медведь, Я. В. Кукушкина

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Бадецкий А. П., Медведь О. А., Кукушкина Я. В. Учет переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов с использованием технологий вычислительного интеллекта // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 3. — С. 32–45. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-32-45

Аннотация

Цель: План формирования поездов является важнейшим логистическим инструментом управления перевозками грузов. Но использование при его разработке дискретных значений расчетных нормативов — затрат вагоно-часов на накопление составов и экономии от проследования вагонами технической станции без переработки — не всегда гарантируют оптимальность решения в силу объективно существующей неравномерности эксплуатационной работы. Именно она порождает неопределенность, которая не является стохастической по своей природе, и вызывает необходимость корректировок плана формирования на протяжении его жизненного цикла. Кроме колебаний вагонопотоков, она вызывает изменение и значений расчетных нормативов. Для управления такой неопределенностью существуют специальные методы, одним из которых является нечеткая логика. В статье описан способ учета изменения всех расчетных нормативов плана формирования поездов. **Методы:** Используются методы одной из технологий вычислительного искусственного интеллекта — нечеткая логика, нечеткие множества и нечеткая математика. **Результаты:** Установлена зависимость изменения расчетных параметров плана формирования поездов от колебаний вагонопотоков отдельных его назначений. Полученные на основе известных аналитических выражений формулы позволяют определять значения нормативов плана формирования без использования вспомогательных таблиц и графиков. **Практическая значимость:** Использование полученных зависимостей при разработке плана формирования позволит повысить точность его расчета за счет учета колебаний не только вагонопотоков, но и зависящих от них значений расчетных нормативов.

Ключевые слова: Вычислительный интеллект, нечеткие множества, колебания вагонопотоков, система организации вагонопотоков.

Введение

В современных условиях цифровой трансформации железнодорожной отрасли важное значение приобретает использование для технических и технологических расчетов таких моделей и методов, которые в том числе могут работать с неточными, нечеткими и неопределенными данными, проявляя при этом вычислительную адаптивность и отказоустойчивость. Одной из технологий, в полной мере отвечающих данным требованиям, является вычислительный

интеллект (ВИ) [1–4]. Данное направление включает в себя целый ряд технологий искусственного интеллекта: искусственные нейронные сети (ИНС) во всем своем многообразии, теория нечеткой логики и ее всевозможные приложения и расширения (нечеткие множества, нечеткая математика), а также генетические алгоритмы (являющиеся, в свою очередь, одной из технологий эволюционного моделирования).

Применение ВИ для решения различных задач транспортной отрасли имеет свою историю как за рубежом [5–13], так и в нашей стране [14–18]. В данной статье обобщается применение теории нечетких множеств [19] для учета переменного характера вагонопотоков и зависящих от них затрат на накопление составов поездов [20–24], а также предлагается метод определения значений экономии вагоно-часов от проследования вагонами технической станции без переработки.

Определение границ изменения вагонопотока в расчетный период

В поставленной задаче целесообразно рассматривать вагонопотоки отдельных назначений плана формирования поездов, так как они определяют и переменный характер других его расчетных параметров. Для этой цели могут использоваться нечеткие числа, являющиеся естественным расширением теории нечетких множеств.

Колебания вагонопотока U отдельного назначения ПФП можно описать нечетким треугольным числом. Оно представляет собой упорядоченную тройку вида $U = (u_1, u_2, u_3)$, функция принадлежности которого задается формулой:

$$\mu_A(U) = \begin{cases} 0, & u < u_1 \\ \left(\frac{u - u_1}{u_2 - u_1} \right), & u_1 \leq u \leq u_2 \\ \left(\frac{u_3 - u}{u_3 - u_2} \right), & u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, & u > u_3 \end{cases}, \quad (1)$$

где u — определенное значение вагонопотока;

u_2 — наиболее ожидаемое значение вагонопотока в рассматриваемый период;

u_1, u_3 — соответственно нижняя и верхняя границы колебаний рассматриваемого вагонопотока.

С учетом того свойства вагонопотоков, что их изменение может быть спрогнозировано только с определенной степенью вероятности, для определения границ u_1, u_3 используются следующие формулы:

$$u_1 = \frac{p(\bar{u})u_{\min} - p(u_{\min})\bar{u}}{p(\bar{u}) - p(u_{\min})},$$

$$u_3 = \frac{p(u_{\max})\bar{u} - p(\bar{u})u_{\max}}{p(u_{\max}) - p(\bar{u})},$$

где u_{\min} , \bar{u} , u_{\max} — соответственно минимальный, средний и максимальный вагонопоток рассматриваемого периода (возможна оценка с применением статистических данных);

$p(u_{\min})$, $p(\bar{u})$, $p(u_{\max})$ — вероятности возникновения минимальных, средних и максимальных вагонопотоков соответственно.

Строго говоря, при использовании для оценки границ колебаний вагонопотоков статистических данных за предыдущий период их представление может быть выражено также и нечетким трапециевидным числом.

Определение границ изменения затрат вагоно-часов на накопление составов в зависимости от колебаний вагонопотока

В соответствии с Инструктивными указаниями по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД» параметр накопления отдельного назначения ПФП является функционалом от вагонопотока этого назначения и может быть выражен следующей формулой:

$$c_i = 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{U_i}}{(3,1 + 0,014U_i)km_i} \right), \quad (2)$$

где B — коэффициент, зависящий от допустимых колебаний числа вагонов в составах рассматриваемого назначения, для среднесетевых условий;

m_p , m_i — норма состава соответственно расформировываемых на станции поездов и формируемых на i -е назначение;

U_i — вагонопоток рассматриваемого назначения;

k — количество назначений, формируемых станцией.

Зависимость, представленная формулой (2), позволяет построить нечеткое представление параметра накопления двумя способами:

1. Графический способ. Для его применения необходимо построить график зависимости затрат вагоно-часов на накопление составов поездов от вагонопотока назначения. Нечеткое число $ct = (ct_1, ct_2, ct_3)$ является проекцией нечеткого числа $U = (u_1, u_2, u_3)$ на ось затрат вагоно-часов, как показано на рис. 1.

Несмотря на кажущуюся простоту данного способа, стоит отметить ряд его недостатков, которые могут привести к неверной интерпретации результатов:

– зависимость $ct = f(U)$ на самом деле является семейством кривых, и их расположение относительно оси затрат на накопление зависит от нормы длины формируемых составов поездов t , что в каждом отдельном случае требует построения новой кривой для каждого t ;

– как можно видеть из примера на рис. 1, проекция, отражающая нечеткие затраты на накопление, в силу того, что функция $ct = f(U)$ является вогнутой, а не монотонной. Вследствие этого может возникнуть ситуация, когда нечеткое число ct не отражает сути нечеткого числа U . В примере наиболее ожидаемым значением вагонопотока является u_2 , и значение функции принадлежности в этой точке равно 1 (т. е. элемент u_2 является типовым элементом данного множества), тогда как затраты на накопление, соответствующие данному вагонопотоку, имеют степень принадлежности к множеству ct , равную 0 (т. е. ct_1 не является элементом множества ct). И, наоборот ct_2 имеет степень принадлежности 1, тогда как значение вагонопотока u_3 в данном примере недостижимо (степень принадлежности равна 0). Поэтому построенное таким образом нечеткое число требует корректировки в ручном режиме. В рассмотренном примере степени принадлежности элементов ct_1 и ct_2 нечеткому множеству ct были бы равны 0, а элемента ct_3 — 1, что повлияло бы на форму нечеткого числа и значения функции принадлежности его промежуточных элементов.

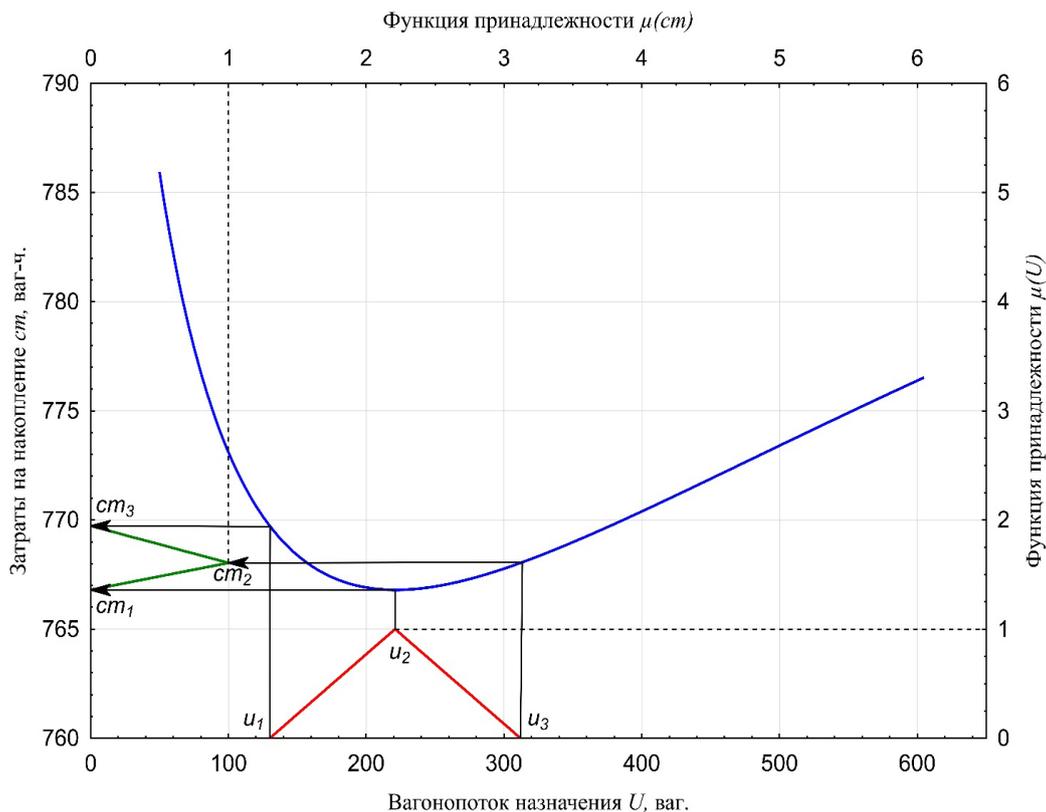


Рис. 1. Графический способ определения нечеткого числа, характеризующего изменение затрат на накопление составов поездов

2. Расчетный способ. По сравнению с графическим, позволяет более точно определить степень принадлежности отдельных элементов нечеткому множеству c . Нечеткий параметр накопления $c = (c_1, c_2, c_3)$ представляется функцией принадлежности формы (1), где границы c_1, c_2 и c_3 определяются в соответствии с формулой (2):

$$\mu(c) = \begin{cases} 0, & c < c_1 \\ 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{u}}{(3,1 - 0,014u)km_i} \right) - 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_1}}{(3,1 - 0,014u_1)km_i} \right), & c_1 \leq c \leq c_2 \\ 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_2}}{(3,1 - 0,014u_2)km_i} \right) - 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_1}}{(3,1 - 0,014u_1)km_i} \right), & c_1 \leq c \leq c_2 \\ 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_3}}{(3,1 - 0,014u_3)km_i} \right) - 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{u}}{(3,1 - 0,014u)km_i} \right), & c_2 \leq c \leq c_3 \\ 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_3}}{(3,1 - 0,014u_3)km_i} \right) - 12 \left(1 - \frac{Bm_p \sqrt{u_2}}{(3,1 - 0,014u_2)km_i} \right), & c_2 \leq c \leq c_3 \\ 0, & c > c_3 \end{cases}$$

и, после математических преобразований, примет вид:

$$\mu(c) = \begin{cases} 0, & c < c_1 \\ \frac{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u})(3,1 - 0,014\sqrt{uu_1})(3,1 + 0,014u_2)}{(\sqrt{u_1} - \sqrt{u_2})(3,1 - 0,014\sqrt{u_1u_2})(3,1 + 0,014u)}, & c_1 \leq c \leq c_2 \\ \frac{(\sqrt{u} - \sqrt{u_3})(3,1 - 0,014\sqrt{uu_3})(3,1 + 0,014u_2)}{(\sqrt{u_2} - \sqrt{u_3})(3,1 - 0,014\sqrt{u_2u_3})(3,1 + 0,014u)}, & c_2 \leq c \leq c_3 \\ 0, & c > c_3 \end{cases} \quad (3)$$

Из формулы (3) можно сделать следующий вывод — при рассмотрении параметра накопления отдельно по каждому назначению плана формирования поездов его значение зависит только от колебаний вагонопотока соответствующего назначения, что значительно упрощает его нахождение относительно формулы (2).

Чтобы определить затраты вагоно-часов на накопление составов поездов по второму способу, получившееся в результате расчета нечеткое число, характеризующее изменение параметра накопления, необходимо умножить на норму

длины формируемых станцией составов поездов данного назначения. В соответствии с правилами нечеткой математики, результатом будет также нечеткое число $ct = (ct_1, ct_2, ct_3)$, где t является константой, а нижние индексы относятся к параметру накопления.

Определение границ изменения экономии вагоно-часов на проследование вагонами технической станции без переработки в зависимости от колебаний вагонопотока

В общем случае экономия от проследования вагонами технической станции без переработки $t_{\text{эк}}$ определяется следующим образом:

$$t_{\text{эк}} = \frac{B_{\text{эк}}}{\Delta n_{\text{пер}}} = \frac{B_{\text{эк}}}{n_{\text{пер},i} - n_{\text{пер},j}}, \quad (4)$$

где $\Delta n_{\text{пер}}$ — разница между количеством перерабатываемых станцией составов до выделения струи вагонопотока в поездное назначение $n_{\text{пер},i}$ и после $n_{\text{пер},j}$;
 $B_{\text{эк}}$ — экономия вагоно-часов при выделении струи вагонопотока в отдельное назначение плана формирования:

$$B_{\text{эк}} = \left[n_{\text{пер},i} (t_{\text{пер},i} - t_{\text{нак},i}) - n_{\text{пер},j} (t_{\text{пер},j} - t_{\text{нак},j}) \right] - (n_{\text{пер},i} - n_{\text{пер},j}) t_{\text{тр}} = n_{\text{пер},i} t_{\text{эк},i}^i - n_{\text{пер},j} t_{\text{эк},j}^j, \quad (5)$$

где $t_{\text{пер},i}$, $t_{\text{пер},j}$ — время нахождения на станции вагона с переработкой при объемах переработки станции $n_{\text{пер},i}$ и $n_{\text{пер},j}$ соответственно;
 $t_{\text{нак},i}$, $t_{\text{нак},j}$ — время на накопление составов поездов при объемах переработки станции $n_{\text{пер},i}$ и $n_{\text{пер},j}$ соответственно;
 $t_{\text{эк},i}^i$, $t_{\text{эк},j}^j$ — расчетное время нахождения вагона на станции (в сортировочной системе) при объемах переработки $n_{\text{пер},i}$ и $n_{\text{пер},j}$ соответственно.

Как следует из формулы (5), $t_{\text{эк}}^i$ определяется как разность расчетных времен нахождения на станции (или в сортировочной системе) вагона с переработкой, исключая простой под накоплением, $t_{\text{пер}}$ и транзитного вагона $t_{\text{тр}}$ при изменении вагонопотока в случае его выделения в поездное назначение и является функцией от количества перерабатываемых станцией составов $t_{\text{эк}}^i = f(n_{\text{пер}})$, которое, в свою очередь, являются функцией от объема перерабатываемого вагонопотока: $n_{\text{пер}} = f(U)$. С учетом этого можно сделать вывод, что величина параметра $t_{\text{эк}}$ зависит от размеров выделяемого в поездное назначение вагонопотока и сама по себе является величиной динамической, что наглядно демонстрирует выражение (4).

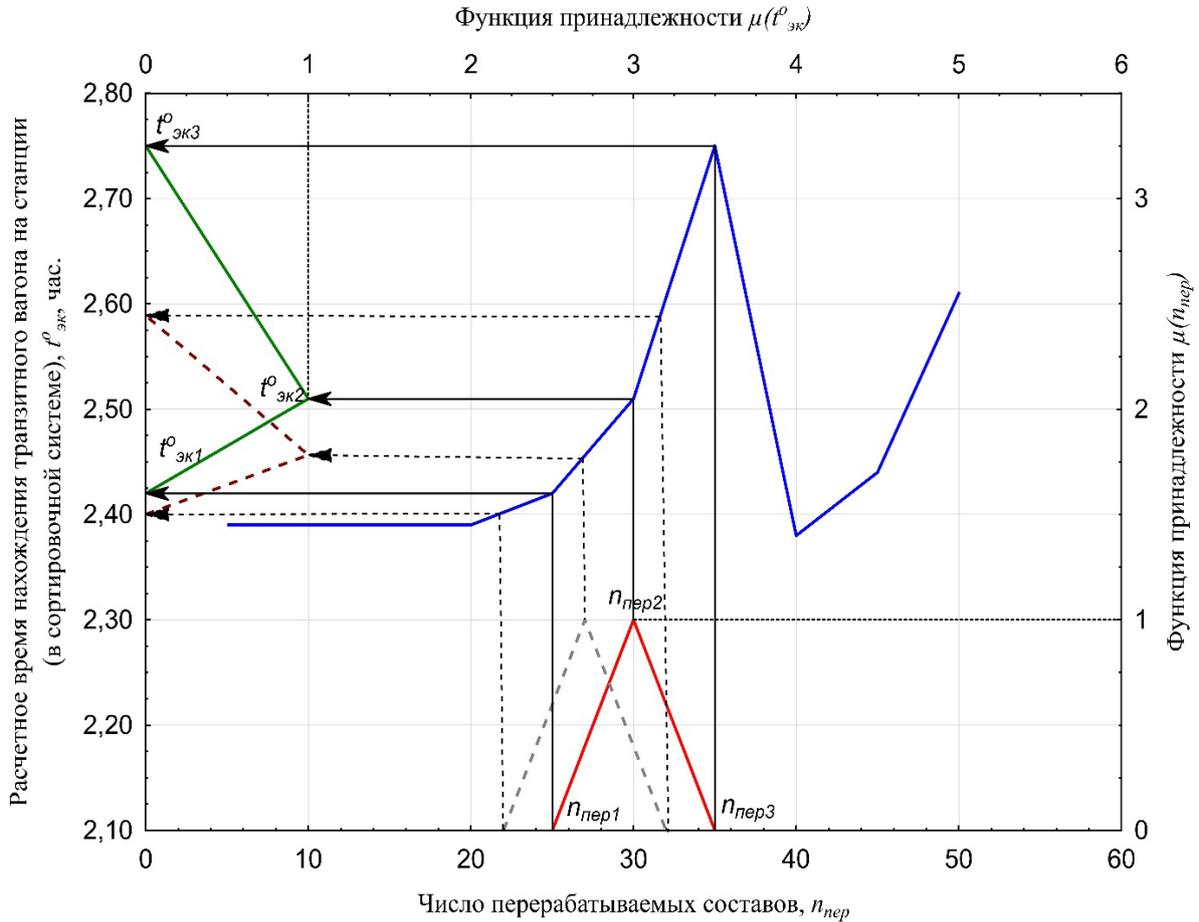


Рис. 2. Определение нечетких чисел, характеризующих изменение расчетного времени нахождения транзитного вагона на станции (в сортировочной системе) при снижении объемов переработки

Вместе с тем переменный характер $t_{\text{эк}}$ требует большего объема вычислений для нахождения нечеткого числа, характеризующего его изменения, чем параметр накопления, и найти его только графическим или только расчетным способом невозможно.

В связи с этим предлагается комбинированный метод нахождения нечеткой экономии от проследования вагонами транзитной станции без переработки, который заключается в следующем. Для станции, по которой планируется пропуск дополнительного транзитного вагонопотока за счет выделения его в самостоятельное поездное назначение, определяются объемы переработки до принятия такого решения. С учетом колебаний размеров вагоно- и поездопотоков результатом будет нечеткое число $n_{\text{пер},i} = (n_{\text{пер},i1}, n_{\text{пер},i2}, n_{\text{пер},i3})$, как показано на рис. 2. Нечеткое число $t_{\text{эк},i}^0 = (t_{\text{эк},i1}^0, t_{\text{эк},i2}^0, t_{\text{эк},i3}^0)$ является результатом проецирования $n_{\text{пер},i}$ на ось расчетного времени нахождения транзитного вагона на станции (в сортировочной системе).

Затем необходимо построить еще два нечетких числа, характеризующих объемы переработки станции после выделения рассматриваемой струи в поездное

назначение $n_{\text{пер},j}$ и соответствующее ему расчетное время нахождения вагона на станции $t_{\text{эк},j}^0$. Для этого необходимо перейти от числа составов к количеству вагонов, перерабатываемых станцией. В результате получатся два нечетких числа, которые для простоты в тексте будем обозначать $\sum U_i$ и $\sum U_j$:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n U_i &= \left(\sum_{i=1}^n u_{i1}, \sum_{i=1}^n u_{i2}, \sum_{i=1}^n u_{i3} \right) = (n_{\text{пер},i1}m, n_{\text{пер},i2}m, n_{\text{пер},i3}m); \\ \sum_{j=1}^k U_j &= \left(\sum_{j=1}^k u_{j1}, \sum_{j=1}^k u_{j2}, \sum_{j=1}^k u_{j3} \right) = (n_{\text{пер},j1}m, n_{\text{пер},j2}m, n_{\text{пер},j3} \cdot m), \end{aligned} \quad (6)$$

где $i = 1, \dots, n$ — количество назначений, формируемых станцией до выделения струи вагонопотока в отдельное назначение ПФП;

$j = 1, \dots, k$ — количество назначений, формируемых станцией после выделения струи вагонопотока в отдельное назначение ПФП;

$\sum U_i$ — сумма вагонопотоков всех назначений, формируемых станцией до выделения струи вагонопотока в отдельное назначение ПФП;

$\sum U_j$ — сумма вагонопотоков всех назначений, формируемых станцией после выделения струи вагонопотока в отдельное назначение ПФП.

С учетом уже имеющейся информации о колебаниях вагонопотока выделяемого назначения плана формирования U , $\sum U_i$ и $\sum U_j$ связаны между собой следующим выражением:

$$\sum_{j=1}^k U_j = \sum_{i=1}^n U_i - U = \left(\sum_{i=1}^n u_{i1} - u_1, \sum_{i=1}^n u_{i2} - u_2, \sum_{i=1}^n u_{i3} - u_3 \right). \quad (7)$$

Исходя из формулы (7) определяется нечеткое число $n_{\text{пер},j}$, а соответствующее ему НТЧ $t_{\text{эк},j}^0$, как и в случае с затратами на накопление составов, представляет собой проекцию на ось расчетного времени нахождения вагона на станции или в сортировочной системе (оба числа показаны штриховыми линиями на рис. 2). Тогда, согласно формулам (6) и (7), выражения (4) и (5) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} B_{\text{ЭК}} &= \sum_{i=1}^n U_i t_{\text{ЭК},i}^0 - \sum_{j=1}^k U_j t_{\text{ЭК},j}^0 = \sum_{i=1}^n U_i t_{\text{ЭК},i}^0 - \left(\sum_{i=1}^n U_i - U \right) t_{\text{ЭК},j}^0 = \\ &= \sum_{i=1}^n U_i (t_{\text{ЭК},i}^0 - t_{\text{ЭК},j}^0) + U t_{\text{ЭК},j}^0 = \sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^0 + U t_{\text{ЭК},j}^0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$t_{\text{ЭК}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^0 - U t_{\text{ЭК},j}^0}{\sum_{i=1}^n U_i - \sum_{j=1}^k U_j} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^0 - U t_{\text{ЭК},j}^0}{U}, \quad (9)$$

где $\Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} = t_{\text{ЭК},i}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j}^{\circ}$ — величина, показывающая, насколько изменилось расчетное время нахождения вагона на станции для всего перерабатываемого ею вагонопотока. При этом следует учесть, что все величины, представленные в формулах (8) и (9), являются нечеткими числами.

Принимая во внимание (8) и (9), функция принадлежности нечеткого числа, характеризующего изменение экономии времени от проследования вагонами технической станции без переработки, примет вид:

$$t_{\text{ЭК}} = \begin{cases} 0, u < u_1 \\ \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - ut_{\text{ЭК},j}^{\circ}}{u} - \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_1 t_{\text{ЭК},j1}^{\circ}}{u_1}, u_1 \leq u \leq u_2 \\ \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_2 t_{\text{ЭК},j2}^{\circ}}{u_2} - \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_1 t_{\text{ЭК},j1}^{\circ}}{u_1}, u_1 \leq u \leq u_2 \\ \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_3 t_{\text{ЭК},j3}^{\circ}}{u_3} - \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - ut_{\text{ЭК},j}^{\circ}}{u}, u_2 \leq u \leq u_3 \\ \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_3 t_{\text{ЭК},j3}^{\circ}}{u_3} - \frac{\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} - u_2 t_{\text{ЭК},j2}^{\circ}}{u_2}, u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, u > u_3 \end{cases} \quad (10)$$

и, после математических преобразований:

$$t_{\text{ЭК}} = \begin{cases} 0, u < u_1 \\ \frac{u_2 \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} (u - u_1) + uu_1 (t_{\text{ЭК},j}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j1}^{\circ}) \right)}{u \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} (u_2 - u_1) + u_1 u_2 (t_{\text{ЭК},j2}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j1}^{\circ}) \right)}, u_1 \leq u \leq u_2 \\ \frac{u_2 \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} (u_3 - u) + uu_3 (t_{\text{ЭК},j3}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j}^{\circ}) \right)}{u \left(\sum_{i=1}^n U_i \Delta t_{\text{ЭК}}^{\circ} (u_3 - u_2) + u_2 u_3 (t_{\text{ЭК},j3}^{\circ} - t_{\text{ЭК},j2}^{\circ}) \right)}, u_2 \leq u \leq u_3 \\ 0, u > u_3 \end{cases} \quad (11)$$

Заключение

Представленный в статье метод учета переменного характера расчетных нормативов плана формирования поездов обладает всеми свойствами, присущими алгоритмам вычислительного интеллекта. Эти свойства позволяют при разработке плана формирования поездов, в отличие от расчета с использованием дискретных значений, получать решения, устойчивые к колебаниям вагонопотоков, а также зависящим от них параметров плана формирования поездов.

Библиографический список

1. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. — М.: Горячая линия — Телеком, 2006. — 452 с.
2. Siddique N. Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural network and evolutionary computing / N. Siddique, H. Adeli. — John Wiley & Sons, Ltd, 2013. — 517 p.
3. Shukla A. Computational intelligence / A. Shukla, B. K. Murthy, N. Hasteer et al. // Lecture Notes in Electrical Engineering. — 2022— Vol. 968. — Pp. 1876–1119. — DOI: 10.1007/978-981-19-7346-8.
4. Eberhart R. C. Computational Intelligence: Concepts to Implementations / R. C. Eberhart, Y. Shi. — Elsevier, 2011. — 496 p.
5. Xiao J. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan / J. Xiao, B. Lin // Journal of Rail Transport Planning & Management. — 2016. — DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.09.002.
6. Yaghini M. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm / M. Yaghini, A. Foroughi, B. Nadjari // Applied Mathematical Modelling. — 2011— Vol. 35. — Pp. 5579–5591. — DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.018.
7. Yaghini M. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways / M. Yaghini, M. Momeni, M. Sarmadi et al. // Applied Mathematical Modelling. — 2015. — Vol. 39. — Pp. 6114–6125. — DOI: 10.1016/j.apm.2015.01.052.
8. Milenković M. A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem / M. Milenković, N. Bojović // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — Vol. 33, August 2013. — DOI: 10.1016/j.trc.2013.05.003.
9. Yang L. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness / L. Yang, Z. Gao, K. Li // Applied Soft Computing, January 2011. — Vol. 11. — Iss. 1. — DOI: 10.1016/j.asoc.2009.12.039.
10. Schneider M. Minimising economic losses due to inefficient rescheduling / M. Schneider, N. Nießen // Journal of Rail Transport Planning & Management. — 2016. — DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.05.002.
11. Yang Z. Semi-active Control of High-speed Trains Based on Fuzzy PID Control / Z. Yang, J. Zhang, Z. Chen et al. // Procedia Engineering. — 2011. — Vol. 15. — Pp. 521–525. — DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.099.

12. Teodorovic D. Traffic control and transport planning: a fuzzy sets and neural network approach / D. Teodorovic, K. Vukadinovic. — Kluwer Academic Publishers Group, 1998. — 387 p.
13. Teodorovic D. Transportation Engineering: Theory, Practice and Modeling / D. Teodorovic, M. Janic. — Butterworth-Heinemann, 2016. — 900 p.
14. Dolgopolov P. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms / P. Dolgopolov, D. Konstantinov, L. Rybalchenko et al. // *Procedia Computer Science*. — 2019. — Vol. 149. — Pp. 11–18. — DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
15. Alekseychik T. The choice of transport for freight and passenger traffic in the region, using econometric and fuzzy modeling / T. Alekseychik, T. Bogachev, V. Bogachev et al. // *Procedia Computer Science*. — 2017. — Vol. 120. — Pp. 830–834. — DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.314.
16. Badetskii A. P. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work / A. P. Badetskii, O. A. Medved // *Transportation Research Procedia*, Novosibirsk, 2021. — Pp. 559–567. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
17. Кукушкина Я. В. Зависимость величины переходящего остатка от накопления смежных составов / Я. В. Кукушкина // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2010. — № 3(24). — С. 132–140.
18. Панков А. Н. О составообразовании на сортировочных станциях / А. Н. Панков, В. А. Кудрявцев, Я. В. Кукушкина и др. // *Железнодорожный транспорт*. — 2016. — № 3. — С. 45–50.
19. Zadeh L. A. Fuzzy Sets / L. A. Zadeh // *Information and Control*. — 1965. — Vol. 8. — Pp. 338–353.
20. Бадецкий А. П. Использование самонастраивающихся нечетких моделей для принятия решений о корректировке назначений плана формирования поездов / А. П. Бадецкий, О. А. Медведь // *Транспорт России: проблемы и перспективы — 2016: материалы международной научно-практической конференции*. — СПб.: ИПТРАН, 2016. — С. 221–224.
21. Осьминин А. Т. Модуль оперативной корректировки назначений плана формирования поездов / А. Т. Осьминин, И. И. Осьминина, А. П. Бадецкий и др. // *Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2016): труды пятой научно-технической конференции*. — М.: НИИАС, 2016. — С. 86–89.
22. Кудрявцев В. А. Учет колебаний вагонопотоков при расчете плана формирования поездов / В. А. Кудрявцев, А. П. Бадецкий // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2012. — № 3. — С. 10–16.
23. Бадецкий А. П. Применение переменных нормативов в расчете плана формирования поездов как способ учета неравномерности вагонопотоков / А. П. Бадецкий // *Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019): труды восьмой научно-технической конференции*. — М.: НИИАС, 2019. — С. 123–126.
24. Бадецкий А. П. Разработка расчетных вагонопотоков плана формирования поездов с учетом их неравномерности / А. П. Бадецкий // *Вестник транспорта Поволжья*. — 2013. — № 3. — С. 53–60.

Дата поступления: 27.07.2023

Решение о публикации: 20.08.2023

Контактная информация:

БАДЕЦКИЙ Александр Петрович — канд. техн. наук, доц.; badetsklii@pgups.ru

МЕДВЕДЬ Оксана Анатольевна — канд. техн. наук, доц.; oa.medved@yandex.ru

КУКУШКИНА Яна Васильевна — канд. техн. наук, доц.; kukushkina@pgups.ru

Taking into Account the Variable Nature of the Calculation Standards of the Train Formation Plan Using Computational Intelligence Technologies

A. P. Badetsky, O. A. Medved, Ya. V. Kukushkina

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Badetsky A. P., Medved O. A., Kukushkina Ya. V. Taking into Account the Variable Nature of the Calculation Standards of the Train Formation Plan Using Computational Intelligence Technologies. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 3, pp. 32–45. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-3-32-45

Summary

Purpose: The train formation plan is the most important logistics tool for cargo transportation management. But the use of discrete values of design standards in its development — the quantity of car-hours for the accumulation of trains and savings from passing of cars through technical station without processing — do not always guarantee the optimal solution due to the objectively existing unevenness of operational work. It is precisely this factor that generates uncertainty, which is not inherently stochastic, and necessitates adjustments to the train formation plan throughout its lifecycle. In addition to fluctuations in car traffic, it causes a change in the values of the calculated standards. To manage such uncertainty, there are special methods, one of which is fuzzy logic. The article describes a way to account for changes in all calculation standards of the train formation plan. **Methods:** The methods of one of the technologies of computational artificial intelligence are used — fuzzy logic, fuzzy sets and fuzzy mathematics. **Results:** The dependence has been established on how changes in the calculated parameters of the train formation plan are affected by fluctuations in car flows on specific destinations. The formulas obtained on the basis of known analytical expressions allow us to determine the values of the standards of the formation plan without using auxiliary tables and graphs. **Practical significance:** The use of the obtained dependencies in the development of the formation plan will improve the accuracy of its calculation by taking into account fluctuations not only of car traffic, but also the values of the calculated standards depending on them.

Keywords: Computational intelligence, fuzzy sets, fluctuations of car traffic, the system of car traffic organization.

References

1. Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L. *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom Publ., 2006, 452 p. (In Russian)
2. Siddique N., Adeli H. Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural network and evolutionary computing. John Wiley & Sons, Ltd, 2013, 517 p.
3. Shukla A., Murthy B. K., Hasteer N. et al. Computational intelligence. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022, vol. 968, pp. 1876–1119. DOI: 10.1007/978-981-19-7346-8.
4. Eberhart R. C., Shi Y. Computational Intelligence: Concepts to Implementations. Elsevier, 2011, 496 p.
5. Xiao J., Lin B. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2016. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.09.002.
6. Yaghini M., Foroughi A., Nadjari B. Solving railroad blocking problem using ant colony optimization algorithm. Applied Mathematical Modelling, 2011, vol. 35, pp. 5579–5591. DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.018.
7. Yaghini M., Momeni M., Sarmadi M. et al. A fuzzy railroad blocking model with genetic algorithm solution approach for Iranian railways. Applied Mathematical Modelling, 2015, vol. 39, pp. 6114–6125. DOI: 10.1016/j.apm.2015.01.052.
8. Milenković M., Bojović N. A fuzzy random model for rail freight car fleet sizing problem. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 33, August 2013. DOI: 10.1016/j.trc.2013.05.003.
9. Yang L., Gao Z., Li K. Railway freight transportation planning with mixed uncertainty of randomness and fuzziness. Applied Soft Computing, January 2011, vol. 11, Iss. 1. DOI: 10.1016/j.asoc.2009.12.039.
10. Schneider M., Nießen N. Minimising economic losses due to inefficient rescheduling. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2016. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2016.05.002.
11. Yang Z., Zhang J., Chen Z. et al. Semi-active Control of High-speed Trains Based on Fuzzy PID Control. Procedia Engineering, 2011, vol. 15, pp. 521–525. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.099.
12. Teodorovic D., Vukadinovic K. Traffic control and transport planning: a fuzzy sets and neural network approach. Kluwer Academic Publishers Group, 1998, 387 p.
13. Teodorovic D., Janic M. Transportation Engineering: Theory, Practice and Modeling. Butterworth-Heinemann, 2016, 900 p.
14. Dolgoplov P., Konstantinov D., Rybalchenko L. et al. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms. Procedia Computer Science, 2019, vol. 149, pp. 11–18. DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.101.
15. Alekseychik T., Bogachev T., Bogachev V. et al. The choice of transport for freight and passenger traffic in the region, using econometric and fuzzy modeling. Procedia Computer Science. 2017, vol. 120, pp. 830–834. DOI: 10.1016/j.procs.2017.11.314.
16. Badetskii A. P., Medved O. A. Improving the Stability of the Train Formation Plan to Uneven Operational Work. Transportation Research Procedia, Novosibirsk, 2021, pp. 559–567. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
17. Kukushkina Ya. V. Zavisimost' velichiny perekhodyashchego ostatka ot nakopleniya smezhnykh sostavov [Dependence of the value of the carry-over balance on the accumulation of

adjacent trains]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2010, Iss. 3(24), pp. 132–140. (In Russian)

18. Pankov A. N., Kudryavtsev V. A., Kukushkina Ya. V. O sostavoobrazovanii na sortirovochnykh stantsiyakh [About composition formation at marshalling yards]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport]. 2016, Iss. 3, pp. 45–50. (In Russian)

19. Zadeh L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, pp. 338–353.

20. Badetskiy A. P., Medved' O. A. *Ispol'zovanie samonastravayushchikhsya nechetkikh modeley dlya prinyatiya resheniy o korrektyrovke naznacheniy plana formirovaniya poezdov. Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2016: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Use of self-adjusting fuzzy models for making decisions on adjusting the assignments of the train formation plan. Transport of Russia: problems and prospects — 2016: materials of the international scientific and practical conference]. Saint Petersburg: IPTRAN Publ., 2016, pp. 221–224. (In Russian)

21. Os'minin A. T., Os'minina I. I., Badetskiy A. P. *Modul' operativnoy korrektyrovki naznacheniy plana formirovaniya poezdov. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2016): trudy pyatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Module for operational adjustment of train formation plan assignments. Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2016): proceedings of the fifth scientific and technical conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2016, pp. 86–89. (In Russian)

22. Kudryavtsev V. A., Badetskiy A. P. Uchet kolebaniy vagonopotokov pri raschete plana formirovaniya poezdov [Taking into account fluctuations in car flows when calculating the train formation plan]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2012, Iss. 3, pp. 10–16. (In Russian)

23. Badetskiy A. P. *Primenenie peremennykh normativov v raschete plana formirovaniya poezdov kak sposob ucheta neravnomernosti vagonopotokov. Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie (ISUZhT-2019): trudy vos'moy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Application of variable standards in calculating the train formation plan as a way to take into account the unevenness of car flows. Intelligent control systems in railway transport. Computer and mathematical modeling (ISUZhT-2019): proceedings of the eighth scientific and technical conference]. Moscow: NIIAS Publ., 2019, pp. 123–126. (In Russian)

24. Badetskiy A. P. *Razrabotka raschetnykh vagonopotokov plana formirovaniya poezdov s uchedom ikh neravnomernosti* [Development of calculated car flows of the train formation plan taking into account their unevenness]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. 2013, Iss. 3, pp. 53–60. (In Russian)

Received: July 27, 2023

Accepted: August 20, 2023

Author's information:

Alexander P. BADETSKII — PhD in Engineering, Associate Professor; badetskii@pgups.ru

Oksana A. MEDVED — PhD in Engineering, Associate Professor; oa.medved@yandex.ru

Yana V. KUKUSHKINA — PhD in Engineering, Associate Professor; kukushkina@pgups.ru