

УДК 007:004.02

ФОРМИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ РАСПИСАНИЙ ДЛЯ ВЕКТОРОВ ЗАЯВОК

Клеванский Н.Н., Антипов М.А.

*ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»,
Саратов, e-mail: nklevansky@yandex.ru*

В статье представлены основные концепции и подходы в реализации задач транспортных расписаний. Процедура транспортного планирования использует двухэтапный алгоритм, реализованный в среде СУБД. Получение начального расписания на первом этапе с использованием критерия наилучшего распределения ресурсов является базовым для следующего этапа оптимизации. Каждый этап включает две эвристические процедуры получения решений на базе идеологии жадных алгоритмов, использующих многокритериальное ранжирование. Предложены основные критерии в задачах выбора при формировании и оптимизации транспортных расписаний – критерии загруженности и равномерности. Представлены результаты численной реализации транспортного планирования на базе тестового задания для пассажирских поездов дальнего следования.

Ключевые слова: расписание, заявка, событие, транспортное расписание, жадный алгоритм, методы ранжирования

INITIAL TIMETABLING PROBLEM FOR DEMAND VECTORS

Klevanskiy N.N., Antipov M.A.

Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov, Saratov, e-mail: nklevansky@yandex.ru

In the paper basic concepts for transport scheduling problem are presented. The transport scheduling procedure can be solved efficiently by two-stage algorithm developed in database system. The first, a set of demands must be developed as initial timetables. A set of local and global resources are available for carrying out the activities of the systems. The solutions obtained by the first stage algorithm with the best resource allocation rule are used as a baseline to compare those obtained by the latter. The second, the initial timetables must be optimized. Each stage consists of two heuristic solution-finding procedures based on greedy ideology. The greedy algorithms use multi-criteria ranking of decision support theory. The algorithm introduces the concept of an adjustable resource allocation factor which can be used to produce schedules. The basic criteria for choice operations are demanded – criterion of vehicle workload and criterion of resource equability. The realizations are used on set of train scheduling tasks. A numerical example of timetabling visualization is given. The visualization of transport timetable shows arrivals/departs across stations and lines.

Keywords: timetable, demand, activity, transport timetable, greedy algorithm, ranking methods

В большинстве случаев расписание множества независимых друг от друга векторов действий является транспортным расписанием [1]. «Одним из представителей транспортных систем с достаточно жесткими ограничениями является железнодорожный транспорт с постоянным сезонным расписанием пассажирских поездов» [4]. Задача формирования расписания поездов в европейских публикациях рассматривается в двух видах: цикличном [9] и нецикличном [7].

Цикличные расписания характерны для западноевропейских стран с высокой плотностью населения и большими пассажиропотоками. Цикличные расписания обеспечивают строгую периодичность в пределах суток или части суток. В российских условиях при значительных расстояниях между крупными городами цикличные расписания пассажирских перевозок пока не применимы.

К нециклическим расписаниям относят расписания пассажирских поездов дальнего

следования и расписания грузовых поездов. Большинство моделей формирования нециклических расписаний основаны на процедурах линейного программирования и приводят к задачам большой размерности, для решения которых используют эвристики, такие как релаксация по Лагранжу [8], генерация колонок [6], задача цеха [5].

В процессе алгоритмизации и разработки программного обеспечения для формирования расписаний использованы следующие концепции [1]: программное решение задачи в рамках СУБД; двухэтапный процесс решения; идеология жадного алгоритма; концепции загруженности и равномерности; использование методов ранжирования.

Двухэтапный процесс решения задачи включает формирование начального расписания и последующую его оптимизацию. Под начальным расписанием понимается программно сформированное расписание при соблюдении обязательных ограничений.

Целью статьи является представление эвристических методов формирования начального расписания движения пассажирского железнодорожного транспорта дальнего следования.

Для расписаний пунктов остановок и перегонов использованы представления (рис. 1), в которых спираль является осью времени с отсчетом от ее начала, а длина спирали соответствует интервалу расписания [3]. Виток спирали – наименьший период расписания. Пометками на спирали фиксируется прибытие/отправление транспортного средства.

Задача формирования начального расписания решается последовательным выбором очередного маршрута и последующим его включением в расписание в определяемое время отправления с начальной станции. Выбор маршрута базируется на концепции загруженности, то есть на каждом шаге определяется наиболее загруженный по требуемым ресурсам маршрут. Выбор времени включения этого маршрута базируется на концепции равномерности использования ресурсов системы. То есть на каждом шаге формирования начального расписания присутствуют две операции выбора.

Такой подход характерен для жадных алгоритмов и применим для задач формирования расписаний и связанных с этим задач распределения ресурсов. Использование идеологии жадных алгоритмов требует ци-

кличности процедур задачи формирования расписания.

Операции выбора в представляемых алгоритмах являются многокритериальными и для их реализации привлечен аппарат методов ранжирования [2].

Введем необходимые в математическом моделировании расписания обозначения.

Исходные данные задачи:

$S = \{s_i, i = \overline{1, I}\}$ – множество станций

железнодорожной сети;

$L = \{l_j, j = \overline{1, J}\}$ – множество перегонов

железнодорожной сети;

pl_i – количество платформ для высадки/посадки пассажиров i -ой станции;

$\Delta t_{i,j}$ – минимальный интервал времени между двумя последующими поездами при выезде/въезде с j -го перегона на i -ю станцию;

$F = \{(s, l), s \in S, l \in L\}$ – множество инцидентных пар – станция s является одной из двух граничных станций перегона l . Количество элементов множества F составляет $n_f = 2 \cdot J$;

n_r – количество маршрутов железнодорожной сети;

$R = \{r_k, k = \overline{1, n_r}\}$ – множество векторов заявок маршрутов;

$n_{k,s}$ – количество станций маршрута r_k ;

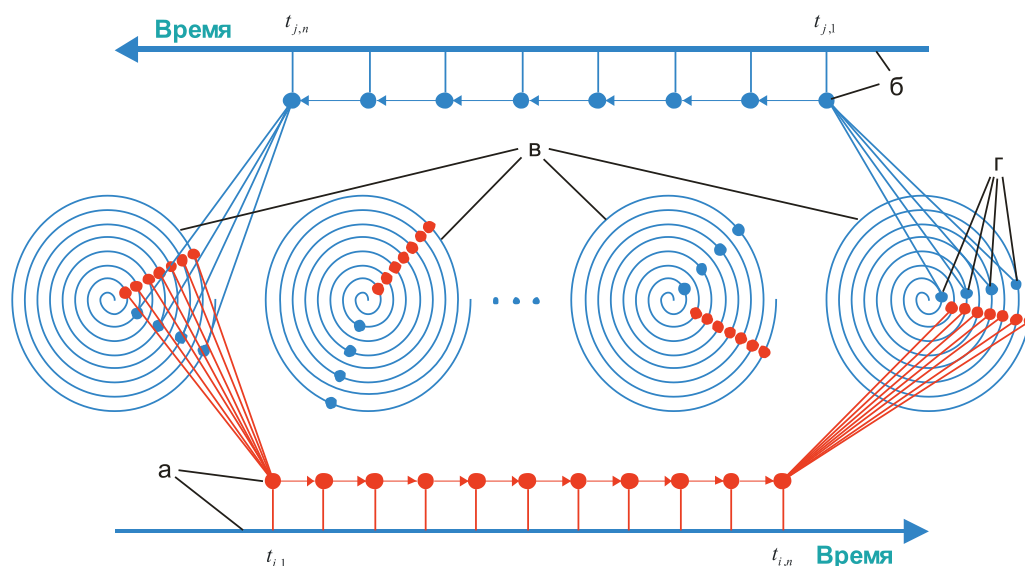


Рис. 1. Схема расписаний для векторов заявок:
 а – расписание (вектор) i -го маршрута; б – расписание (вектор) j -го маршрута;
 в – спиральные представления расписаний пунктов остановок;
 г – события периодов расписания пункта остановки

$$r_k = (f_{k,i}, \forall f_{k,i} \in F, i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}) = ((l_{k,i}, s_{k,i}), i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}) \quad (1)$$

– вектор заявок маршрута; r_k – последовательность пар – перегон/станция от начальной станции до конечной;

n_d – количество суток интервала расписания;

$Day = (day_1, day_2, \dots, day_{n_d})$ – упорядоченный во времени вектор суток;

$Interval = 24 \cdot n_d$ – интервал расписания, часы;

n_k – количество суток отправления поездов k -го маршрута;

$Day_k = \{day_{k,i}, i = \overline{1, n_k}, day_{k,i} \in Day\}, k = \overline{1, n_r}$ – множество суток отправления поездов маршрутов;

$n_t = \sum_{k=1}^{n_r} n_k$ – количество поездов расписания;

$U = \{(r, day), r \in R, day \in Day\}$ – множество инцидентных пар, частично формирующих заявки поездов маршрутов – поезд маршрута r отправляется с начальной станции в день day ;

используя (1), получаем множество заявок поездов маршрутов:

$$U = \{day_{k,j}, ((l_{k,i}, s_{k,i}), i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, day_{k,j} \in Day)\}; \quad (2)$$

$d_{k,i} = ((l_{k,i}, s_{k,i}, int_{k,i}), i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r})$ – заявка на прохождение маршрута k по i -му перегону на i -ую станцию, где $int_{k,i}$ – интервал времени движения от $i-1$ -й до i -й станции; заявка на прохождение поезда $u_{k,i}$ по i -му перегону на i -ую станцию

$$d_{k,i,j} = ((l_{k,i}, s_{k,i}, int_{k,i}, day_{k,j}), i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, day_{k,j} \in Day), \quad (3)$$

где $day_{k,j}$ принимается равным дню отправления поезда маршрута.

Исходные расчетные данные задачи:

$nt_i, i = \overline{1, I}$ – количество поездов, проходящих через i -ую станцию;

$nl_j, j = \overline{1, J}$ – количество поездов, проходящих через j -й перегон.

Переменные задачи:

ni – количество включенных в начальное расписание маршрутов;

nr – количество не включенных в начальное расписание маршрутов;

nit – количество включенных в начальное расписание поездов;

nit_i – количество поездов начального расписания, проходящих через i -ую станцию;

nil_j – количество поездов начального расписания, проходящих через j -й перегон;

ti, tf – время прибытия/отправления поездов на станцию;

til, tfl – время выезда поездов на перегон и с перегона;

TI_k – время отправления поездов маршрута r_k с начальной станции, $TI_k = ti_{k,1}$;

событие расписания, порождаемое заявкой (3), по прохождению поезда $u_{k,j}$ маршрута r_k по i -му перегону на i -ую станцию будет определяться следующим выражением:

$$e_{k,i,j} = ((l_{k,i}, s_{k,i}, int_{k,i}, day_{k,j}, ti_{k,i,j}, tf_{k,i,j}), i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, day_{k,j} \in Day); \quad (4)$$

$day_{k,j}$; $ti_{k,i,j}$ и $tf_{k,i,j}$ в (4) определяются на каждом шаге формирования расписания;

оценка загрузки i -й станции по проходящим через нее поездам

$$c1_i = \frac{nt_i - nit_i}{nt - nit}, \quad i = \overline{1, nit_i}; \quad (5)$$

оценка загрузки j -го перегона по проходящим через него поездам

$$c2_j = \frac{nl_j - nil_j}{nt - nit}, \quad j = \overline{1, nil_j}; \quad (6)$$

скалярная оценка загруженности k -го маршрута по суткам расписания

$$c3_k = \frac{n_k}{n_d}, \quad k = \overline{1, n_r}; \quad (7)$$

оценка равномерности события расписания i -й станции $k1_{k,i,j}$

$$k1_{k,i,j} = \frac{nit_i(t_{i_{suc}} + t_{i_{prec}} - 2t_{k,i,j})}{2 \cdot Interval}, \quad i = \overline{1, n_{k,s}},$$

$$k = \overline{1, n_r}, \quad j = \overline{1, n_k}, \quad (8)$$

где $t_{i_{prec}}$ и $t_{i_{suc}}$ – времена прибытия на i -ую станцию поездов, предшествующих и последующих по отношению ко времени $t_{k,i,j}$ в интервале расписания (рис. 2);

оценка равномерности распределения события $e_{k,i,j}$ в периодах расписания i -й станции

$$k2_{k,i,j} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} q(s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j})}{n_d}, \quad (9)$$

где

$$q = q(s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j}) = \begin{cases} 1, & \text{если хотя бы один поезд во время } t_{k,i,j} \text{ дня } day_{k,j} \text{ находится на станции } s_{k,i}; \\ 0 & \text{– в противном случае;} \end{cases}$$

$q \in Q_s$ – множество булевых обозначений событий станций;

оценка равномерности события расписания i -го перегона $k3_{k,i,j}$

$$k3_{k,i,j} = \frac{nil_i(t_{i_{suc}} + t_{i_{prec}} - 2t_{k,i,j})}{2 \cdot Interval}, \quad i = \overline{1, n_{k,s}}, \quad k = \overline{1, n_r}, \quad j = \overline{1, n_k} \quad (10)$$

где $t_{i_{prec}}$ и $t_{i_{suc}}$ – времена начала движения поездов на i -м перегоне, предшествующие и последующие по отношению ко времени $t_{k,i,j}$;

оценка равномерности распределения события $e_{k,i,j}$ в периодах расписания i -го перегона на въезде/выезде со станции

$$k4_{k,i,j} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} q(l_{k,i}, s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j})}{n_d}, \quad (11)$$

где

$$q = q(s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j}) = \begin{cases} 1, & \text{если хотя бы один поезд в } t_{k,i,j} \text{ дня } day_{k,j} \text{ въезжает} \\ & \text{или выезжает со станции } s_{k,i} \text{ на перегон } l_{k,i}; \\ 0 & \text{– в противном случае;} \end{cases}$$

$q \in Q_l$ – множество булевых обозначений событий перегона.

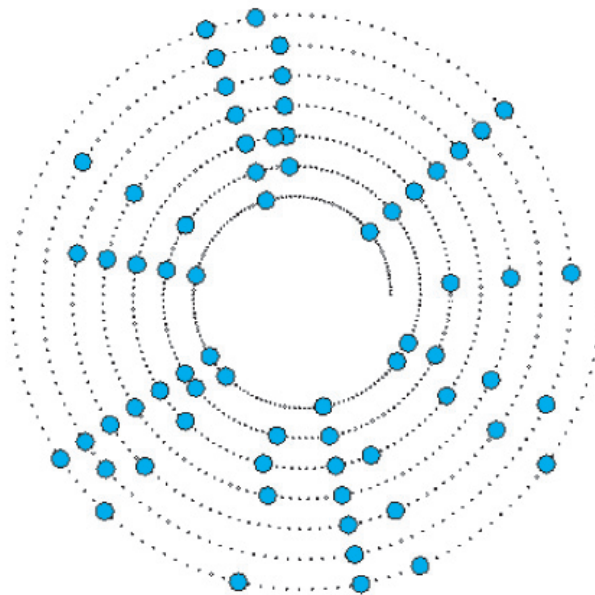


Рис. 2. Расписание событий расписания i -й станции/ i -го перегона (въезд/выезд)

Задача формирования начального расписания состоит в циклическом выборе очередного маршрута r_{ni+1} и формировании расписания $S = \{TI_i, i = \overline{1, ni+1}\}$, которое минимизирует векторы оценок равномерности событий станций и перегонов выбранного маршрута

$$\min \begin{cases} (k1_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k2_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k3_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k4_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \end{cases} \quad (12)$$

при обязательных ограничениях

$$\forall s, \forall day, \forall t \sum_{t \in Interval} q \leq pl_i; \quad (13)$$

$$\forall l, \forall day, \forall t (til_i - til_{i-1}) \geq \Delta t_{i,j}$$

$$\forall l, \forall day, \forall t (tfl_i - tfl_{i-1}) \geq \Delta t_{i,j}. \quad (14)$$

Целевая функция (12) обеспечивает многокритериальную минимизацию оценок равномерности. Ограничения (13) предотвращают одновременное нахождение поездов на станции более количества путей с пассажирскими платформами. Ограничения (14) отражают соблюдение интервала между последовательными выездами/въездами поездов.

Оценки загруженности станций (5) и перегонов (6) формируют множества первых и вторых векторных компонент загруженности маршрутов

$$\{(c1_{1,k}, c1_{2,k}, \dots, c1_{i,k}, i = \overline{1, n_{k,s}}), k = \overline{1, nr}\}; \quad (15)$$

$$\{(c2_{1,k}, c2_{2,k}, \dots, c2_{i,k}, i = \overline{1, n_{k,s}-1}), k = \overline{1, nr}\}. \quad (16)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (15) и (16) порождает множества рангов маршрутов по загруженности станций и перегонов

$$\{rank1_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (17)$$

$$\{rank2_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (18)$$

Обратная сортировка выражений (7) порождает множество рангов маршрутов по загруженности суток интервала расписания:

$$\{rank3_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (19)$$

Ранги (17), (18), (19) формируют множество векторов маршрутов:

$$\{(rank1_k, rank2_k, rank3_k), k = \overline{1, nr}\}. \quad (20)$$

Старший по рангу маршрут, полученный многокритериальным ранжированием векторов (20), является самым загруженным и становится очередным кандидатом r_{ni+1} на включение в начальное расписание.

Для определения времени отправления с начальной станции TI_{ni+1} поездов маршрута r_{ni+1} циклично выполняются следующие действия:

для $ti_{ni+1,1} = 0$ с шагом $= 0,1$ ч до 24 ч определение значений оценок (8)–(11) для перегонов и станций маршрута с накоплением множеств векторов с учетом ограничений (13), (14)

$$\{ti_{ni+1,1}, (k1_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}})\}; \quad (21)$$

$$\{ti_{ni+1,1}, (k2_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}})\}; \quad (22)$$

$$\{ti_{ni+1,1}, (k3_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}})\}; \quad (23)$$

$$\{ti_{ni+1,1}, (k4_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}})\}. \quad (24)$$

Многокритериальные ранжирования векторов (21), (22), (23), (24) формируют множества векторов рангов для начальных времен движения поездов маршрута r_{ni+1}

$$\{ti_{ni+1,1}, (rank1, rank2, rank3, rank4), \quad (25)$$

$$ti_{ni+1,1} = \overline{0, 240}\}.$$

Многокритериальное ранжирование векторов (25) определяет начальное время TI_{ni+1} движения поездов маршрута r_{ni+1} в начальном расписании.

Для проверки корректности предлагаемых решений было разработано тестовое задание для пассажирского железнодорожного транспорта. Структура железнодорожной сети тестового задания (рис. 3) содержит сетевидные, паутинообразные и магистральные фрагменты сети. Нумерация станций и перегонов осуществлена случайным образом, поэтому можно положить эти номера их идентификаторами в базе данных. Тестовое задание имеет следующие характеристики: количество станций – 100; количество перегонов – 128; общее количество маршрутов – 100; количество поездов маршрутов – 471 в неделю.

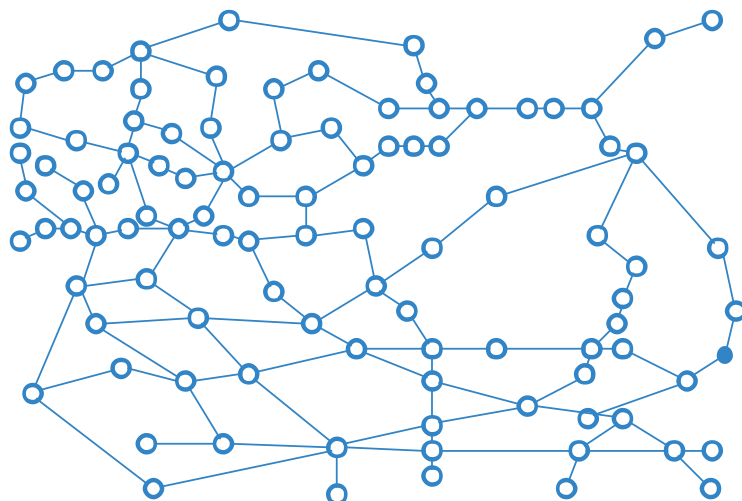


Рис. 3. Железнодорожная сеть тестового задания

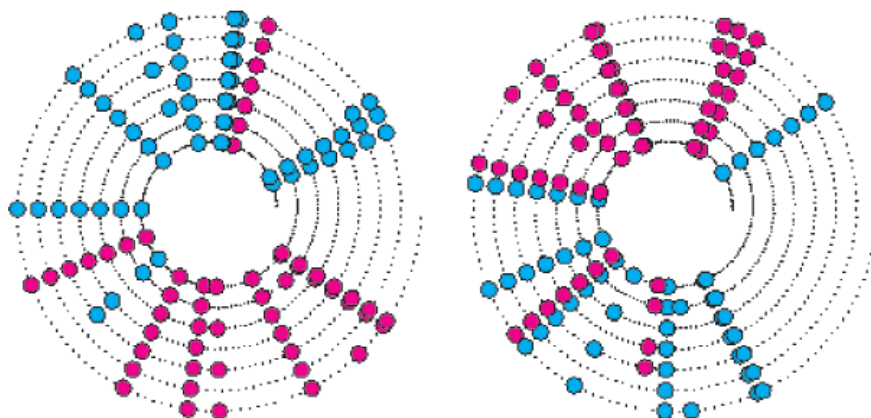


Рис. 4. Расписания въезда/выезда с перегона на граничные станции:
 ● – выезд на перегон; ● – въезд на станцию

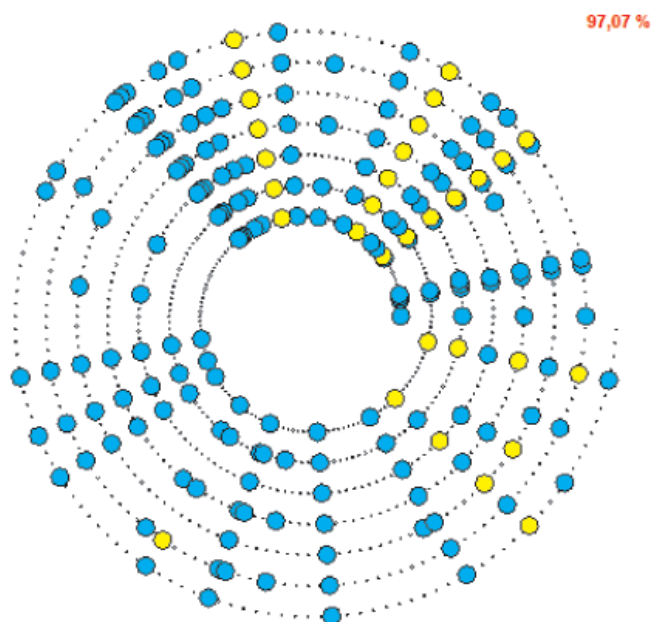


Рис. 5. Расписание въезда поездов на станцию:
 ● – с одного перегона ; ● – двух поездов с разных перегонов

На рис. 4 и 5 представлены визуализированные результаты формирования начального расписания железнодорожной сети для самых загруженных перегона и станции.

На рис. 5 в верхнем правом углу указано среднеквадратичное отклонение интервала между событиями станции от среднего значения в процентах.

Заключение

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

осуществлена формализация задачи формирования транспортного расписания;

представлены общие подходы и алгоритмы решения задач формирования железнодорожных расписаний пассажирских поездов дальнего следования с использованием методов ранжирования теории принятия решений.

Список литературы

1. Клеванский Н.Н. Основные концепции реализации задач формирования расписаний // Образовательные ресурсы и технологии. – М., 2014. – № 2 (5). – С. 9–21.

2. Клеванский Н.Н. Методы ранжирования в задачах формирования расписаний // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления – ВСПУ-2014. – М., 2014. – С. 8040–8050.

3. Клеванский Н.Н., Красников А.А., Антипов М.А. Когнитивная визуализация в задачах расписаний // Современные наукоемкие технологии – 2016. – № 3–2. – С. 246–251.

4. Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Гафаров Е.Р., Кварацхелия А.Г. Теория расписаний. Задачи управления транспортными системами. – М.: Физический факультет МГУ, 2012. – 159 с.

5. Burdett R., Kozan E. A sequencing approach for creating new train timetables, OR Spectrum. – 2010. – № 32 (1). – P. 163–193.

6. Cacchiani V., Caprara A., Toth P. A column generation approach to train timetabling on a corridor. – 2008. – 4OR, № 6 (2). – P. 125–142.

7. Caprara, A., Fischetti M., Toth P. Modeling and solving the train timetabling problem, Operations Research. – 2002. – № 50 (5). – P. 851–861.

8. Fischer F., Helmberg C., Jansen J., Krostitz B. Towards solving very large scale train timetabling problems by lagrangian relaxation, paper presented at the ATMOS 2008 – 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, Dagstuhl, Germany.

9. Peeters L. Cyclic Railway Timetable Optimization, ERIM Ph.D. series Research in Management, Erasmus Research inst. of Management (ERIM), 2002.