



Новые подходы к формированию транспортных расписаний



Николай КЛЕВАНСКИЙ
Nikolai N. KLEVANSKY

Максим АНТИПОВ
Maksim A. ANTIPOV



Клеванский Николай Николаевич — кандидат технических наук, профессор кафедры «Экономическая кибернетика» Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, Саратов, Россия.

Антипов Максим Анатольевич — аспирант Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова, Саратов, Россия.

New Approaches to Development of Transport Schedules

(текст статьи на англ. яз. — English text of the article — p. 24)

Авторы статьи обосновывают выбор методов формирования расписания движения поездов дальнего следования на основе эвристических подходов и с учётом нецикличности пассажиро- и грузопотоков. В процессе алгоритмизации и разработки программного обеспечения для решения представленных задач используются концепции идеологии жадного алгоритма, загрузки и равномерности, целевого программирования в рамках требований системы управления безопасностью движения, ранжирования теории принятия решений. Двухэтапный процесс процедур включает формирование начального расписания и последующую его оптимизацию. Соответственно задачам предложены математическая модель и алгоритмы реализующих действий.

Ключевые слова: транспорт, формирование расписаний, методологические подходы, эвристика, математическая модель, алгоритмы.

Одним из представителей транспортных систем с достаточно жёсткими ограничениями является железнодорожный транспорт с его постоянным сезонным расписанием пассажирских поездов. При этом задача формирования расписания поездов в научных публикациях рассматривается обычно в двух видах: цикличном и нецикличном [1–3].

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

К нециклическим относят расписания пассажирских поездов дальнего следования и расписания грузовых поездов. Большинство их моделей формирования основаны на процедурах линейного программирования. Оба типа моделей приводят к задачам очень большой размерности, для решения которых используют различные

эвристики. К примеру, релаксация по Лагранжу [4], генерация колонок [5], задача цеха [6].

В нашей статье целью ставится представление новых эвристических методов формирования расписания движения пассажирского железнодорожного транспорта дальнего следования.

1.

В процессе алгоритмизации и разработки программного обеспечения для формирования расписания нами привлечены следующие концепции [7]: программное решение задачи в рамках системы управления безопасностью движения; двухэтапный процесс решения; идеология жадного алгоритма; концепции загруженности и равномерности; использование методов ранжирования теории принятия решений.

Двухэтапный процесс решения задачи включает формирование начального расписания и последующую его оптимизацию. Под начальным понимается программно сформированное расписание при соблюдении обязательных ограничений. Методы обоих этапов цикличны и завершаются либо после включения всех маршрутов в начальное расписание, либо при невозможности дальнейшего улучшения расписания.

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.

Задача оптимизации начального расписания решается последовательным выбором наиболее неравномерного маршрута и последующей его перестановкой в расписании в определяемое время отправления с начальной станции. Перестановка маршрута в расписании также ба-

зируется на концепции равномерности. На каждом шаге оптимизации расписания опять же присутствуют две операции выбора.

Такой подход характерен для жадных алгоритмов и он применим для задач формирования расписаний и связанных с этим задач распределения ресурсов. Использование идеологии жадных алгоритмов предполагает цикличность процедур для обоих этапов решения задачи формирования расписания.

Операции выбора в представляемых алгоритмах являются многокритериальными и для их реализации привлечен аппарат методов ранжирования [8].

2.

Исходные данные задачи:

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

железнодорожной сети;

$L = \{l_j, j = \overline{1, J}\}$ — множество перего-

нов 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 -ую станцию;

$F = \{(s, l), s \in S, l \in L\}$ — множество инцидентных пар — станция s является одной из двух граничных станций перегона l . Очевидно, что 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 ;

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

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

n_d — количество суток интервала расписания;





$Day = (day_1, day_2, \dots, day_{nd})$ – 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;

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

$U = \{(r, day), r \in R, day \in Day\}$ – множество инцидентных пар, частично формирующих заявки поездов маршрутов – поезд маршрута r должен отправляться с начальной станции в день day ; используя (1), получаем множество заявок поездов маршрутов:

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

$$d_{k,i} = \left((l_{k,i}, s_{k,i}, \text{int}_{k,i}), i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r} \right) -$$

заявка на прохождение маршрута k по i -му перегону на i -ую станцию, где $\text{int}_{k,i}$ – интервал времени движения от $(i-1)$ -ой станции до i -ой станции; заявка на прохождение поезда $u_{k,j}$ по i -ому перегону на i -ую станцию

$$d_{k,i,j} = \left(\begin{array}{l} (l_{k,i}, s_{k,i}, \text{int}_{k,i}, day_{k,j}), \\ i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, \\ j = \overline{1, n_k}, day_{k,j} \in Day \end{array} \right), \quad (3)$$

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

Исходные расчётные 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 -ый перегон.

3.

Переменные задачи:

ni – количество включенных в начальное расписание маршрутов или оптимизированных (переставленных) маршрутов в расписании;

nr – количество не включенных в начальное расписание маршрутов или не оптимизированных маршрутов в расписании;

nit – количество включенных в начальное расписание поездов;

nit_i – количество включенных в начальное расписание поездов, проходящих через i -ую станцию;

nil_j – количество включенных в начальное расписание поездов, проходящих через j -ый 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 -ому перегону на i -ую станцию будет определяться следующим выражением

$$e_{k,i,j} = \left(\begin{array}{l} (l_{k,i}, s_{k,i}, \text{int}_{k,i}, day_{k,j}, ti_{k,i,j}, tf_{k,i,j}), \\ i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, \\ j = \overline{1, n_k}, day_{k,j} \in Day \end{array} \right); \quad (4)$$

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

оценка загруженности i -ой станции по проходящим через нее поездам

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

оценка загруженности j -ого перегона по проходящим через него поездам

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

скалярная оценка загруженности k -го маршрута по суткам расписания

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

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

$$k1_{k,i,j} = \frac{nit_i (ti_{suc} + ti_{prec} - 2ti_{k,i,j})}{2 \cdot Interval},$$

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

где ti_{prec} и ti_{suc} — времена прибытия на i -ую станцию поездов, предшествующих и последующих по отношению ко времени $ti_{k,i,j}$ в интервале расписания;

оценка равномерности распределения события $e_{k,i,j}$ в периодах расписания i -ой 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 распределения событий $K1_i$ расписания i -ой станции в интервале расписания

$$K1_i = \sqrt{\frac{1}{nt_i} \sum_{j=1}^{nt_i} (Int_i - Intr_{i,j})^2}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (10)$$

где $Int_i = \frac{Interval}{nt_i}$, $i = \overline{1, I}$ — среднее значение

интервала между прибытиями поездов на i -ую станцию;

$Intr_{i,j} = (ti_{j+1} - ti_j)$, $j = \overline{1, nt_i}$, $i = \overline{1, I}$ — величина интервала между прибытиями на станцию двух ближайших по времени поездов. Для $j = nt_i$ $ti_{j+1} = ti_1$;

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

$$k3_{k,i,j} = \frac{nil_i (ti_{suc} + ti_{prec} - 2ti_{k,i,j})}{2 \cdot Interval},$$

$$i = \overline{1, n_{k,s}}, \quad k = \overline{1, n_r}, \quad j = \overline{1, n_k}, \quad (11)$$

где ti_{prec} и ti_{suc} — времена начала движения поездов на i -ом перегоне, предшествующих и последующих по отношению ко времени $ti_{k,i,j}$;

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

$$k4_{k,i,j} = \frac{\sum_{j=1}^{n_d} q(l_{k,i}, s_{k,i}, t_{k,i,j}, day_{k,j})}{n_d}, \quad (12)$$

где

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

$q \in Q_l$ — множество булевых обозначений событий перегона;

оценка равномерности распределения событий $K2_i$ расписания i -го перегона в интервале расписания

$$K2_i = \sqrt{\frac{1}{nl_i} \sum_{j=1}^{nl_i} (Int_i - Intr_{i,j})^2}, \quad i = \overline{1, J}, \quad (13)$$

где $Int_i = \frac{Interval}{nl_i}$, $i = \overline{1, J}$ — среднее значение

интервала между началами движения поездов по i -ому перегону;

$Intr_{i,j} = (ti_{j+1} - ti_j)$, $j = \overline{1, nl_i}$, $i = \overline{1, J}$ —

величина интервала между началами движения поездов по i -ому перегону двух ближайших по времени поездов.

4.

Задача формирования начального расписания состоит в пошаговом выборе очередного маршрута r_{ni+1} и формировании расписания $S = \{TI_i, i = \overline{1, ni+1}\}$, кото-

рое многокритериально минимизирует четыре вектора оценок равномерности событий станций и перегонов выбранного маршрута

$$\min \begin{cases} (k1_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k2_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k3_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \\ (k4_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \end{cases} \quad (14)$$

при обязательных ограничениях

$$\forall s, \forall day, \forall t \sum_{t \in Interval} q \leq pl_i; \quad (15)$$

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

$$\forall l, \forall day, \forall t (tfl_i - tfl_{i-1}) \geq \Delta t_{i,j}. \quad (16)$$





Целевая функция (14) обеспечивает многокритериальную минимизацию оценок равномерности событий расписаний станций и перегонов при включении очередного маршрута в начальное расписание. Ограничения (15) касаются одновременного нахождения поездов на станциях в пределах не более количества путей с пассажирскими платформами. Ограничения (16) отражают соблюдение необходимого интервала между последовательными выездами поездов со станции и на станцию.

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

$$\{ (c_{1,k}, c_{2,k}, \dots, c_{i,k}, i = \overline{1, n_{k,s}}), k = \overline{1, nr} \}; \quad (17)$$

$$\{ (c_{2,k}, c_{2,k}, \dots, c_{2,k}, i = \overline{1, n_{k,s} - 1}), k = \overline{1, nr} \}. \quad (18)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (17) и (18) порождает множества рангов маршрутов по загрузке станций и перегонов:

$$\{ rank1_k, k = \overline{1, nr} \}; \quad (19)$$

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

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

$$\{ rank3_k, k = \overline{1, nr} \}. \quad (21)$$

Ранги (19, 20, 21) формируют множество векторов маршрутов

$$\{ (rank1_k, rank2_k, rank3_k), k = \overline{1, nr} \}. \quad (22)$$

Старший по рангу маршрут, полученный многокритериальным ранжированием векторов (22), 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 $= 0,1$ часа до 24 часов определение значений оценок (8, 9, 11, 12) для всех перегонов и станций маршрута с учетом ограничений (15, 16) и накопление множеств векторов

$$\{ ti_{ni+1,1}, (k1_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (23)$$

$$\{ ti_{ni+1,1}, (k2_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (24)$$

$$\{ ti_{ni+1,1}, (k3_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}; \quad (25)$$

$$\{ ti_{ni+1,1}, (k4_{ni+1,i,j}, i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}}) \}. \quad (26)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (23, 24, 25, 26) формируют множества векторов рангов для начальных времен движения поездов маршрута r_{ni+1}

$$\left\{ \begin{aligned} &ti_{ni+1,1}, (rank1, rank2, rank3, rank4), \\ &ti_{ni+1,1} = \overline{0, 240} \end{aligned} \right\}. \quad (27)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (27) определяет начальное время TI_{ni+1} движения поездов маршрута r_{ni+1} в начальном расписании.

5.

Задача оптимизации начального расписания состоит в пошаговом выборе очередного маршрута r_{ni+1} и формировании расписания $S = \{ TI_i, i = \overline{1, ni+1} \}$, которое многокритериально минимизирует два вектора оценок равномерности станций и перегонов выбранного маршрута

$$\min \left\{ \begin{aligned} &(K1_i, i = \overline{1, I}) \\ &(K2_i, i = \overline{1, J}) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

при обязательных ограничениях (15) и (16).

Целевая функция (28) обеспечивает минимизацию среднеквадратичных отклонений интервалов между событиями на станциях и перегонах. Целевая функция связана с необходимостью многокритериального ранжирования получаемых векторов (28). Завершение процесса оптимизации начального транспортного расписания обусловлено принимаемой стратегией действий.

Оценки равномерности распределения событий расписаний станций (10) и перегонов (13) формируют множества первых и вторых векторных компонент равномерности маршрутов на очередном шаге оптимизации начального расписания

$$\left\{ \left(\alpha_{s,1} K1_{1,k}, \alpha_{s,2} K1_{2,k}, \dots, \right), \right. \\ \left. \alpha_{s,k} K1_{i,k}, i = \overline{1, n_{k,s}} \right\}, \\ k = \overline{1, nr} \quad (29)$$

где $\alpha_{s,i}$ – коэффициент важности оценки,

$$\alpha_{s,i} = \frac{nt_i}{\sum_{j=1}^I nt_j}.$$

$$\left\{ \left(\alpha_{l,1} K2_{1,k}, \alpha_{l,2} K2_{2,k}, \dots, \right), \right. \\ \left. \alpha_{l,k} K2_{i,k}, i = \overline{2, n_{k,s}} \right\}, \\ k = \overline{1, nr} \quad (30)$$

где $\alpha_{l,i}$ – коэффициент важности оценки,

$$\alpha_{l,i} = \frac{nl_i}{\sum_{j=1}^J nl_j}.$$

Многокритериальное ранжирование векторов (29) порождает множество рангов маршрутов по равномерности станций

$$\{rank1_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (31)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (30) порождает множество рангов маршрутов по равномерности перегонов

$$\{rank2_k, k = \overline{1, nr}\}. \quad (32)$$

Ранги (31, 32) формируют множество векторов (критериев равномерности) маршрутов

$$\left\{ (rank1_k, rank2_k), \right. \\ \left. k = \overline{1, nr} \right\}. \quad (33)$$

Старший по рангу маршрут, полученный многокритериальным ранжированием векторов (33), является самым неравномерным при принятых оценках и критериях равномерности. Он становится очередным кандидатом r_{ni+1} на перестановку в начальном расписании.

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 $= 0,1$ часа до 24 часов определить значения оценок (10, 13) для всех перегонов и станций маршрута с уче-

том ограничений (15, 16) и накоплением множеств векторов

$$\left\{ ti_{ni+1,1}, \left(\alpha_{s,i} K1_{ni+1,i,j}, \right. \right. \\ \left. \left. i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}} \right) \right\}; \quad (34)$$

$$\left\{ ti_{ni+1,1}, \left(\alpha_{l,i} K2_{ni+1,i,j}, \right. \right. \\ \left. \left. i = \overline{1, n_{ni+1,s}}, j = \overline{1, n_{ni+1}} \right) \right\}. \quad (35)$$

Многокритериальные ранжирования векторов (34, 35) формируют множества векторов рангов для начальных времен движения поездов маршрута r_{ni+1}

$$\{ti_{ni+1,1}, (rank1, rank2), ti_{ni+1,1} = 0, 240\}. \quad (36)$$

Многокритериальное ранжирование векторов (36) определяет искоемое начальное время TI_{ni+1} движения поездов маршрута r_{ni+1} в оптимизированном расписании железнодорожной сети.

Предложенные математическая модель и алгоритмы формирования и оптимизации начального расписания реализованы программно в рамках системы управления безопасностью движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Peeters, L. Cyclic Railway Timetable Optimization, ERIM Ph.D. series Research in Management, Erasmus Research inst. of Management (ERIM), 2002.
3. Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P. Modeling and solving the train timetabling problem, Operations Research, 2002, 50 (5), pp. 851–861.
4. Fischer, F., Helmberg, C., Jansen, J., Krostitz, B. Towards solving very large scale train timetabling problems by lagrangian relaxation, paper presented at the ATMOS2008 – 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems, Dagstuhl, Germany.
5. Cacchiani, V., Caprara, A., Toth, P. A column generation approach to train timetabling on a corridor, 2008, 4OR, 6 (2), pp. 125–142.
6. Burdett, R., Kozan, E. A sequencing approach for creating new train timetables, OR Spectrum, 2010, 32 (1), pp. 163–193.
7. Клеванский Н. Н. Основные концепции реализации задач формирования расписаний // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – № 2. – С. 9–21.
8. Клеванский Н. Н. Методы ранжирования в задачах формирования расписаний // Труды XII всероссийского совещания по проблемам управления – ВСПУ-2014. – М., 2014. – С. 8040–8050. ●

Координаты авторов: Клеванский Н. Н. – nklevansky@yandex.ru, Антипов М. А. – antipovmaxim@ya.ru.

Статья поступила в редакцию 27.06.2016, принята к публикации 30.08.2016.

