

3. Лунаев В. В. Сопровождение и управление конфигурацией сложных программных средств. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2015. 452 с.
4. Продуктовая линейка Oracle.
<http://www.comportal.kz/Vendors/Oracle/OracleProducts.aspx>.
5. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 430 с.
6. Божко А. Н. Структурный синтез как задача дискретной оптимизации // Наука и образование, 2010. № 9. <http://technomage.edu.ru/doc/158337.html>.

Structural synthesis profile service-oriented it architecture

Maria Yakovlevna Parfenova, professor, Head of the Scientific Center, Moscow Witte University

In article are considered the problem of structural synthesis of the strategic profile of service-oriented IT architecture of the organization. To formalize this problem are encouraged to use oriented hypergraph which allows to take into account limitations of the various project's situations. In article are represented the approach for typification and unification of functional modules used to form generalized hypergraph structure and the system of constraints on the implementation of information services. In article are formulated the task of choosing the best option for the realization of the profile of information services on the specified criteria.

Key words: IT profile, structural synthesis, hypergraph, service-oriented architecture, unification, information services

УДК 007:004.02

ФОРМИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ РАСПИСАНИЙ

*Николай Николаевич Клеванский, канд. техн. наук, проф. СГАУ,
e-mail: nklevansky@yandex.ru,*

*Максим Анатольевич Антипов, аспирант,
e-mail: nklevansky@yandex.ru,*

*Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова,
<http://sgau.ru>*

В статье представлены основные концепции и подходы к 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

DOI: 10.21777/2312-5500-2016-4-71-91

Введение

Управление транспортными системами (рис. 1) включает иерархически взаимосвязанные проблемы разного уровня [1–4]:

- стратегический уровень:
 - планирование инфраструктуры (network planning);
 - планирование маршрутов (line planning);
- тактический уровень:
 - формирование расписания движения транспорта между пунктами пересадки/остановок (погрузки/выгрузки) (timetabling);
 - маршрутизация грузовых перевозок (freight vehicle routing);
 - планирование ресурсов транспортной сети (vehicle scheduling, crew scheduling etc);
- оперативный уровень:
 - управление сменой движущих средств (vehicle rostering);
 - управление сменой бригад (crew rostering).



Большинство проблем транспортных систем решаются на тактическом уровне [1, 5, 6]. К этим проблемам в порядке их решения относятся:

- 1) формирование расписания движения регулярного пассажирского транспорта;
- 2) маршрутизация чартерных пассажирских и грузовых перевозок;
- 3) формирование расписания чартерных пассажирских и грузовых перевозок;
- 4) формирование расписания движущих средств – локомотивов, ледоколов и т. п.
- 5) формирование расписания работы бригад обслуживания.

«Сложность решения задач маршрутизации и формирования расписания определяется жесткостью ограничений на пропускную способность путей и транспортные средства. Одним из представителей транспортных систем с достаточно жесткими ограничениями является железнодорожный транспорт с постоянным сезонным расписанием пассажирских поездов» [5].

Задачам управления для железнодорожного транспорта посвящено большое число публикаций и выступлений на конференциях.



Первая задача – планирование инфраструктуры – имеет смысл только для стран со слабо развитыми железнодорожными сетями и в зарубежных публикациях практически не отражена. Кроме того, решение о расширении железнодорожных сетей

носит чисто политический характер. Таким образом, управленческие решения для железнодорожных сетей начинаются с планирования маршрутов (маршрутизации) и продолжаются формированием расписаний, планированием работы подвижного состава и обслуживающего персонала, распределением платформ для высадки пассажиров и т. д. Один из последних обзоров по маршрутизации представлен в [7].

Главными исходными данными для маршрутизации являются заявка в виде перечня пар «станция отправления – станция назначения» в форме матрицы (Origin/Destination Matrix – OD matrix) и общей инфраструктуры сети. Базируясь на этих исходных данных, осуществляется выбор наиболее соответствующего маршрута из предварительно определенных потенциальных маршрутов, объединяющих станции отправления и назначения. Кроме того, выбираются также ожидаемые частоты движения и емкости маршрутов. Эта задача решается раз в несколько лет, так как инфраструктура сети и OD matrix меняются нечасто.

Задача формирования расписания поездов (Train Timetabling Problem – ТТР) в европейских публикациях рассматривается в двух видах: циклическом [8] и нециклическом [9]. Различие между ними заключается в том, что циклические расписания связаны с необходимостью строгой периодичности в пределах суток или части суток, в то время

как нециклические расписания, являющиеся также периодическими, имеют период, равный суткам или нескольким суткам. Различие связано также с входными данными: интервалы времени, дающие возможность выбора приемлемого варианта решения для нециклических расписаний; частота и фиксированные времена прибытия для циклических расписаний.

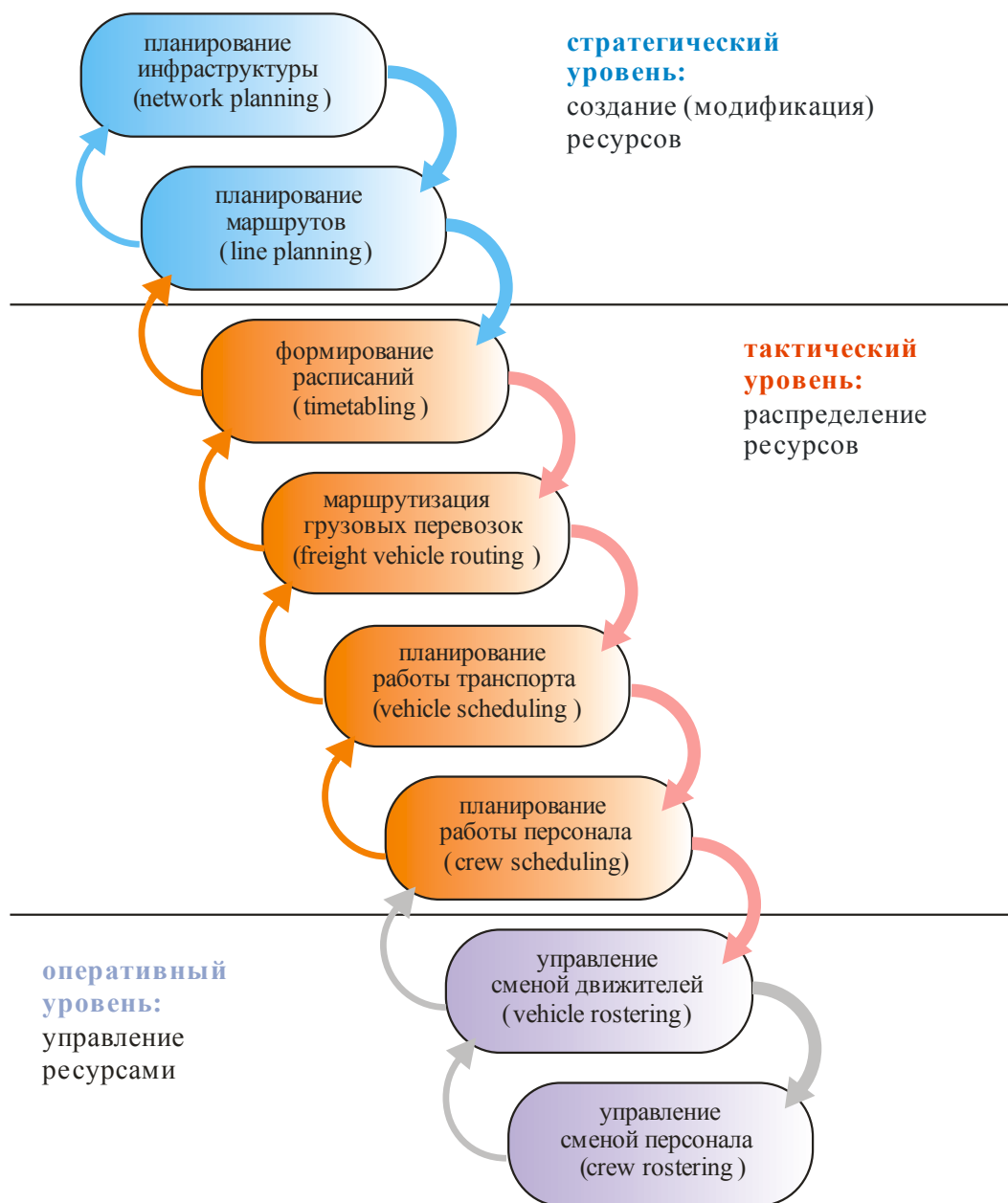


Рис. 1. Иерархия задач управления транспортными системами

Решение задачи ТТР не способно решить специфичные проблемы станций, для которых необходим более детальный подход к станционной топологии. В [6] предложено решение одной из проблем – распределение пассажирских платформ (Train Platforming Problem – TPP). Решение задачи TPP предполагает в качестве исходных данных актуальные расписания поездов и формирует пути движения через станции. Задача относится к оперативному уровню (рис. 1) управления транспортными системами и решается с помощью целочисленной модели.

Следующей проблемой станций является планирование работы подвижного состава (Rolling Stock Planning Problem – RSPP), что является заботой транспортных компаний. То есть формирование поезда – размещение вагонов различных классов для

удовлетворения запросов пассажиров и публичного расписания без превышения имеющегося парка компании [6]. Проблема также относится к оперативному уровню.

Последней является задача планирования бригад обслуживания (Crew Planning Problem), которая распределяет бригады по планируемым поездам в соответствии с требованиями профсоюзов и другими квалификационными ограничениями. Целью является минимизация обслуживающего персонала, необходимого для удовлетворения суточной потребности. Проблема относится к оперативному уровню и решается транспортной компанией.

В основе многих проблем управления лежит расписание поездов, поэтому его формирование является первоочередной задачей.

Большинство моделей формирования нециклических расписаний основаны на процедурах линейного программирования (Integer Linear Programming – ILP, Mixed Integer Linear Programming – MILP). MILP-модели используют непрерывное время, в то время как в ILP-моделях применяется дискретное представление времени.

В [10] показано использование дискретного представления времени и решения задачи с применением релаксации по Лагранжу для ограничений по пропускной способности путей. Математическая модель разработана как ILP. В работах [9, 11–13] также показано применение релаксации по Лагранжу для некоторых ограничений при решении задачи. В [14] описан метод генерации колонок для составления расписаний поездов в центральных коридорах итальянских железных дорог. Данный подход находит лучшие границы по сравнению с релаксацией по Лагранжу. В [15] осуществлено тестирование и сопоставление некоторых видов других формулировок ILP-модели. В [16] формулировка ILP-модели скорректирована, чтобы иметь возможность планирования дополнительных грузовых поездов внутри фиксированного расписания пассажирского транспорта. В [17] использовано динамическое программирование для разрешения задаваемых ограничений. В [18] введена эвристика, которая рассматривает каждое время отправления поезда с решением MILP-модели для существующего расписания. В [19] показаны другие эвристики для решения MILP-модели. В [20, 21] переформулировали задачу как одну из задач цеха (job-shop scheduling), в которой для каждого требования заданы отношения предшествования между его операциями. Отношения не являются строгими, то есть начало последующей операции должно быть не раньше окончания предшествующей операции. При этом нет отношений следования (предшествования) между отдельными требованиями. В [22–24] представлены различные обзоры для решения ТТР.

Проблема циклических расписаний впервые была представлена в [25]. В работе был поднят вопрос о циклическом планировании, базирующемся на задаче планирования периодических событий (Periodic Event Scheduling Problem – PESP). Для решения задачи авторами был предложен алгоритм, впоследствии уточненный в [26].

Модель минимизации времени ожидания в железнодорожной сети для циклического расписания решалась с помощью метода ветвей и границ [27] или с помощью генетических алгоритмов [28]. Еще один алгоритм генерации расписаний, базирующийся на распространении ограничений, для решения PESP предложен в [29]. В [30] представлена еще одна модель с применением метода ветвей и границ для решения PESP. В [31] обсуждены переменные времени поездки. В [8] представлено дальнейшее развитие PESP, а в [32] обсуждается осуществление симметрии в модели PESP. В [33] анализируются атрибуты PESP на примере расписания для метро Берлина. В [34] предложено использовать декомпозицию, базирующуюся на методе ветвей и границ, для решения PESP.

В [25] и [35] предложено разрешение вопроса о надежности циклических расписаний. В [36] рассмотрен вопрос об интеграции планирования сети, планировании маршрутов и планировании работы подвижного состава в одной модели циклического расписания (PESP). В [37] и [38] введена гибкая модель PESP – вместо фиксированных времен событий предусматриваются «окна» (интервалы времени).

В предлагаемом решении для описания каждого железнодорожного маршрута использовано его представление вектором пар станция/предшествующий перегон (рис. 2). Формирование расписания движения пассажирского железнодорожного транспорта относится к классу задач обслуживания требований для задаваемого интервала времени, внутри которого формируется расписание. Особенностью движения этого вида транспорта является его периодичность, измеряемая в сутках. Существуют ежедневные поезда, поезда, отправляющиеся раз в двое суток, два или один раз в неделю и т. п. Интервал времени (интервал расписания) равен наименьшему кратному периодов поездов расписания.

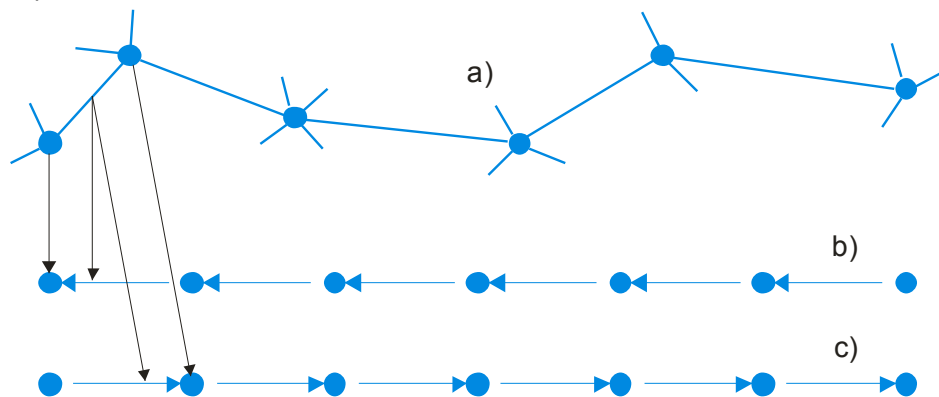


Рис. 2. Структура маршрутов железнодорожной сети: фрагмент сети (а); элементы структур прямого и обратного маршрутов (b, c)

Отношение предшествования в предлагаемых моделях является строгим – движение к последующей станции должно начинаться сразу по окончании остановки на предшествующей станции, в отличие от задач job-shop scheduling [20, 21].

Формирование расписания – это определение времен начала выполнения всех действий или их совокупностей в интервале расписания [39]. Для транспортного планирования необходимо последовательное решение двух задач:

- 1) определение времени проезда по каждому перегону маршрута и продолжительности остановки на каждой станции маршрута;
- 2) определение времен отправления с начальных станций маршрутов в пределах задаваемых суток интервала расписания.

Первая задача решается как задача маршрутизации и рассматриваться не будет, так как имеет самостоятельное значение [40]. Будет полагаться, что указанные времена прохождения перегонов и длительности остановок всех маршрутов известны. Вторая задача, задача формирования транспортного расписания, обладая NP-полнотой [5] и большим количеством технологических и эксплуатационных ограничений, решается только с помощью эвристических методов [41]. «Эвристические методы – это последовательность решающих правил, вычислений или процедур обработки информации, выполняемая для поиска эффективных решений» [41].

Статья является развитием формирования железнодорожного расписания на основе учета одного ресурса сети – станций [42].

Целями данной статьи являются:

- представление эвристических методов формирования расписания движения пассажирского железнодорожного транспорта дальнего следования с учетом двух главных ресурсов сети – перегонов и станций;
- разработка инструмента (информационной системы) для решения задач тактического и оперативного уровня управления транспортными системами.

1. Общие подходы

В процессе алгоритмизации и разработки программного обеспечения для формирования расписания движения железнодорожного транспорта использовались следующие

щие концепции [43]: программное решение задачи в рамках СУБД; двухэтапный процесс решения; идеология жадного алгоритма; концепция загруженности; концепция равномерности; использование методов ранжирования теории принятия решений.

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

Построим математическую модель транспортного расписания на примере железнодорожного расписания замкнутой железнодорожной сети. Из специфики работы железнодорожного транспорта следует, что периодичность движения пассажирских поездов кратна календарным суткам. То есть имеются ежедневные (ежесуточные) поезда, поезда с периодичностью раз в двое суток и т. д. Для грузового железнодорожного транспорта выявление периодичности их движения достаточно проблематично. Скорее можно вести речь о задаче встраивания расписания движения каждого грузового поезда в расписание пассажирского транспорта. Вследствие этого в дальнейшем под расписанием движения железнодорожного транспорта будет пониматься расписание движения пассажирских поездов.

Железнодорожная сеть состоит из станций и перегонов между ними. Введем понятие маршрута, под которым будем полагать множество поездов, имеющих одинаковые последовательности станций и времена прохождения через них в разные дни интервала расписания. Маршруты сети имеют различную периодичность, измеряемую в календарных сутках. То есть в сети могут присутствовать маршруты с ежесуточными поездами, с поездами, отправляющимися раз в двое суток, и т. д. Наименьшее кратное различных периодов будем называть интервалом расписания железнодорожной сети. Таким образом, задача формирования расписания железнодорожной сети сводится к определению начальных времен отправления поездов маршрутов в интервале расписания.

Для расписаний пунктов остановок и перегонов между ними использованы представления (рис. 3), в которых спираль является осью времени с отсчетом от ее начала, а длина спирали соответствует интервалу расписания [44]. 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 (рис. 3). Выбор маршрута базируется на концепции загруженности, то есть на каждом шаге определяется наиболее загруженный по требуемым ресурсам маршрут среди не включенных в расписание маршрутов. Выбор времени включения этого маршрута базируется на концепции равномерности использования ресурсов системы. То есть на каждом шаге решения задачи формирования начального расписания присутствуют две операции выбора, после каждой из которых принимаются некоторые решения.

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 базируется на концепции равномерности. То есть выбираемое время перестановки по крайней мере не ухудшает показатели равномерности всего расписания. На каждом шаге решения задачи оптимизации календарного графика также присутствуют две операции выбора и необходимость принятия некоторых решений.

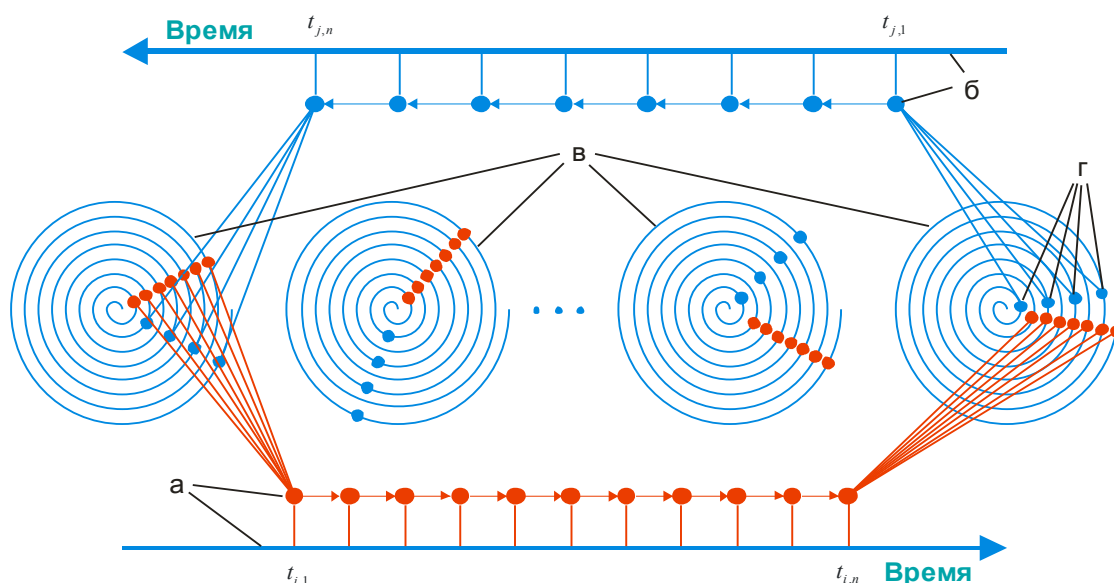


Рис. 3. Схема расписаний для векторов заявок: а) расписание (вектор) i -го маршрута; б) расписание (вектор) j -го маршрута; в) спиральные представления расписаний пунктов остановок; г) события периодов расписания пункта остановки

Такой подход на обоих этапах характерен для жадных алгоритмов и применим для задач формирования расписаний и связанных с этим задач распределения ресурсов [45].

Жадный подход строит решение посредством последовательности шагов, на каждом из которых получается частичное решение поставленной задачи, пока не будет получено полное решение. Использование идеологии жадных алгоритмов предполагает цикличность алгоритмов для обоих этапов решения задачи формирования расписания [45].

Операции выбора в представляемых алгоритмах являются многокритериальными [46], и для их реализации привлечен аппарат методов ранжирования [47]. В основе этих методов лежит метод многокритериального ранжирования, один из видов которого – метод «жесткого» ранжирования – был принят для формализации алгоритмов и реализации программного обеспечения. В дальнейшем под термином многокритериальное ранжирование будет пониматься «жесткое» ранжирование. Будет различаться прямое и обратное многокритериальное ранжирование. В прямом ранжировании исходные данные ранжируются по «возрастанию». В обратном ранжировании – по «убыванию».

2. Математическое моделирование расписания железнодорожного пассажирского транспорта дальнего следования

Введем необходимые в дальнейшем обозначения.

Исходные данные задачи:

I – количество станций железнодорожной сети;

$S = \{s_i, i = \overline{1, I}\}$ – множество станций железнодорожной сети, индекс станции

$i = \overline{1, I}$ имеет различный характер в зависимости от решаемой задачи:

- идентификатор станции в соответствующей таблице БД;
- порядковый номер станции в маршруте;

J – количество перегонов железнодорожной сети;

$L = \{l_j, j = \overline{1, J}\}$ – множество перегонов железнодорожной сети, индекс перегона

$j = \overline{1, J}$ имеет различный характер в зависимости от решаемой задачи:

- идентификатор перегона в соответствующей таблице БД;
- порядковый номер перегона в маршруте;

pl_i – количество платформ для высадки/посадки пассажиров i -й 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 $n_f = 2 * J$;

n_r – количество маршрутов железнодорожной сети;

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

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

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

вектор заявок маршрута r_k – последовательность пар перегон/станция от начальной станции до конечной. У первой пары маршрута (l_1, s_1) для перегона l_1 принимается значение NULL (пустое значение) (рис. 2, 3), i – порядковый номер станции и перегона по пути следования маршрута;

n_d – количество суток интервала расписания;

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

$Interval = 24 * n_d$ – 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 или количество поездов k -го маршрута в интервале расписания, i – порядковый номер суток отправления поездов k -го маршрута;

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

$U = \{(r, day), r \in R, day \in Day\}$ – множество инцидентных пар, частично формирующих заявки поездов маршрутов – поезд маршрута r должен отправляться с начальной станции в день day . Дни отправления определяют периодичность движения поездов маршрута в интервале расписания;

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 -ю станцию, где $int_{k,i}$ – временной интервал движения от $(i - 1)$ -й станции до i -й станции маршрута, $int_{k,1} = 0$;

заявка на прохождение поезда $u_{k,j}$ маршрута k по i -му перегону на i -ю станцию определяется следующим выражением:

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

где атрибут $day_{k,j}$ принимается равным дню отправления поезда маршрута для всех станций и перегонов.

Исходные расчетные данные задачи:

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

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

Переменные задачи:

ni – количество:

- включенных в начальное расписание маршрутов;
- оптимизированных (переставленных) маршрутов в расписании;

nr – количество:

- не включенных в начальное расписание маршрутов;
- не оптимизированных маршрутов в расписании;

$ni + nr \equiv n_r$ на любом шаге формирования или оптимизации начального календарного графика;

nit – количество включенных в начальное расписание поездов;

nit_i – количество включенных в начальное расписание поездов, проходящих через i -ю станцию, $nit_i \leq ni$;

nil_j – количество включенных в начальное расписание поездов, проходящих через j -й перегон, $nil_j \leq nl_j$;

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 -ю станцию будет определяться следующим выражением:

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

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

оценка загруженности 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 загруженности 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 интервала расписания:

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

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

$$k1_{k,i,j} = \frac{nit_i (ti_{suc} + ti_{prec} - 2ti_{k,i,j})}{2 * \text{Interval}}, \quad i = \overline{1, n_{k,s}}, k = \overline{1, n_r}, j = \overline{1, n_k}, \quad (8)$$

где ti_{prec} и ti_{suc} – времена прибытия на i -ю станцию поездов, предшествующих и последующих по отношению ко времени $ti_{k,i,j}$ в интервале расписания (рис. 4);

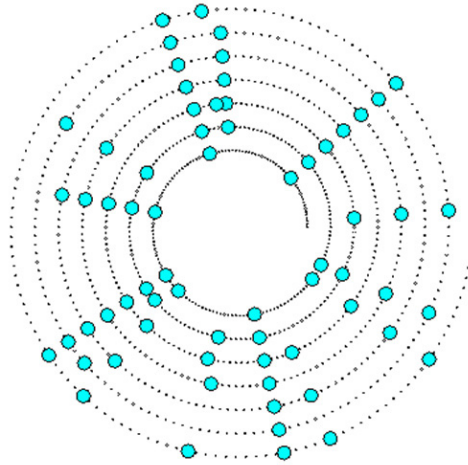


Рис. 4. Расписание событий расписания i -й станции/ j -го перегона (въезд/выезд)

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 распределения событий $K1_i$ расписания i -й станции в интервале расписания (рис. 4):

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

где $Int_i = \frac{Interval}{nt_i}$, $i = \overline{1, I}$, – среднее значение интервала между прибытиями поездов на i -ю станцию; $Intr_{i,j} = (t_{j+1} - t_j)$, $j = \overline{1, nt_i}$, $i = \overline{1, I}$, – величина интервала между прибытиями на станцию двух ближайших по времени поездов. Для $j = nt_i$ $t_{j+1} = t_1$;

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

$$k3_{k,i,j} = \frac{nil_i(t_{i_{suc}} + t_{i_{prec}} - 2t_{k,i,j})}{2 * Interval}, \quad i = \overline{1, n_{k,s}}, \quad k = \overline{1, n_r}, \quad j = \overline{1, n_k}, \quad (11)$$

где $t_{i_{prec}}$ и $t_{i_{suc}}$ – времена начала движения поездов на i -м перегоне, предшествующих и последующих по отношению ко времени $t_{k,i,j}$ в интервале расписания (рис. 4);

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

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

где

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

$q \in Q_i$ – множество булевых обозначений событий перегона;

оценка равномерности распределения событий $K2_i$ расписания i -го перегона в интервале расписания (рис. 4):

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

где $Int_i = \frac{Interval}{nl_i}$, $i = \overline{1, J}$, – среднее значение интервала между началами движения поездов по i -му 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 -му перегону двух ближайших по времени поездов. Для $j = nl_i$ $ti_{j+1} = ti_1$.

Задача формирования 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 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

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

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

Целевая функция (14) обеспечивает многокритериальную минимизацию оценок равномерности событий расписаний станций и перегонов, что достаточно для формирования начального транспортного расписания при включении в него очередного маршрута. Целевая функция связана с необходимостью многокритериального ранжирования получаемых векторов (14). Завершение процесса формирования начального транспортного расписания обусловлено исчерпанием списка не включенных в расписание маршрутов ($nr = 0$). Неравенства ограничений (15) отражают безусловность того, что для каждой станции количество одновременно находящихся на ней поездов в любое время расписания не должно превышать количество путей с платформами для пассажиров. Неравенства ограничений (16) отражают безусловность соблюдения необходимого интервала между последовательными выездами поездов со станции на перегон и с перегона на станцию.

Введем следующие выражения для этапа формирования начального расписания.

Оценки загруженности станций (5) формируют множество первых векторных компонент загруженности маршрутов на очередном шаге формирования начального расписания:

$$\left\{ (c1_{1,k}, c1_{2,k}, \dots, c1_{i,k}, \quad i = \overline{1, n_{k,s}}), \quad k = \overline{1, nr} \right\}. \quad (17)$$

Оценки загруженности перегонов (6) формируют множество вторых векторных компонент загруженности маршрутов на очередном шаге формирования начального расписания:

$$\left\{ (c2_{1,k}, c2_{2,k}, \dots, c2_{i,k}, \quad i = \overline{1, n_{k,s} - 1}), \quad k = \overline{1, nr} \right\} \quad (18)$$

Обратное многокритериальное ранжирование векторов (17) порождает множество рангов маршрутов по загруженности станций:

$$\left\{ rank1_k, \quad k = \overline{1, nr} \right\}. \quad (19)$$

Обратное многокритериальное ранжирование векторов (18) порождает множество рангов маршрутов по загруженности перегонов:

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

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

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

Ранги (19), (20), (21) формируют множество векторов (критериев загруженности) маршрутов:

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

Старший по рангу маршрут, полученный обратным многокритериальным ранжированием векторов (22), является самым загруженным при принятых оценках и критериях загруженности. Он 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 накоплением множеств векторов

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

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

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

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

Прямые многокритериальные ранжирования векторов (23), (24), (25), (26) формируют множества векторов рангов для начальных времен движения поездов маршрута r_{ni+1} :

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

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

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

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

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 в интервале расписания сети (10) формируют множество первых векторных компонент равномерности маршрутов на очередном шаге оптимизации начального расписания:

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

где $\alpha_{s,i}$ – коэффициент важности оценки, $\alpha_{s,i} = \frac{nt_i}{\sum_{j=1}^I nt_j}$.

Оценки равномерности распределения событий расписаний перегонов в интервале расписания сети (13) формируют множество вторых векторных компонент равномерности маршрутов на очередном шаге оптимизации начального расписания:

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

где $\alpha_{l,i}$ – коэффициент важности оценки, $\alpha_{l,i} = \frac{nl_i}{\sum_{j=1}^J nl_j}$.

Необходимо отметить, что

$$\sum_{i=1}^I nt_i = 1; \quad \sum_{i=1}^J nl_i = 1.$$

Обратное многокритериальное ранжирование векторов (29) порождает множество рангов маршрутов по равномерности станций:

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

Обратное 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:

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

Старший по рангу маршрут, полученный прямым многокритериальным ранжированием векторов (33), является самым неравномерным при принятых оценках и крите-

риях равномерности. Он становится очередным кандидатом r_{ni+1} на перестановку в 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 определение значений оценок (10), (13) для всех перегонов и станций маршрута с учетом ограничений (15), (16) и накоплением множеств векторов

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

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

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

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

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

3. Реализация и численные результаты

Для проверки корректности предлагаемых решений было разработано тестовое задание для пассажирского железнодорожного транспорта. Тестовое задание включает три группы элементов. Первая группа состоит из элементов, описывающих структуру железнодорожной сети, вторая группа описывает маршруты следования поездов, третья группа описывает периодичность отправления поездов. Структура железнодорожной сети тестового задания (рис. 5) 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; (в табл. 1 приведены их характеристики), количество перегонов – 128 (из них 51 однокорейный), общее количество маршрутов – 100, количество поездов маршрутов – 471 в неделю.

Таблица 1

Типы станций тестового задания

Количество перегонов, граничащих со станцией	Количество станций	Тип станции
1	12	Тупиковая
2	50	Обычная
3	14	Узловая
4	20	Узловая
5	2	Узловая
6	2	Узловая

Маршруты определяют последовательность станций и перегонов по пути следования поездов. Перечисленные элементы тестового задания количественно определяют конкуренцию поездов маршрутов за основные ресурсы сети – перегоны и перроны станций. Качественно конкуренция определяется периодичностью отправления поездов маршрутов. Тестовое задание содержит как ежедневные маршруты, так и маршруты, отправляющиеся несколько раз в неделю (табл. 2).

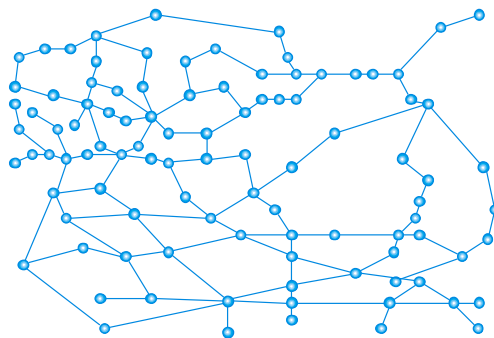


Рис. 5. Железнодорожная сеть тестового задания

Таблица 2

Периодичность отправления поездов маршрутов

Количество отправлений поездов маршрутов каждую неделю	Периодичность, сутки	Количество маршрутов по типам (пассажирский/скорый)	Количество поездов маршрутов по типам (пассажирский/скорый)
1	7	8/	8/
2	7	16/2	32/14
3	7	4/7	12/21
4	7	6/7	24/28
5	7	2/	10/
6	7	4/	24/
7	1	14/30	98/210
Итого:		54/46	208/263

Схема базы данных информационной системы формирования железнодорожных расписаний основана на многодольном графовом представлении (рис. 6) введенных в разделе 2 множеств и связей между ними. Таблицы полученной базы данных системы помимо исходных данных тестового задания содержат также атрибуты для исходных расчетных данных и переменных задач.

Предложенные методы формирования и оптимизации начального расписания реализованы в среде СУБД Access средствами встроенного в язык программирования структурированного языка запросов и показали свою работоспособность.

3.1. Формирование начального транспортного расписания

Задача формирования начального расписания пассажирского железнодорожного транспорта сводится к определению времени прибытия и отправления поездов маршрутов на станции сети.

Выбор маршрута в начале каждого шага формирования начального расписания основан на концепции загруженности ресурсов сети. Критерии загруженности маршрутов имеют трехвекторную структуру и формируются из скалярных оценок загруженности станций, перегонов и суток интервала расписания.

Операция выбора маршрута использует многовекторный метод ранжирования критериев загруженности, не включенных в начальное расписание маршрутов. Многовекторное ранжирование является комбинацией последовательных многокритериальных ранжирований. Для определенного многовекторным ранжированием самого загруженного маршрута формируется набор исходных данных в виде критериев равномерности прохождения маршрута в пределах суток дня отправления. Многовекторное ранжирование исходных данных определяет искомое время отправления поездов

маршрута с обеспечением наибольшей равномерности текущего начального расписания.

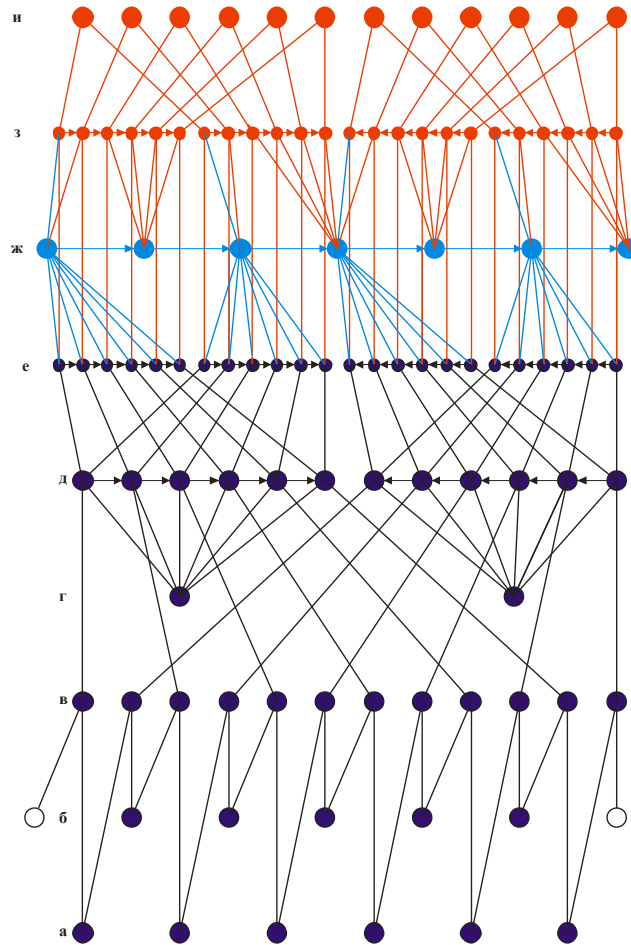


Рис. 6. Фрагмент многодольного графа железнодорожного расписания: а – станции; б – перегоны; в – структура сети; г – маршруты; д – структура маршрутов; е – векторы заявок поездов маршрутов; ж – сутки отправления с начальных станций; з – расписания поездов; и – времена прибытия поездов на станции маршрутов

Алгоритм формирования начального транспортного расписания имеет следующий вид.

Таблица 3

Алгоритм формирования начального транспортного расписания

До тех пор пока не все маршруты включены в расписание, цикличное выполнение следующих действий:

- 1) расчет оценок загрузки станций (5) и перегонов (6) маршрутов, не включенных в начальное расписание;
- 2) формирование первых (17) и вторых (18) векторных компонент критериев загрузки маршрутов, не включенных в начальное расписание;
- 3) формирование множеств рангов маршрутов по загрузке станций (19) обратным многокритериальным ранжированием векторов (17);
- 4) формирование множеств рангов маршрутов по загрузке перегонов (20) обратным многокритериальным ранжированием векторов (18);
- 5) формирование множеств рангов маршрутов по загрузке суток интервала расписания (21) обратной сортировкой выражений (7);
- 6) формирование множества векторов (критериев загрузки) маршрутов (22);
- 7) выявление очередного кандидата r_{ni+1} на включение в начальное расписание путем обратного многокритериального ранжирования рангов (22);
- 8) организация цикла: для $t_{ni+1,1} = 0$ с шагом = 0,1 часа до 24 часов определение значений

- оценок (8), (9), (11), (12) для всех перегонов и станций маршрута r_{ni+1} с учетом ограничений (15), (16) и накоплением множеств векторов (23), (24), (25), (26);
- 9) формирование множества векторов рангов (27) для начальных времен движения поездов маршрута r_{ni+1} путем прямых многокритериальных ранжирований векторов (23), (24), (25), (26);
 - 10) определение начального времени TI_{ni+1} движения поездов маршрута r_{ni+1} путем прямого многокритериального ранжирования векторов (27);
 - 11) включение поездов маршрута r_{ni+1} в начальное расписание с начальным временем TI_{ni+1} ;
 - 12) исключение маршрута r_{ni+1} из списка маршрутов, не включенных в начальное расписание.

На рис. 7 и 8 представлены визуализированные результаты формирования начального расписания железнодорожной сети для самых загруженных перегона и станции.

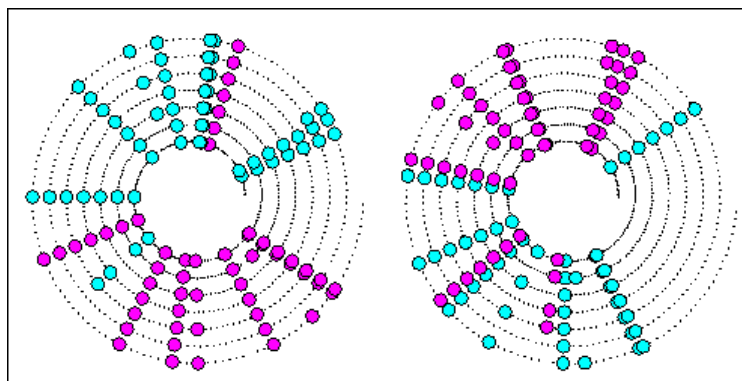


Рис. 7. Расписания въезда/выезда с перегона на граничные станции:

● – выезд на перегон; ● – въезд на станцию

На рис. 8 в верхнем правом углу указано среднеквадратичное отклонение событий станции.

3.2. Оптимизация начального транспортного расписания

Выбор наиболее неравномерного маршрута в методе оптимизации начального транспортного расписания основан на оценках и критериях равномерности всех маршрутов текущего расписания. Так как критерии (векторы) равномерности маршрутов зависят от текущего расписания, то необходим расчет оценок равномерности и формирование критериев равномерности маршрутов в начале каждого шага оптимизации. На каждом шаге оптимизации осуществляется выбор наиболее неравномерного маршрута.

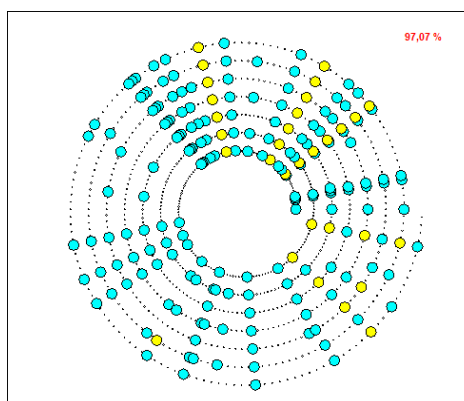


Рис. 8. Расписание въезда поездов на станцию:

● – с одного перегона; ● – двух поездов с разных перегонов

Операция выбора маршрута использует многовекторный метод ранжирования критериев равномерности маршрутов. Для определенного многовекторным ранжированием самого неравномерного маршрута формируется набор исходных данных в виде

критериев равномерности прохождения маршрута в пределах суток дня отправления. Многовекторное ранжирование исходных данных определяет искомое время отправления поездов маршрута с обеспечением наибольшей многокритериальной равномерности текущего начального расписания.

Алгоритм оптимизации начального транспортного расписания имеет следующий вид.

Таблица 4

Алгоритм оптимизации начального транспортного расписания

<p>До тех пор пока не все маршруты переставлены в расписании, цикличное выполнение следующих действий:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) расчет оценок равномерности распределения событий расписаний станций в интервале расписания (10); 2) формирование множества первых векторных компонент критериев равномерности маршрутов (29); 3) формирование множества рангов маршрутов по равномерности станций (31) обратным многокритериальным ранжированием векторов (29); 4) расчет оценок равномерности распределения событий расписаний перегонов в интервале расписания (13); 5) формирование множества вторых векторных компонент критериев равномерности маршрутов (30); 6) формирование множеств рангов маршрутов по загруженности перегонов (32) обратным многокритериальным ранжированием векторов (30); 7) формирование множества векторов (критериев равномерности) маршрутов (33) на основании рангов (31), (32); 8) выявление очередного кандидата r_{ni+1} на перестановку в расписании путем прямого многокритериального ранжирования рангов (33); 9) организация цикла: для $t_{ni+1,1}^i = 0$ с шагом = 0,1 часа до 24 часов определение значений оценок (10), (13) для всех перегонов и станций маршрута r_{ni+1} с учетом ограничений (15), (16) и накоплением множеств векторов (34), (35); 10) формирование множества векторов рангов (36) для начальных времен движения поездов маршрута r_{ni+1} путем прямых многокритериальных ранжирований векторов (34), (35); 11) определение начального времени TI_{ni+1} движения поездов маршрута r_{ni+1} путем прямого многокритериального ранжирования векторов (36); 12) перестановка поездов маршрута r_{ni+1} в расписании с начальным временем TI_{ni+1}; 13) исключение маршрута r_{ni+1} из списка маршрутов, не переставленных в расписании.

На рис. 9 и 10 представлены визуализированные результаты оптимизации начального расписания железнодорожной сети для самых загруженных перегона и станции.

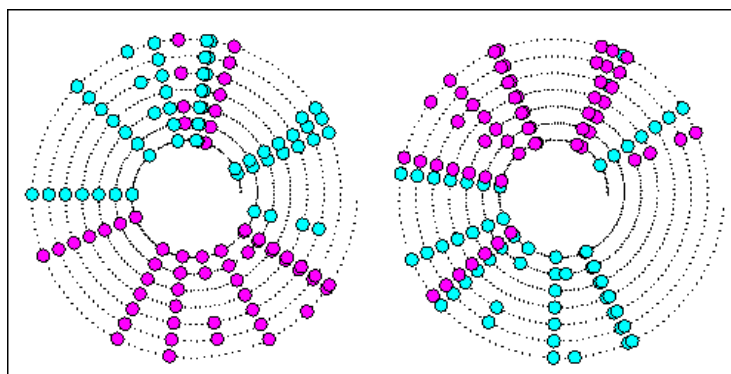


Рис. 9. Расписания въезда/выезда с перегона на граничные станции

Сопоставление рис. 8 и 10 показывает более чем двукратное улучшение средне-квадратичного отклонения событий станции. Сопоставление рис. 7 и 9 показывает менее оптимистичные результаты с точки зрения улучшения равномерности событий возле граничных станций. Это связано со спиральными представлениями расписаний перегонов возле граничных станций. Очевидно, сопоставление необходимо проводить по Traffic diagram [22] этого перегона. Ограничение объема статьи не позволило привести эти диаграммы.

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;
- разработана информационная система формирования пассажирского расписания для решения с ее помощью различных задач тактического и оперативного уровня планирования (рис. 1);
- представлены результаты формирования расписаний пассажирских поездов дальнего следования средствами информационной системы.

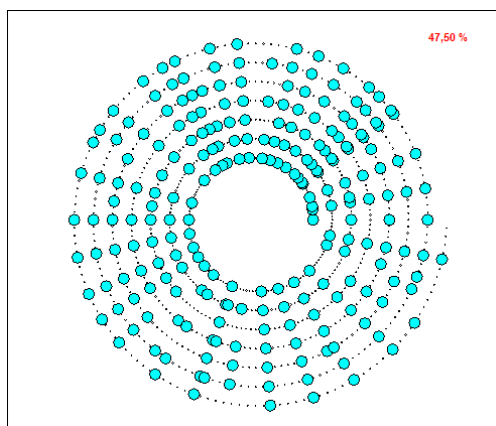


Рис. 10. Расписание въезда поездов на станцию

Литература

1. *Bussieck M. R., Winter T., Zimmermann U. T.* Discrete optimization in public rail transport // *Mathematical Programming*, 1997. Vol. 79. No. 1-3. P. 415–444.
2. *Guihaire V., Hao J.* Transit network design and scheduling: A global review // *Transportation Research A*, 2008. Vol. 42. P. 1251–1273.
3. *Cordeau J.-F., Toth P., Vigo D.* A survey of optimization models for train routing and scheduling // *Transportation Science*, 1998. Vol. 32. No. 4. P. 380–404.
4. *Huisman D., Kroon L. G., Lentink R. M., Vromans M. J. C. M.* Operations research in passenger railway transportation // *Statistica Neerlandica*, 2005. Vol. 59. No. 7. P. 467–497.
5. *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.
6. *Caprara A., Kroon L. G., Monaci M., Peeters M. et al.* Passenger railway optimization // *Handbooks in Operations Research and Management Science / C. Barnhart and G. Laporte (eds.)*. – Elsevier, 2007. Vol. 14. Chap. 3. P. 129–187.
7. *Schobel A.* Line planning in public transportation: models and methods // *OR Spectrum*, 2012. Vol. 34. P. 491–510.
8. *Peeters L.* Cyclic Railway Timetable Optimization: ERIM Ph. D. series Research in Management. – Erasmus Research Inst. of Management (ERIM), 2002.

9. *Caprara A., Fischetti M., Toth P.* Modeling and solving the train timetabling problem // *Operations Research*, 2002. Vol. 50. No. 5. P. 851–861.
10. *Brannlund U., Lindberg P. O., Nou A., Nilsson J. E.* Railway timetabling using lagrangian relaxation // *Transportation Science*, 1998. Vol. 32. No. 4. P. 358–369.
11. *Caprara A., Monaci M., Toth P., Guida P. L.* A lagrangian heuristic algorithm for a real-world train timetabling problem // *Discrete Applied Mathematics*, 2006. Vol. 154. No. 5. P. 738–753.
12. *Fischer F., Helmborg C., Jansen J., Krostitz B.* Towards solving very large scale train timetabling problems by lagrangian relaxation // *Proceedings of the 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization, and Systems.* – Dagstuhl, Germany, 2008.
13. *Cacchiani V., Caprara A., Fischetti M.* A lagrangian heuristic for robustness, with an application to train timetabling // *Transportation Science*, 2012. Vol. 46. No. 1. P. 124–133.
14. *Cacchiani V., Caprara A., Toth P.* A column generation approach to train timetabling on a corridor // *4OR*, 2008. Vol. 6. No. 2. P. 125–142.
15. *Cacchiani V., Caprara A., Toth P.* Non-cyclic train timetabling and comparability graphs, *Operations Research Letters*, 2010. Vol. 38. No. 3. P. 179–184.
16. *Cacchiani V., Caprara A., Toth P.* Scheduling extra freight trains on railway networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010. Vol. 44. No. 2. P. 215–231.
17. *Cacchiani V., Caprara A., Toth P.* Finding cliques of maximum weight on a generalization of permutation graphs, *Optimization Letters*, 2013. Vol. 7. No. 2. P. 289–296.
18. *Carey M., Lockwood D.* A model, algorithms and strategy for train pathing // *The Journal of the Operational Research Society*, 1995. Vol. 46. No. 8. P. 988–1005.
19. *Higgins A., Kozan E., Ferreira L.* Heuristic techniques for single line train scheduling, *Journal of Heuristics*, 1997. Vol. 3. No. 1. P. 43–62.
20. *Oliveira E., Smith B. M.* A job-shop scheduling model for the single-track railway scheduling problem: Technical Report. – University of Leeds, 2000.
21. *Burdett R., Kozan E.* A sequencing approach for creating new train timetables // *OR Spectrum*, 2010. Vol. 32. No. 1. P. 163–193.
22. *Erol B.* Models for the Train Timetabling Problem: Master Thesis. – Berlin: TU, 2009.
23. *Caprara A.* Almost 20 years of combinatorial optimization for railway planning: from lagrangian relaxation to column generation // *Proceedings of the 10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems.* – Dagstuhl, Germany, 2010. Vol. 14 of Open Access Series in Informatics (OASiCs). P. 1–12.
24. *Harrod S. S.* A tutorial on fundamental model structures for railway timetable optimization // *Surveys in Operations Research and Management Science*, 2012. Vol. 17. No. 2. P. 85–96.
25. *Serafini P., Ukovich W.* A mathematical for periodic scheduling problems // *SIAM J. Discret. Math.*, 1989. Vol. 2. No. 4. P. 550–581.
26. *Mohring R.* *Angewandte Netzwerkoptimierung* (lecture notes). – Berlin: Technische Universität, 2006. <http://www.math.tu-berlin.de/~moehring/adm3>.
27. *Nachtigall K., Voget S.* A genetic algorithm approach to periodic railway synchronization // *Computers & Operations Research*, 1996. Vol. 23. No. 5. P. 453–463.
28. *Nachtigall K.* Periodic network optimization with different arc frequencies, *Discrete Applied Mathematics*, 1996. Vol. 69. P. 1–17.
29. *Odijk M. A.* A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables // *Transportation Research. Part B: Methodological*, 1996. Vol. 30. No. 6. P. 455–464.
30. *Lindner T.* Train schedule optimization in public rail transport: Technical Report, Ph. Dissertation. – Berlin: Technische Universität, 2000.
31. *Kroon L. G., Peeters L. W. P.* A variable trip time model for cyclic railway timetabling // *Transportation Science*, 2003. Vol. 37. No. 2. P. 198–212.
32. *Liebchen C.* Symmetry for periodic railway timetables // *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2004. Vol. 92. No. 0. *Proceedings of {ATMOS} Workshop 2003*. P. 34–51.
33. *Liebchen C., Mohring R.* A Case Study in Periodic Timetabling // *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2002. Vol. 66. No. 6. P. 18–31.
34. *Lindner T., Zimmermann U.* Cost optimal periodic train scheduling // *Mathematical Methods of Operations Research*, 2005. Vol. 62. No. 2. P. 281–295.
35. *Shafiq M. A., Sadjadi S. J., Jamili A., Tavakkoli-Moghaddam R., Pourseyed-Aghae M.* The periodicity and robustness in a single-track train scheduling problem // *Appl. Soft Comput.*, 2012. Vol. 12. No. 1. P. 440–452.

36. *Liebchen C., Möhring R. H.* The modeling power of the periodic event scheduling problem: Railway timetables and beyond: Technical Report. Preprint 020/2004. – Mathematical Institute, 2004.
37. *Caimi G., Fuchsberger M., Laumanns M., Schupbach K.* Periodic railway timetabling with event flexibility // *Networks*, 2007. Vol. 57. No. 1. P. 3–18.
38. *Kroon L. G., Peeters L. W. P., Wagenaar J. C., Zuidwijk R. A.* Flexible connections in pesp models for cyclic passenger railway timetabling // *Transportation Science*, 2014. Vol. 48. No. 1. P. 136–154.
39. *Лазарев А. А., Гафаров Е. Р.* Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. – М.: Физический факультет МГУ, 2011. 222 с.
40. *Hansen I. A., Pachl J. (eds.)* Railway Timetabling & Operations. Analysis – Modelling – Optimisation – Simulation – Performance Evaluation. 2nd edition. – Eurailpress, 2014. 332 p.
41. *Зак Ю. А.* Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизация перевозок. – М.: ЛИБРОКОМ, 2012. 394 с.
42. *Клеванский Н. Н., Кравцов Е. Ф.* Математическое моделирование формирования начальных многопериодных расписаний // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – Саратов: СГТУ, 2009. С. 100–106.
43. *Клеванский Н. Н.* Основные концепции реализации задач формирования расписаний // *Образовательные ресурсы и технологии*, 2014. № 2 (5). С. 9–21.
44. *Клеванский Н. Н., Красников А. А., Антипов М. А.* Когнитивная визуализация в задачах расписаний // *Современные наукоемкие технологии*, 2016. № 3-2. С. 246–251.
45. *Прилуцкий М. Х., Власов В. С.* Построение оптимальных по быстродействию расписаний в канонических системах «конвейер-сеть» // *Информационные технологии*, 2011. № 3. С. 26–31.
46. *Поддиновский В. В.* Анализ задач многокритериального выбора методами теории важности критериев при помощи компьютерных систем поддержки принятия решений // *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2008. № 2. С. 64–68.
47. *Сафронов В. В., Ведерников Ю. В.* Характеристика метода «жесткого» ранжирования // *Информационные технологии*, 2007. № S11. С. 17–21.

Transport timetabling problem

Nicolay Nicolaevich Klevansky, professor, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov

Maksim Anatoleevich Antipov, postgraduate, Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov

In the article basic concepts for transport scheduling problem are presented. The transport scheduling procedure use of two-stage algorithm developed in database system. 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. 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. A numerical example of transport scheduling is given. The realizations are used on set of train scheduling tasks.

Key words: timetabling, demand, event, transport scheduling, greedy algorithm, ranking methods