

Приложение метода оптимального сетевого потока к задаче подбора локомотивов для грузовых поездов на Восточном полигоне

А. К. ТАКМАЗЬЯН^{1,2,*}, А. Б. ШАБУНИН²

¹Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия

*Контактный e-mail: takmazian@gmail.com

Моделируется подбор тяговых ресурсов (локомотивов — в данном случае) для провоза грузовых поездов. В качестве входных данных рассматриваются маршрут поезда, время готовности поезда к отправлению, средняя скорость и вес поезда. Имеется множество локомотивов, обладающих грузоподъемностью и областью разрешенного действия. Цель — оптимально подобрать ресурс для каждого участка маршрута поезда. Решение ищется методом потока ресурсов минимальной суммарной стоимости через специально сконструированную сеть. Сеть построена на основе взвешенного орграфа из ребер графика поездов на линейных участках и ребер альтернативы, в процессе прохода по которым осуществляется “смена деятельности” локомотива (например, отцепление от одного поезда и подцепка к другому). Полученное решение обладает свойством глобальной оптимальности по времени.

Ключевые слова: потоки минимальной стоимости в сетях, проталкивание предпотока, альтернативный граф, математическое моделирование, комбинаторная оптимизация, назначение тяговых ресурсов, грузовые железнодорожные перевозки, Восточный полигон.

Библиографическая ссылка: Такмазьян А.К., Шабунин А.Б. Приложение метода оптимального сетевого потока к задаче подбора локомотивов для грузовых поездов на Восточном полигоне // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23, № 6. С. 94–106. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.009.

Введение

Грузовые железнодорожные перевозки на территории России устроены в целом так, что грузопоток направлен от географического центра, где добывается основная часть полезных ископаемых, к периферии — на запад и на восток. В работе рассматривается восточная часть дорожной сети, имеющая название Восточный полигон. Это административная единица железной дороги, содержащая около 11 тыс. км пути, на которых расположены 35 локомотивных депо, обслуживающих около 3 тыс. тяговых единиц — локомотивов.

Решается следующая задача подбора тяговых ресурсов [1, 2]. Пусть на некоторой начальной станции в некоторый момент времени появляется (прибывает или формируется) грузовой состав. Заданы станция назначения состава и желаемый график его движения от начальной до конечной станции. Требуется подобрать локомотивы для обеспечения провоза состава на всем протяжении его маршрута. Задача формулируется следующим образом: в заданной области сети железной дороги (Восточный полигон) по известному графику движения поездов подобрать к ним тяговые единицы на всем их маршруте.

Задача дополняется большим числом технологических ограничений, следующих из особенностей обслуживания дороги. Например, в целях бесперебойного вывоза поездов вся дорога поделена на специальные участки обслуживания локомотивов. Это области, в пределах которых поезд может двигаться с одним локомотивом, а при пересечении ее границы должен тяговую единицу сменить, чтобы она, в свою очередь, присоединилась к другому поезду, следующему через ее участок.

Есть и другие ограничения, например весовые нормы для грузовых поездов по участкам. По сути — это грузоподъемность локомотивов в зависимости от их технических характеристик (серий) и профиля участка (на подъемах она меньше, чем на ровном участке, например). Кроме грузоподъемности есть ограничение средней скорости проследования поезда по участку. Очевидным ограничением являются и технологические циклы работы тяговых единиц. Например, локомотивам необходимо регулярно проводить техобслуживание и разной степени ремонты.

Критерием хорошего планирования является достижение заданных значений основных показателей производительности полигона, таких как средний по парку суточный пробег локомотива с поездом, средняя по полигону скорость движения поездов с учетом всех остановок на маршруте и т. д. [1, 2]. В разд. 1 настоящей работы приводятся точные выражения для ключевых показателей качества.

Обзор основных подходов к проблеме автоматической подвязки локомотивов можно найти в [1]. Для полноты приведем некоторые исследования, не вошедшие в этот источник. В [3, 4] дан алгоритм подвязки, состоящий из последовательных по времени шагов поиска оптимального паросочетания локомотив — задание, причем в [3] каждый шаг представляет собой решение задачи о назначениях методом аукционов [5]. В [6] построение локомотивных маршрутов на основе графика поездов реализовано генетическим алгоритмом. В [7] формализована задача о назначении локомотивов и локомотивных бригад на грузовые составы по известному расписанию и построена математическая модель нахождения точного решения методом программирования в ограничениях. В [8, 9] строится максимальное по включению покрытие графика поездов локомотивными маршрутами. Это позволяет дать верхнюю оценку количества локомотивов для обеспечения полной подвязки поездов. В [8] сформулировано необходимое условие для существования такого решения.

Рассмотрим эволюцию методов решения задачи поиска тяговых ресурсов алгоритмами потока на сети. В [10] задача подвязки представлена как задача составления оптимальных автобусных расписаний для нескольких депо. В [11] предложена модель многопродуктовой транспортной сети, поток на которой представляет собой оптимальную подвязку. В [12] этот поток ищется методом смешанного целочисленного программирования. В [13] для оптимизации вычислений задача сводится к декомпозиции строк, представляющих собой варианты путей локомотива на графе. В [14] решена задача формирования устойчивых *сплотов* — соединений нескольких локомотивов в одну тя-

говую единицу. Достигается существенное понижение размера задачи с использованием формализма *графа предшествования*. С той же целью в работе использован механизм множественной *генерации столбцов* — по одной для каждого набора переменных, соответствующих выделенной сплотке.

В указанных работах используется идея сети, представляющей собой альтернативный граф [15] возможностей для локомотивов. В [6, 8, 9, 14], как и в настоящей работе, основу сети составляют отрезки графиков поездов на плоскости время — расстояние (плоскости графика), соединенные между собой ребрами возможностей или альтернативы. Для оптимальной подвязки находим поток минимальной стоимости на построенной сети. Для этого используем быстрый алгоритм ($O(N_V^4)$, где N_V — число вершин) *проталкивания предпотока*, который описан в [16–19]. Обоснование оценки сложности алгоритма дается в разд. 2. Как показано в разд. 3, такой подход эффективен для решения задач подвязки локомотивов большой размерности и может быть использован в промышленных масштабах. Более того, в настоящий момент разработанное программное обеспечение проходит опытную эксплуатацию как система поддержки принятия решений для поездных диспетчеров на Восточном полигоне.

1. Постановка задачи

Решение ищется на связном графе дорожной сети $G = (S, E)$, узлами $\{S_i\}$, $i = 1, \dots, N$, которого являются (выделенные) станции, а ребрами $E_{ij} = \langle S_i; S_j \rangle$ — перегоны между ними. Для каждого перегона известны его длина $\text{dist}(E_{ij})$ и среднее время t_{ij} хода поезда по нему. Маршрут поезда представляется в виде пути $\mathcal{P}_T = \{S_1, \dots, S_n\} = \{E_{12}, \dots, E_{n-1,n}\} \subset G$, а расписание поезда — (неубывающим) отображением пути на ось времени:

$$\mathcal{D}_T = [\mathcal{P}_T \times t] = [S_1; t_1], \dots, [S_n; t_n], \quad t_i \nearrow.$$

Участки обслуживания \mathcal{R}_j представляются в виде связных подмножеств ребер, так что граф дорожной сети полностью покрывается объединением этих подмножеств $G = \cup\{\mathcal{R}_j\}$. При этом маршрут поезда может быть (в общем случае неоднозначно) представлен в виде объединения смежных по одной вершине путей p_j , каждый из которых

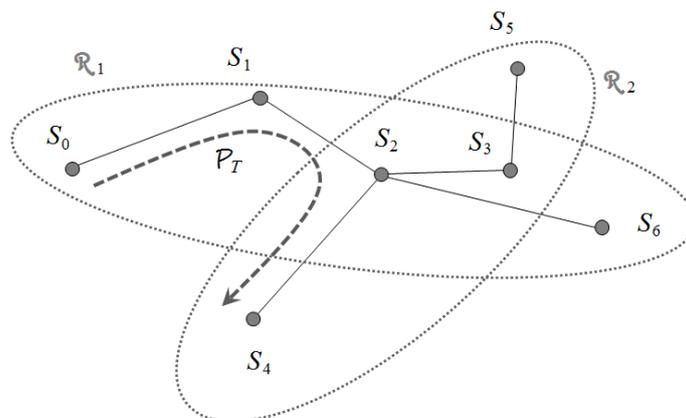


Рис. 1. Пример графа сети с участками обслуживания локомотивов (пунктир) и маршрутом поезда (штрих)

полностью принадлежит одному из участков обслуживания: $\mathcal{P}_T = \cup p_j$, $p_j \subset \mathcal{R}_j$. Например, на рис. 1 $\mathcal{P}_T = \{S_0, S_1, S_2, S_4\} = p_1 \cup p_2$, $p_1 = \{S_0, S_1, S_2\} \subset \mathcal{R}_1$, $p_2 = \{S_2, S_4\} \subset \mathcal{R}_2$.

Тяговые единицы (локомотивы L) представляются в виде точек на плоскости графика с координатами станция — время $L_i = [S_i; t_i^*]$ или векторов, если они находятся в движении на перегоне $L_i = [E_{ik_i}; t_i^*]$ в момент времени t_i^* . Искомое решение имеет вид отображения расписания поезда \mathcal{D}_T на множество локомотивов $\{L_i\}$:

$$\mathcal{D}_T \rightarrow \{L_i\} \equiv \{[[S_1; t_1]; L_{i_1}], \dots, [[S_n; t_n]; L_{i_n}]\}, \quad (1)$$

порождающее расписания локомотивов $\mathcal{D}_{L_i} \equiv \{[S_{i_1}; t_{i_1}], \dots, [S_{i_k}; t_{i_k}]\} : t_{i_k} \nearrow$. Для каждого такого расписания существенно ограничение: его маршрут $\mathcal{P}_{L_i} = s(\mathcal{D}_{L_i}) = \{S_{i_1}, \dots, S_{i_k}\}$ должен полностью лежать в пределах ассоциированного с ним множества участков обслуживания $\{\mathcal{R}_{i_k}\}$. Здесь $s(\mathcal{D})$ — одна из (двух) координатных функций, выделяющих первую (пространственную) или вторую (временную) компоненту расписания \mathcal{D} :

$$s(\mathcal{D}) = s([\mathcal{P} \times t]) = \{S_1, \dots, S_n\}, \quad t(\mathcal{D}) = t([\mathcal{P} \times t]) = \{t_1, \dots, t_n\}.$$

Главным требованием к решению является своевременный вывоз всех поездов, т. е. построение расписания локомотивов, обеспечивающего максимальный процент подвязки поездов на горизонте планирования. Горизонтом планирования называется временной промежуток $H = [0, t_{\max}]$, на котором ищется решение. Процентом подвязки называется (выраженное в процентах) отношение суммарной длины участков маршрутов, для которых найдены ресурсы на заданном горизонте планирования, к суммарной длине всех участков маршрутов на этом горизонте:

$$\Pi(H) = \frac{\sum_{T_k} \sum_{E_{ij} \in A(\mathcal{D}_{T_k}, H)} \delta_{T_k}(E_{ij}) \text{dist}(E_{ij})}{\sum_{T_k} \sum_{E_{ij} \in A(\mathcal{D}_{T_k}, H)} \text{dist}(E_{ij})}, \quad (2)$$

где $\delta_{T_k}(E_{ij})$ — индикаторная функция подвязки поезда (равная единице, если на перегоне E_{ij} поезду T_k найден локомотив, и нулю — если иначе); $A(\mathcal{D}, H) = \{E_{ij} \in s(\mathcal{D}) \mid t(\mathcal{D}_{E_{ij}}) \subset H\}$ — множество перегонов, которые попадают в расписание \mathcal{D} в течение горизонта H .

Основными критериями качества подвязки являются среднесуточный полезный пробег локомотива и среднесуточная производительность локомотива [2]. Средней по парку суточной производительностью локомотива называется количество грузокилометров, вывозимых в среднем одним локомотивом в сутки:

$$U_{\text{eff}} = \frac{\sum_{T_k} \sum_{E_{ij} \in A(\mathcal{D}_{T_k}, H)} W_{T_k} \delta_{T_k}(E_{ij}) \text{dist}(E_{ij})}{\text{card}(L_i)}, \quad (3)$$

где $\text{card}(L_i)$ — общее количество рабочих локомотивов в парке, W_{T_k} — вес поезда T_k . Полезным пробегом локомотива в сутки называется количество километров пути, пройденных в среднем по полигону локомотивом с поездом:

$$V_{\text{eff}} = \frac{\sum_{L_m} \sum_{E_{ij} \in A(\mathcal{D}_{L_m}, H)} \delta_{L_m}(E_{ij}) \text{dist}(E_{ij})}{\text{card}(L_i)}, \quad (4)$$

где $\delta_{L_m}(E_{ij})$ — индикаторная функция работы локомотива, равная единице, если на перегоне E_{ij} локомотив L_m двигался с поездом, и нулю — если иначе.

Требуется найти решение, реализующее с заданным приоритетом указанные цели:

$$\Pi(H) \rightarrow 100\%, \quad U_{\text{eff}} \rightarrow \max, \quad V_{\text{eff}} \rightarrow \max. \quad (5)$$

2. Поиск потока минимальной стоимости на альтернативной сети

Постановка данной задачи похожа на постановку задачи о назначениях. Однако есть два существенных отличия. Во-первых, искомый результат имеет вид соответствия один-ко-многим, т. е. один локомотив за время горизонта планирования может успеть поработать с несколькими поездами на своем участке обслуживания. Во-вторых, важно оптимально распределить ресурсы по всему временному горизонту, т. е. не допустить ситуации, когда максимум их используется на начальном интервале планирования, а на конце горизонта получается дефицит из-за “жадности” алгоритма. Итак, данная задача может быть сведена к поиску оптимального потока ресурсов на взвешенной сети, но, в отличие от задачи о назначениях, эта сеть не имеет двудольного вида. Ниже мы остановимся на построении ресурсной сети и особенностях метода, позволяющих удовлетворить сформулированным требованиям к решению.

Построим максимально простую модель на примере участка обслуживания локомотивов (УОЛ) \mathcal{R}_1 (рис. 1). Данный УОЛ не может быть представлен в виде простого пути на графе, так как содержит “вилку” $\langle S_2; S_3 \rangle$, $\langle S_2; S_6 \rangle$. Однако для дальнейших рассуждений нелинейность топологии не составляет проблемы: нигде не требуется планарности графика расписаний поездов. Тем не менее в целях наглядности сделаем все построения для линейного участка из последовательных станций S_0, \dots, S_3 .

Рассмотрим шесть поездов T_1, \dots, T_6 , график движения которых приведен на рис. 2. Первые три поезда движутся в сторону нарастания индексов станций, а другие три — в обратную. По горизонтальной оси нанесено время в условных единицах. График поездов составляет основу для “скелета” сети: базовыми ребрами являются отрезки расписания поездов, ресурсами — локомотивы. Проход ресурса по “поездному” ребру означает подвязку локомотива на данном отрезке расписания поезда.

Фрагмент готовой сети для данного примера показан на рис. 3. Ресурсы вводятся в сеть через специальные дополнительные вершины 1 графа, расположенные в точках, где ресурс впервые становится доступным для использования. Точки на плоскости графика соответствуют событиям с координатами станция — время. Для соблюдения формализма потоковой сети нужно достроить фиктивный источник 2 с фиктивными ребрами 3, по каждому из которых до начала поиска решения прошел свой ресурс, соответствующий ресурсной точке 1.

Сеть, по существу, представляет собой альтернативный граф [15] возможностей для единиц ресурса: например, из локомотивных вершин 1 достраиваются переход-

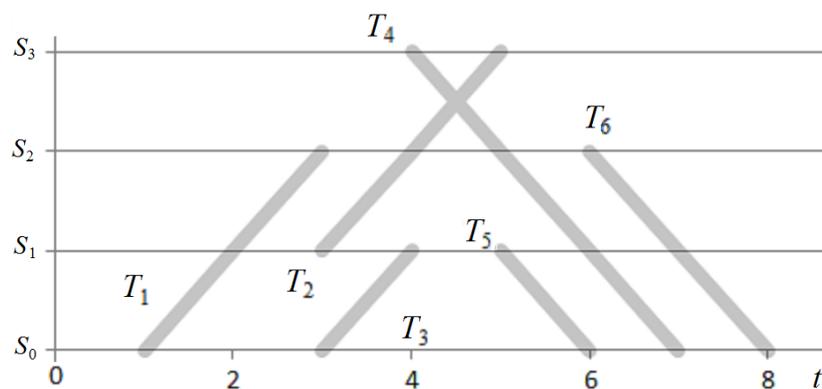


Рис. 2. Модельный пример шести поездных графиков

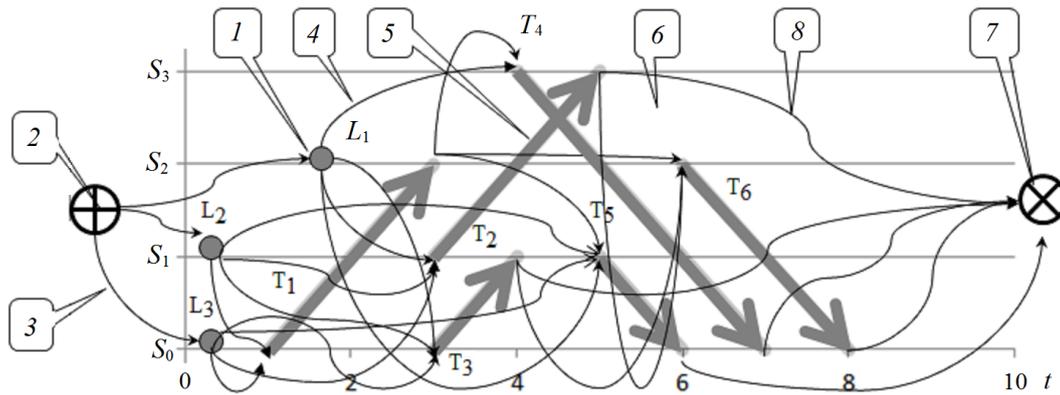


Рис. 3. Элементы ресурсной сети: 1 — ресурсная вершина, 2 — исток, 3 — стартовое ребро, 4 — ребро подцепки, 5 — ребро поезда, 6 — ребро перцепки, 7 — сток, 8 — терминальное ребро

ные ребра 4 к началу каждого поездного ребра 5. Таким же образом концы поездных ребер соединяются с началами других поездных ребер с помощью переходных ребер-перцепок 6.

Граф дополняется стоком 7, расположенным вне границ горизонта планирования. Если рассматривать граф как машину состояний для множества локомотивов (ресурсов), то окончание работы ресурса означает переход в невозвратное состояние покоя, которое и соответствует стоку. Сюда включаются случаи, когда ресурс может вообще не использоваться или проработать только часть времени, т. е. ребра 8 в сток строятся из всех конечных вершин поездных ребер 5 и из локомотивных вершин 1.

Цены ребер должны выбираться таким образом, чтобы искомое оптимальное решение представляло собой поток минимальной стоимости. Для создания “притягивающего эффекта” цены поездных ребер полагаются нулевыми, а штрафуются только переходные ребра. Очевидно, чем дольше нужно локомотиву ждать поезда или чем дальше нужно ехать без поезда, тем больше должен быть штраф. В результате численных экспериментов была выбрана евклидова метрика на масштабированной должным образом плоскости графика.

Указанным способом задача подвязки локомотивов (1)–(5) сводится к задаче поиска потока минимальной стоимости [17, 18]:

$$\sum_{\langle v_i; v_j \rangle \in \Gamma} a_{ij} f_{ij} \rightarrow \min, \tag{6}$$

$$0 \leq f_{ij} \leq c_{ij}, \tag{7}$$

$$\sum_{j | \langle v_j; v_i \rangle \in \Gamma} f_{ji} - \sum_{j | \langle v_i; v_j \rangle \in \Gamma} f_{ij} = s_i, \quad -s_0 = s_N = n, \quad s_i = 0, \quad i = \overline{1, N-1}, \tag{8}$$

где Γ — граф потоковой сети, v_i — его вершина, f_{ij} — поток ресурса через ребро $\langle v_i; v_j \rangle$, a_{ij} — цена пропуска единицы ресурса, c_{ij} — пропускная способность ребра, v_0 — источник, v_N — сток, n — исходное число единиц ресурса в источнике. Условие (8) имеет смысл нулевой емкости вершин: поток не накапливается в вершинах графа, кроме стока, и не зарождается нигде, кроме источника. Заметим, что (6)–(8) как задача линейного программирования имеет глобально оптимальное (или субоптимальное при использовании приближенных методов) решение.

Подход, основанный на построении обобщенной потоковой сети, принципиально отличается от попыток работ [3, 4] решить задачу методами последовательных шагов по времени, где на каждом шаге ищется решение задачи о назначениях. Это решение является мгновенно-оптимальным и не учитывает развитие ситуации во времени. В результате не исключено загибание в локальных экстремумах. Как показали наши эксперименты, для реальных задач именно так и происходит. С каждой следующей итерацией получается все более далекое от оптимального распределение ресурсов в целом. В методе оптимального сетевого потока нет дробления конфигурационного пространства на “временные” слои. Сеть построена на расписаниях поездов, и поток ищется сразу на всем пространстве графика. Как следствие, оптимальность потока означает глобальную во времени и в пространстве оптимальность назначений.

Один из самых эффективных алгоритмов поиска максимального потока — метод проталкивания предпотока Голдберга и Тарьяна [16]. Его сложность равна $O(N_V^2 N_E)$, где N_V — число вершин, N_E — число ребер сети. Данный метод применим для сети без весов ребер. Для взвешенной сети есть модификация [17] у тех же авторов, имеющая такую же сложность. Оценим алгоритмическую сложность в случае альтернативного графа подвязки локомотивов. Число поездных ребер пропорционально числу вершин: через любые две вершины проходит одно и только одно ребро. Число альтернативных (переходных) ребер пропорционально квадрату числа вершин, поскольку конец каждого прямого ребра соединяется с началами всех остальных прямых ребер, достижимых из него. Таким образом, имеем оценку $N_E \sim N_V^2$, и сложность алгоритма проталкивания в частном случае графа подвязки равна $O(N_V^4)$.

Следуя [17, 18], используем дуализм сопряженной задачи вкупе с методом ε -релаксации, предложенным в [18]. Как и в этой работе, метод применяется напрямую, без последовательных приближений по параметру точности ε , реализованных в [17]. Приведем описание метода согласно [19]. С каждой вершиной v_i ассоциируется сопряженная переменная p_i . В зависимости от источника ее трактовка бывает разной — “цена”, “потенциал” или “высота”. Для наглядности удобно считать ее “высотой” вершины. Она является множителем Лагранжа для ограничений (8) в условиях дополняющей нежесткости. Второй набор условий дополняющей нежесткости

$$\begin{aligned} f_{ij} < c_{ij} &\Rightarrow p_i - p_j \leq a_{ij}, \\ f_{ij} > 0 &\Rightarrow p_i - p_j \geq a_{ij} \end{aligned}$$

ослабляется на величину $\varepsilon > 0$:

$$f_{ij} < c_{ij} \Rightarrow p_i - p_j - \varepsilon \leq a_{ij}, \quad (9)$$

$$f_{ij} > 0 \Rightarrow p_i - p_j + \varepsilon \geq a_{ij}. \quad (10)$$

Распределение ресурсов на каждом шаге, кроме последнего, представляет собой предпоток, т.е. поток с нарушением условия емкости вершин (8). Такое нарушение называется переполнением вершины. Чтобы ликвидировать его, проводится выталкивание ресурса из вершины по инцидентным ребрам. Выталкивание повторяется до тех пор, пока условие (8) не будет выполнено. Этот процесс называется разгрузкой вершины. Разгрузка производится последовательно для всех переполненных вершин, пока весь ресурс не окажется в стоке. Тогда условия (8) будут выполнены для всех вершин сети и допустимое решение будет найдено.

Как показано в [17, 18], чтобы найденный поток был оптимальным, необходимо и достаточно производить проталкивание только при выполнении определенных условий на высоту вершин. Условие открытости ребра $\langle v_i; v_j \rangle$ в прямом направлении выводится из (9):

$$p_i - p_j = a_{ij} + \varepsilon. \quad (11)$$

Соответственно, условие открытости ребра в обратном направлении вытекает из (10):

$$p_i - p_j = a_{ij} - \varepsilon. \quad (12)$$

При следовании условиям (11) и (12) может оказаться, что вершина v_i переполнена, но ее разгрузка невозможна. Тогда необходимо “поднятие” вершины настолько, чтобы стало открытым хотя бы одно из инцидентных ребер. Причем для новой высоты вершины из всех возможных значений берется минимальное:

$$p_i = \min_{j, j^*: \langle v_{j^*}; v_i \rangle, \langle v_i; v_j \rangle \in \Gamma} \{p_{j^*} - a_{j^*i}, p_j + a_{ij}\} + \varepsilon.$$

3. Результаты

Разработано программное обеспечение на языке программирования Java, позволяющее в режиме реального времени на текущем потоке данных из внешних систем их обрабатывать и находить решение поставленной оптимизационной задачи. Варианты решения для тестового примера из шести поездов приведены на рис. 4 для разных начальных условий в зависимости от расположения и количества доступных локомотивов. Тонкими линиями показаны потоки локомотивов из локомотивных вершин в сток через ребра поездных маршрутов (толстые серые линии). Из приведенного решения видно, что двух локомотивов недостаточно — два поезда остаются без подвязки, — а трех — достаточно для полной подвязки всех шести поездов на всем протяжении их маршрутов. В случае четырех локомотивов по-прежнему вывозятся все поезда, но средняя эффективность работы локомотивов ниже: больше времени уходит на неэффективные простои.

Для отладки работы алгоритма смоделирован тестовый полигон на основе реального участка БАМ длиной 1500 км (от ст. Тайшет до ст. Таксимо). Дорожный граф тестового полигона содержал 36 ключевых станций в составе двух модельных участков обслуживания локомотивов. Объем движения на этом участке составлял примерно 8% от общего объема перевозок на Восточном полигоне. В расчетах участвовало 140 поездов и 85 локомотивов. Максимальный размер альтернативного графа (строящегося для каждого УОЛ) $N_V \approx 2 \cdot 10^2$ узлов и $N_E \approx 5 \cdot 10^3$ ребер. Напомним, что узлами этого графа служат события отправления и прибытия поездов, а ребрами — отрезки поездных расписаний и варианты переключения локомотивов между ними. Горизонт планирования в тестовом варианте — одни сутки. Цель моделирования — достигнуть 100% подвязки (показатель (2)).

На рис. 5 приведена визуализация промежуточного этапа разработки и тестирования, на котором цель еще не была достигнута. Это сделано для наглядности, чтобы можно было различить успешные и неуспешные варианты подвязки. Светлыми линиями показаны подвязанные графики поездов, темными — графики поездов, которым не найдены тяговые ресурсы. Штриховой линией выделен модельный горизонт планирования в одни железнодорожные сутки, который начинается и заканчивается в 18:00 по московскому времени.

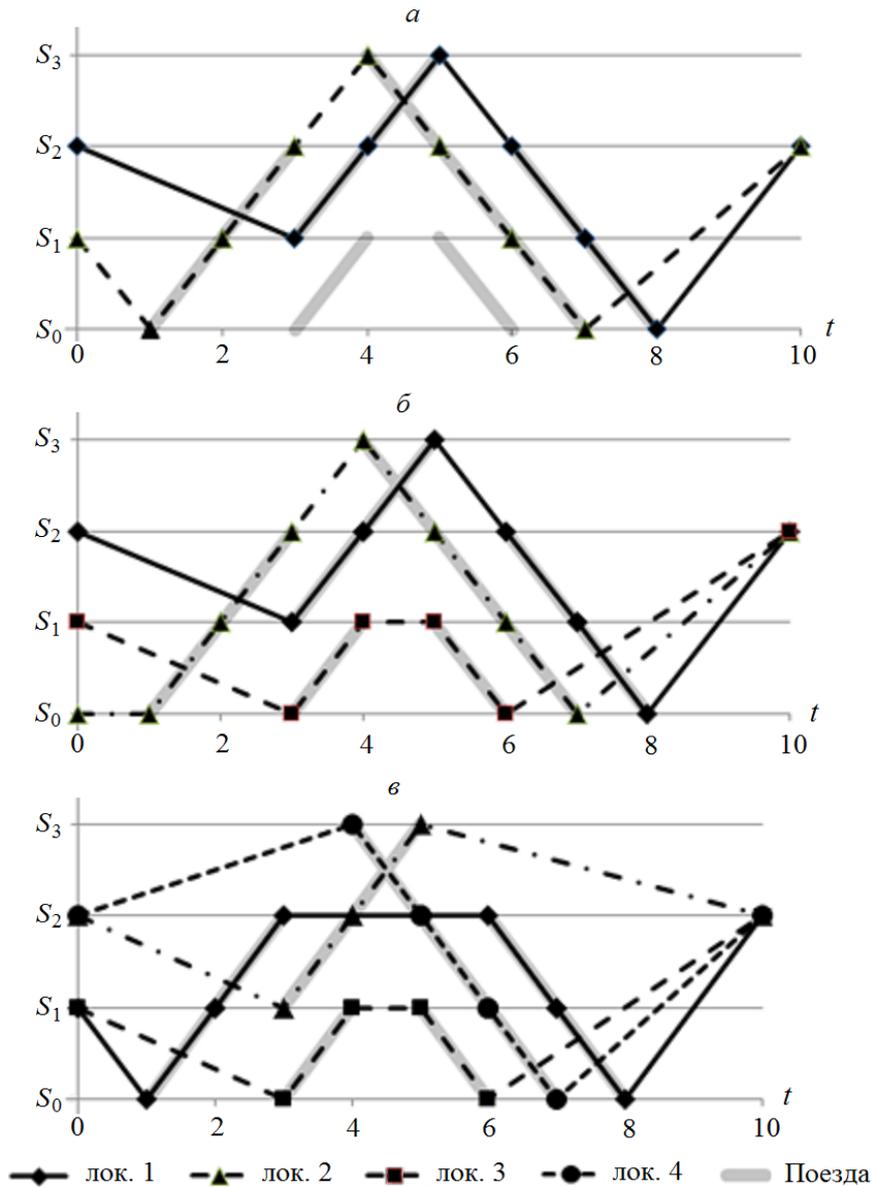


Рис. 4. Решение примера для шести поездов при различных начальных условиях — доступны: два локомотива (*a*), три локомотива (*б*), четыре локомотива (*в*)

Полная задача оперативного планирования подвязки локомотивов для всего Восточного полигона имеет большую размерность. Граф дороги Восточного полигона включает 354 ключевых станции. Величина поездопотока на горизонте двух суток составляет от 3 до 4 тыс. поездов. Грузовой локомотивный парк имеет приблизительно 1800 локомотивов. Соответственно, максимальный размер альтернативного графа (для самого крупного УОЛ) $N_V \approx 2 \cdot 10^3$, $N_E \approx 2 \cdot 10^5$. Очевидно, вычисления должны быть достаточно быстрыми, чтобы обеспечить своевременное принятие решений диспетчерами разного уровня управления. С помощью алгоритма оптимального сетевого потока авторам удалось решить эту задачу за адекватное время.

Показатели качества (2)–(4) по результатам расчета для всего Восточного полигона приведены в таблице. Вычисления производились на персональном компьютере с процессором Intel(R) Pentium(R) G2100 с тактовой частотой 2.80 ГГц под управле-

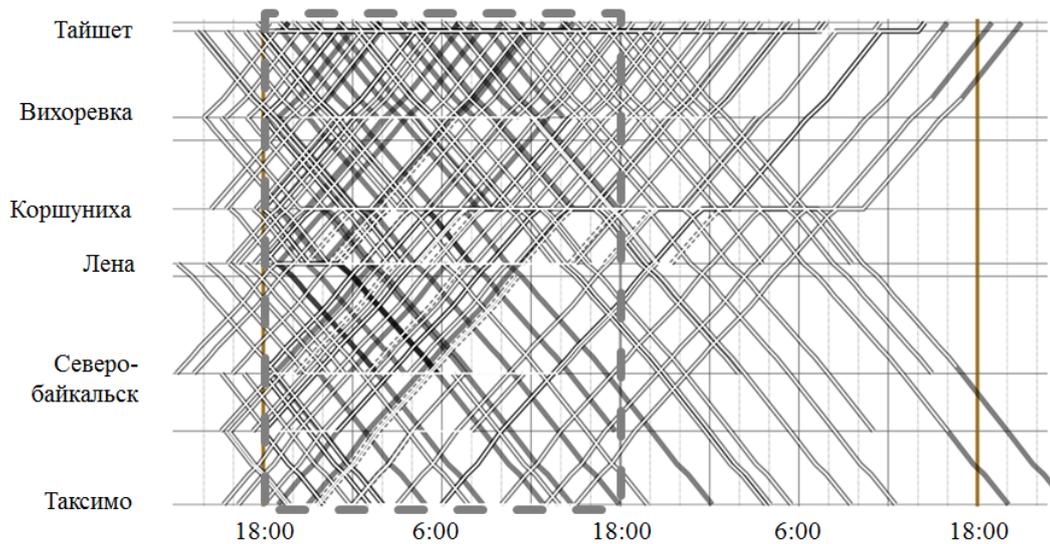


Рис. 5. Решение задачи подвязки локомотивов для тестового полигона Тайшет — Таксимо

Основные показатели (2)–(4) качества планирования на Восточном полигоне

Показатель	Значение	Целевое значение	Оценка достижения цели, %
П(6)	94 %	80–100 %	100
П(24)	94 %	80–100 %	100
U_{eff}	$2.5 \cdot 10^6$ т-км	$2.3 \cdot 10^6$ т-км	100
V_{eff}	$7.5 \cdot 10^2$ км	$8.0 \cdot 10^2$ км	95
Время расчета	≈ 5 мин	≤ 10 мин	Цель достигнута

нием операционной системы WindowsTM 8. Первые две строки таблицы соответствуют проценту подвязки (2) локомотивов к поездам на горизонте 6 и 24 ч. Их сравнение служит дополнительным признаком стабильности подвязки на всем горизонте. Показатель (4) полезного суточного пробега V_{eff} немного ниже своего целевого значения, что технологически допустимо на полигоне и, кроме того, объясняется на данный момент недостаточным качеством входных данных, что в ближайшем будущем ожидает исправления разработчиками внешних систем.

Таким образом, задача планирования тяговых ресурсов решена на реальном потоке данных в промышленном масштабе — на Восточном полигоне сети РЖД, причем со скоростью, приемлемой для промышленных систем поддержки принятия решений. Решение обеспечивает достижение ключевых показателей эффективности.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 17-20-01180 и № 17-20-01160) в рамках единой Интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ) в НИИАС РЖД, Москва.

Авторы выражают искреннюю благодарность научным руководителям работы: акад. Н.А. Кузнецову и д.т.н. В.Г. Матюхину за поддержку и внимание к работе, Б. Смилге, Д. Ежову, А. Типцовой за участие в разработке программного обеспечения, П.Е. Войтенко, А. Типцовой и Е. Свихнушиной за построение технологических моделей задачи, тестирование и анализ результатов.

Список литературы / References

- [1] **Piu, F., Speranza, M.G.** The locomotive assignment problem: a survey on optimization models // Intern. Transactions in Operational Res. 2014. Vol. 24, No. 3. P. 327–352.
- [2] **Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Немцов Э.Ф.** Информационная поддержка оперативного управления тяговыми ресурсами на Восточном полигоне // Локомотив. 2017. № 1(721). С. 8–9.
Matyukhin, V.G., Shabunin, A.B., Nemtsov, E.F. Traction resources management at Eastern operating domain of Russia // Locomotiv. 2017. No. 1(721). P. 8–9. (In Russ.)
- [3] **Kuznetsov, N.A., Minashina, I.K., Paschenko, F.F. et al.** Optimization Algorithms in Scheduling Problems of the Rail Transport // J. of Commun. Technology and Electronics. 2015. Vol 60, No. 6. P. 637–646.
- [4] **Азанов В.М., Буянов М.В., Гайнанов Д.Н., Иванов С.В.** Алгоритмическое и программное обеспечение для назначения локомотивов с целью перевозки грузовых составов // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование. 2016. Т. 9, № 4. С. 73–85.
Azanov, V.M., Buyanov, M.V., Gaynanov, D.N., Ivanov, S.V. Algorithm and software development to allocate locomotives for transportation of freight trains // Bull. of the South Ural State Univ. Ser. Math. Modelling, Programming & Computer Software. 2016. Т. 9, No. 4. С. 73–85. (In Russ.)
- [5] **Bertsekas, D.P.** The auction algorithm: a distributed relaxation method for the assignment problem // Annals of Operations Res. 1988. Vol. 14. P. 105–123.
- [6] **Noori, S., Ghannadpour, S.F.** Locomotive assignment problem with train precedence using genetic algorithm // J. of Industrial Eng. Intern. 2012. Vol. 8(9). <https://doi.org/10.1186/2251-712X-8-9>
- [7] **Архипов Д.И., Лазарев А.А., Мусатова Е.Г.** Использование метода программирования в ограничениях для решения задачи о назначении локомотивов и локомотивных бригад на грузовые перевозки // Тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. “Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте” (ИСУЖТ-2017). М., 2017. С. 56–59.
Arkhipov, D.I., Lazarev, A.A., Musatova, E.G. Constraint programming approach applied to locotive and locomotive crew assignment problem for freight transportation // Proc. of the 6th Intern. Sci. and Technology Conf. “Intelligence Control Systems for Railroad Transportation”. Moscow, 2017. P. 56–59. (In Russ.)
- [8] **Жилякова Л.Ю., Кузнецов Н.А., Матюхин В.Г. и др.** Графовая модель распределения локомотивов для грузовых перевозок на линейном участке железной дороги. Задача о максимальном по включению покрытии графика // Проблемы управления. 2018. № 3. С. 65–75.
Zhilyakova, L.Yu., Kuznetsov, N.A., Matyukhin, V.G. et al. Locomotive assignment graph model for freight traffic on linear section of railway. The problem of finding a maximal independent schedule coverage // Control Sciences. 2018. No 3. P. 65–75 (In Russ.)
- [9] **Гайнанов Д.Н., Кибзун А.И., Рассказова В.А.** Теоретико-графовый алгоритм решения задачи о назначении и перемещении локомотивов // Вестн. компьютер. и информ. технологий. 2017. № 5. С. 51–56.
Gainanov, D.N., Kibzun, A.I., Rasskazova, V.A. Theoretical-graph algorithm in the problem on the assignments and transportations of locomotives // Comput. and Inform. Technology Bullet. 2017. No. 5. P. 51–56. (In Russ.) DOI:10.14489/vkit.2017.05.pp.051-056.

- [10] **Forbes, M.A., Holt, J.N., Watts, A.M.** Exact solution of locomotive scheduling problems // J. of the Operational Res. Soc. 1991. Vol. 42, No. 10. P. 825–831.
- [11] **Noble, D.H., Al-Amin, M., Mills, R.G.J.** Production of locomotive rosters for a multi-class multi-locomotive problem // J. of the Operational Res. Soc. 2001. Vol. 52, No 11. P. 1191–1200. <http://www.jstor.org/stable/822929>
- [12] **Ahuja, R.K., Liu, J., Orlin, J.B. et al.** Solving real-life locomotive-scheduling problems // Transportation Sci. 2005. Vol. 36, No. 4. P. 503–517.
- [13] **Vaidyanathan, B., Ahuja, R.K., Orlin, J.B.** The locomotive routing problem // Transportation Sci. 2008. Vol. 42. P. 492–507.
- [14] **Jaumard, B., Tian, H.** Multi-column generation model for the locomotive assignment problem // Proc. of 16th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS'16). Aarhus, Denmark. Open-Access Ser. in Inform., 2016. P. 6:1–6:13. Available at: <http://www.dagstuhl.de/dagpub/978-3-95977-021-72016>
- [15] **Pacciarelli, D.** Alternative graph formulation for solving complex factory-scheduling problems // Intern. J. of Product. Res. 2002. No. 40. P. 3641–3653. DOI: 10.1080/00207540210136478.
- [16] **Goldberg, A.V., Tarjan, R.E.** A new approach to the maximum flow problem // Proc. of the 18th Annual ACM Symp. on Theory of Comput. New York, USA: ACM, 1986. P. 136–146.
- [17] **Goldberg, A.V., Tarjan, R.E.** Solving minimum cost flow problems by successive approximation // Proc. of the 19th Annual ACM Symp. on Theory of Computing. New York, USA: ACM, 1987. P. 7–18. DOI: 10.1145/28395.28397.
- [18] **Bertsekas, D.P.** Distributed asynchronous relaxation methods for linear network flow problems: Lab. for Inform. and Decision Syst. Report LIDS-P-1606. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Inst. of Technol., 1986. 26 p.
- [19] **Bertsekas, D.P., Castanon, D.A.** The auction algorithm for the minimum cost network flow problem: Lab. for Inform. and Decision Syst. Report LIDS-P-1925. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Inst. of Technol., 1989. 32 p.

Поступила в редакцию 28 августа 2018 г.

Application of the optimal network flow method to the problem of locomotive selection for freight trains on the Eastern Polygon

TAKMAZIAN, ANDREY K.^{1,2,*}, SHABUNIN, ALEXANDER B.²

¹Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russia

²Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunications on Railway Transport (SC NIIAS), Moscow, 107996, Russia

*Corresponding author: Takmazian, Andrey K., e-mail: takmazian@gmail.com

The selection of traction resources (locomotives) for the transport of freight trains is modelled. The input data are the train route, the readiness time of the train for departure, the average speed and weight of the train. In addition, there are many locomotives with a carrying capacity and an area of permitted action. The research objective is to optimally select a resource for each segment of the train route.

The solution is sought by the resource flow method of the minimum total cost through a specially designed network.

The network includes edges created from train schedule segments whose filling means locomotive assignment to train at the segment, and special alternative edges, passing through which a locomotive alternates its assignment. The algorithm for finding the optimal solution is the method of pushing through the pre-flow proposed by A. Goldberg and R. Tarjan. This is one of the fastest algorithms converging to a global optimum. Two test cases were investigated: a trivial one, out of six trains and three locomotives, and a more complicated one, which is a model example the size of 10% of the full scale model and consists of 150 trains. Full scale calculations provide planning of the freight transportation on the Eastern Operational domain of the Russian Railways. The model includes 1800 locomotives and about 3000 trains on the time horizon of 48 hours. Solution is found in less than 5 minutes of processor time for a PC powered by Intel(R) Pentium(R) G2010 2.80 GHz processor.

Keywords: freight trains, locomotive-to-train assignment, scheduling problem, alternative graph, minimum cost flow, real-time calculations.

Cite: Takmazian, A.K., Shabunin, A.B. Application of the optimal network flow method to the problem of locomotive selection for freight trains on the Eastern Polygon // Computational Technologies. 2018. Vol. 23, No. 6. P. 94–106. (In Russ.)
DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.009.

Acknowledgements. This research was partly supported by RFBR (grants No. 17-20-01180 and No. 17-20-01160).

Received 28 August 2018