

УДК 656.222.3

А. А. ЕРОФЕЕВ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, ХЭ ХУН, магистр технических наук, Железнодорожный политехнический институт Гуанчжоу, Китай

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СХЕМ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВОВ И ОСТАНОВОК ПОЕЗДОВ НА ПРИГОРОДНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЯХ

Изучен мировой опыт оптимизации схем формирования составов и остановок поездов на пригородных железнодорожных линиях. Предложен новый метод комплексной оптимизации, который дополнительно учитывает ограничения по коэффициенту использования вместимости подвижного состава. Выполнена постановка задачи оптимизации расписания движения пригородных поездов с учётом схем формирования составов и режимов остановок. Формализовано описание фазовых, решающих переменных и константных величин модели. Предложена модель оптимизации расписания движения поездов, сформулирована целевая функция модели. Описаны конструктивные ограничения модели, которые включают число вагонов в составе поезда, коэффициент загрузки, частоту обслуживания направлений, ограничения по остановкам. Для поиска оптимального решения задачи предложено использовать генетический алгоритм.

Неравномерное пространственно-временное распределение пассажиропотока на начальном этапе эксплуатации пригородных железнодорожных линий и использование единых схем формирования составов зачастую приводят к потере пропускной способности и нерациональным эксплуатационным затратам. В связи с этим актуальной задачей исследования является разработка вариантов организации движения поездов с различными схемами формирования поездов (различной вместимости) и различными режимами остановок в пути следования. Целью является минимизация суммарных эксплуатационных затрат, а переменными выступают размеры движения поездов, вместимость составов и режимы остановок.

В связи со сложностью и многовариантностью решаемой задачи для получения суточного расписания движения поездов с разной конфигурацией составов предлагается построить математическую модель, в основе которой лежит генетический алгоритм.

История изучения и решения проблемы оптимизации расписания движения пригородных и городских пассажирских поездов в Китае

В настоящее время уровень заполняемости поездов на пригородных и городских железных линиях в Китае, особенно в начальные периоды эксплуатации, является относительно низким: в часы пик заполняемость достигает 70 %, а отдельных поездов в непиковое время – менее 20 %, что приводит к убыткам железнодорожных компаний [1, 2]. Причины этого заключаются, с одной стороны, в том, что большинство пригородных железнодорожных линий в Китае все еще находится на стадии формирования пассажиропотока, и этот процесс длительный, пассажиропоток растет медленно; с другой стороны, из-за однородного расписания движения поездов, неизменной композиции составов, а также из-за значительных интервалов между поездами, режим эксплуатации не соответствует существующему пассажиропотоку [3, 4].

Поскольку участки железных дорог фиксированы, а скорость поездов относительно одинакова, исследования по оптимизации расписания движения пригородных и городских поездов в основном сосредоточены на выборе рациональных интервалов отправления, композиции составов поездов (вместимости) и схемах

остановок на промежуточных станциях, а в качестве целевой функции выступает минимизация эксплуатационных расходов компании [5, 6].

Для нахождения наилучшего компромиссного варианта плана обслуживания поездов Yu Hern Chang и др. [7] предложили метод нечеткого математического программирования. В качестве исходных данных при этом использовались данные о пассажиропотоке, а в качестве целевой функции – минимизация эксплуатационных расходов компании и минимизация времени поездки пассажиров. В рамках модели ученые оптимизировали схемы остановок поездов, частоту движения и количество отправляемых поездов.

В исследовании [8], учитывая стоимость времени ожидания пассажиров, стоимость времени в пути, показана модель оптимизации частоты отправления поездов с целью минимизации расходов на поездку пассажиров и эксплуатационных расходов компании.

Claessens M. T. и др. [9] предложили модель оптимизации с учетом эксплуатационных расходов компании, оптимизировали частоту движения поездов и количество вагонов, применив модель к подсети железной дороги Нидерландов, что позволило существенно снизить эксплуатационные расходы. Учитывая маршруты поездов, типы поездов, схемы остановок и ограничения пассажиропотока, в [10] построена модель оптимизации схемы движения поездов городских железнодорожных линий с целью минимизации количества используемых поездов. В исследовании [11] проанализирован процесс определения схемы движения поездов и предложен метод оптимизации схемы движения за счет объединения потоков поездов. Wang Zhengbin и др. [12] создали модель оптимизации схемы движения городских поездов и разработали гибридный генетический алгоритм для решения задачи, которые рассчитывают суммарное время ожидания пассажиров и время стоянки на станциях в зависимости от частоты обслуживания, спроса (пассажиропотока) и схем остановок.

Таким образом, в вышеуказанной литературе рассматривалась оптимизация схем движения и композиций составов поездов, однако исследования в основном использовали минимизацию общей стоимости в качестве целевой функции модели, не включая опти-

мизацию коэффициента использования вместимости поездов.

На основе указанного анализа предлагается рассмотреть задачу с точки зрения операционных расходов на организацию движения поездов, с учётом пространственно-временных характеристик пассажиропотока на линии, учитывать влияния изменяющегося во времени пассажиропотока, верхнего и нижнего пределов числа рейсов, частоты обслуживания, коэффициента заполненности поездов и других ограничений. Предлагается сформулировать модель комплексной оптимизации схем формирования составов и схем остановок поездов с целью снижения эксплуатационных расходов и увеличения коэффициента заполненности поездов при условии полного удовлетворения существующего на линии пассажиропотока.

Постановка задачи оптимизации расписания движения пригородных поездов с учётом схем формирования составов и режима остановок

Расстояние передвижения пассажиров на пригородных и городских железнодорожных линиях в Китае обычно составляет от 30 до 100 км, а пассажиропоток характеризуется высокой периодичностью, проявляющейся в виде распределения по неделям и дням. Ежедневные пиковые часы приходятся на время с 7:00 до 9:00 утра и с 17:00 до 19:00 вечером. Час пик в течение недели – с пятницы по понедельник, особенно вечером в пятницу и утром в понедельник. Пиковые часы в субботу и воскресенье в основном связаны с поездками и посещением родственников. Таким образом, характеристики пассажиропотока пригородных железных дорог сочетают черты как традиционных железных дорог, так и городского транспорта. На начальном этапе эксплуатации таких линий, когда пассажиропоток находится в стадии формирования и остаётся низким, применение традиционной схемы движения поездов с единым составом и едиными остановками не соответствует реальному пассажиропотоку, что приводит к низкой заполненности вагонов и неэффективному использованию перевозочного потенциала. На основе этого в качестве объекта исследования выбран режим движения поездов в одном направлении на начальном этапе эксплуатации пригородной железнодорожной линии. С целью минимизации эксплуатационных затрат поездов оптимизация режима движения осуществляется по двум направлениям – составу поездов и схеме остановок (рисунок 1).



Рисунок 1 – Оптимизация графика движения пригородной железнодорожной линии

Параметры модели задаются следующим образом.

1 Фазовые переменные. Обозначим множество станций $U = \{u|1, 2, \dots, U\} = W + B$, где $W = \{w|1, 2, \dots,$

$W\}$ – множество станций, входящих в сокращенный маршрут, а $B = \{b|1, 2, \dots, B\}$ – множество станций, оставшихся после исключения станций, входящих в сокращенный маршрут. Обозначим множество типов составов поезда $K = \{k|1, 2, \dots, K\}$ и множество поездов $R = \{r|1, 2, \dots, R\}$, где r – номер каждого поезда в расписании, а R – общее число поездов.

2 Решающие переменные. f_k – количество поездов, использующих состав типа k ; $\alpha_{k,u}^r$ – показатель, отображающий, останавливается ли поезд r с типом формирования k на станции u (переменная типа 0–1).

3 Константные величины. g_k – количество вагонов для состава типа k ; C_l – стоимость эксплуатации каждого транспортного средства на километр, юаней; C_s – стоимость остановки каждого транспортного средства за каждую остановку, юаней; L – общая протяжённость пригородной железнодорожной линии, км; L_1 – длина сокращенного маршрута, км; L_2 – общий пробег за вычетом пробега по сокращенному маршруту, км; C – вместимость транспортного средства, чел.

При построении модели решения исследуемой задачи предполагаются следующее допущения:

1 Исследуемая пригородная железнодорожная линия представляет собой прямолинейную трассу с парным движением поездов; оптимизация осуществляется только в одном направлении при высоком пассажиропотоке, при этом не учитывается вопрос о последовательном соединении поездов.

2 Учитывается только пассажиропоток на данной линии, пассажиропоток между линиями не учитывается.

3 Пассажиры выбирают только поезд, останавливающийся в обоих пунктах их поездки, и не совершают пересадки.

4 Известен режим прибытия пассажиров, при котором применяется принцип приоритетного обслуживания первых прибывших.

5 Поезд не переходит на другие пути.

6 Организационная модель эксплуатации предусматривает работу по полному и сокращенному маршрутам.

Модель оптимизации расписания движения поездов

Предлагается оптимизационная модель расписания движения поездов различной композиции, которая учитывает характеристики пассажиропотока на начальном этапе эксплуатации пригородной линии. В качестве целевой функции выступает минимизация эксплуатационных затрат с учётом таких ограничений, как количество отправляемых поездов, коэффициент заполнения вагонов, частота обслуживания пунктов назначения (режим остановок) и количество остановок.

Эксплуатационные расходы включают затраты на движение и остановки. К расходам на движение относятся энергопотребление поезда, включая электроэнергию, а также расходы на эксплуатацию железнодорожных путей. Эти расходы зависят от пробега поезда и стоимости его эксплуатации на километр. Стоимость остановки поезда – это расходы, возникающие при остановке поезда на станции, которые зависят от количества остановок и стоимости каждой из них [13].

Целевая функция имеет вид:

$$\min Z = \sum_{r=1}^{f_1} g_1(L_1 + \varepsilon_r L_2)C_l + \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{r=f_k}^{f_k+f_{k+1}} g_{k+1} \times$$

$$\times (L_1 + \varepsilon_r L_2)C_l + \sum_{r=1}^{f_1} \left[g_1 \left(\sum_{u=1}^W a_{1,u}^r + \varepsilon_r \sum_{u=W+1}^U a_{1,u}^r \right) C_s \right] +$$

$$+ \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{r=f_k}^{f_k+f_{k+1}} \left[g_{k+1} \left(\sum_{u=1}^W a_{k,u}^r + \varepsilon_r \sum_{u=W+1}^U a_{k,u}^r \right) C_s \right], \quad (1)$$

где ε_r – переменные 0 и 1, обозначающие маршрут движения поезда,

$$\varepsilon_r = \begin{cases} 1, & \text{поезд } r \text{ следует по полному маршруту} \\ 0, & \text{поезд } r \text{ следует по сокращенному маршруту} \end{cases};$$

$a_{k,u}^r$ – переменные 0 и 1, указывающие на остановку поезда,

$$a_{k,u}^r = \begin{cases} 1, & \text{поезд } r \text{ составом типа } k \\ & \text{останавливается на станции} \\ 0, & \text{поезд } r \text{ составом типа } k \text{ проследует станцию } u \\ & \text{без остановки} \end{cases}$$

Конструктивные ограничения модели включают число вагонов в составе поезда, коэффициент загрузки поезда, частоту обслуживания направлений, ограничения по остановкам.

1 *Ограничение количества отправлений по числу вагонов.* С учётом операционных затрат и учётом необходимости отправления поездов в различной составности в пиковые часы, для любого временного интервала устанавливаются верхние и нижние пределы количества отправлений:

$$\sum_{k=1}^k f_k \leq f_{\max}; \quad (2)$$

$$f_k \geq f_{\min}, \quad (3)$$

где f_{\max} – максимальное количество поездов, находящихся в этот период эксплуатации; f_{\min} – минимальное количество поездов различных типов, находящихся в эксплуатации.

2 *Ограничение коэффициента загрузки.* На основе спроса на пассажиропоток рассчитывается пассажиропоток в поперечном сечении (на каждом перегоне отдельно), а затем – коэффициент загрузки в этом сечении. С учётом нормативной вместимости поездов необходимо установить верхний и нижний пределы коэффициента загрузки:

$$\eta_d = \frac{\sum_{i=1}^d \sum_{j=d+1}^U q_{i,j}}{\sum_{k=1}^K f_k g_k c} \leq \eta_{\max}; \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{d=1}^U \eta_d}{N-1} \geq \eta_{\min}, \quad (5)$$

где η_d – предел для коэффициента d полной нагрузки сечения интервала, %; C – количество пассажиров в транспортном средстве, чел; $q_{i,j}$ – поток i пассажиров j между станциями, чел.

3 *Ограничение частоты остановок.* С учётом возможных изменений в схеме остановок, которые могут повлиять на время ожидания пассажиров на различных станциях, для удовлетворения потребностей пассажиров в передвижении установлено ограничение частоты остановок: количество остановок поездов на соответствующей станции не должно быть меньше минимального значения

$$\sum_{r=1}^{f_1} a_{1,i}^r a_{1,j}^r + \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{r=f_k}^{f_k+f_{k+1}} a_{k,i}^r a_{k,j}^r \geq \frac{q_{i,j}}{\min(q^i, q^j)}, \quad (6)$$

где q^i – поток пассажиров на станции i , чел; q^j – поток пассажиров на станции j , чел;

4 *Ограничение по остановкам на полном и сокращенном маршрутах.* Маршрут движения поезда делится на две части – полный и сокращённый, а режим остановки на станциях – на три: остановка на крупной зонной станции, остановка на каждой станции и остановка по выбору. В зависимости от маршрута и требований к остановкам на станциях конкретные ограничения остановок поезда определяются следующим образом: для поездов на сокращенных маршрутах допускаются три варианта – остановка на каждой станции, остановка на первой и последней станции зоны обслуживания, а также выбор одной станции посреди маршрута; для поездов на полном маршруте – три варианта: остановка на каждой станции, на зонных станциях, на двух станциях на маршруте следования. Данные параметры могут изменяться в процессе моделирования. Конкретные ограничения остановок поезда приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы остановок поездов

Номер станции		1	2	3	...	W	W+1	...	U	
Сокращенный маршрут	Пересадка на начальной и конечной станциях	1	0	0	0	1	0	0	0	
	Остановка на одной из станций	1	1 (обозначает, что поезд останавливается только на одной из станций, расположенных между станцией 2 и станцией W-1)				1	0	0	0
	Остановка на каждой станции	1	1	1	1	1	0	0	0	
Полный маршрут	Остановка на зонной станции	1	0	0	0	1	0	0	1	
	Остановка на двух станциях	1	1 (обозначает, что поезд останавливается только на одной из станций, расположенных между станцией 2 и станцией W-1)				1	1 (обозначает, что поезд останавливается только на одной из станций – от W-1 до U-1)		
	Остановка на каждой станции	1	1	1	1	1	1	1	1	

Примечание – 0 – поезд не останавливается на этой станции; 1 – поезд останавливается на этой станции.

5 Ограничение значений g_{jk} целых переменных: все значения должны быть положительными целыми числами.

Для поиска оптимального решения задачи может применяться генетический алгоритм. Благодаря широкому охвату и высокой степени проникновения в пространство возможных решений, он обладает хорошей глобальной сходимостью и способен быстро находить удовлетворительные решения.

В дальнейших исследованиях предполагается построение модели комплексной оптимизации схем формирования составов и остановок поездов для пригородных железнодорожных линий Китая.

Список литературы

- 1 Цзян Минмэй. Исследование оптимизации схем остановки поездов междугородних железных дорог / Цзян Минмэй. – Пекин : Пекинский транспортный университет, 2015.
- 2 Сун Жэньцзе. Исследование пригородных поездов междугородних железных дорог на основе характеристик пассажирских поездов между Пекином и Тяньцзинем / Сун Жэньцзе, Лу Юань // Умный город. – 2017. – № 6. – С. 63–64.
- 3 Янг Сяоянь. Анализ характеристик пассажирских поездов на поездках между Чэнду, Мянъян и Лешань / Янг Сяоянь. – Пекин : Пекинский транспортный университет, 2011.
- 4 Тянь Юлу. Оптимизация схем запуска стандартных поездов на междугородней железной дороге Чанжу Тан / Тянь Юлу // Умный город. – 2020. – № 20. – С. 11–13.
- 5 Хуан Чжипэн. Схемы запуска междугородних поездов на основе удовлетворенности временем поездки / Хуан Чжипэн // Журнал Ланьчжоуского транспортного университета. – 2018. – № 37 (01).
- 6 Хуан Чжипэн. Исследование схем запуска междугородних поездов на основе выбора поведения пассажиров / Хуан Чжипэн // Журнал Уханьского политехнического университета (Транспортная наука и инженерия). – 2015. – № 6.
- 7 Chang, Y. H. Многокритериальная модель планирования обслуживания пассажирских поездов: применение к высокоскоростной железной дороге Тайваня / Y. H. Chang CH. Yeh, C. C. Shen // Transportation Research Part B: Methodological. – 2000. – № 34 (2). – P. 91–106.
- 8 Хэ Бишэн. Исследование теории и методов координационной оптимизации схем запуска поездов и графиков движения высокоскоростных железных дорог / Хэ Бишэн. – Пекин : Пекинский транспортный университет, 2014.
- 9 Claessens, M. T. Оптимальное распределение пассажирских железнодорожных линий с точки зрения затрат / M. T. Claessens, N. M. V. Dijk, P. J. Zwaneveld // European Journal of Operational Research. – 2007. – № 110 (3). – P. 474–489.
- 10 Goossens Aab, J. W. Решение задач планирования железнодорожных линий нескольких типов / J. W. Aab Goossens // European Journal of Operational Research. – 2006. – № 168 (2). – P. 403–424.
- 11 Сюй Жуйхуа. Исследование методов оптимизации схем запуска поездов на пассажирских линиях / Сюй Жуйхуа, Цоу Сяолэй // Журнал Университета Тунцзи (Естественные науки). – 2005. – № 33 (2). – С. 1608–1611.
- 12 Ван Чжэнбин. Модель и алгоритм планирования движения поездов на межгородской пассажирской линии / Ван Чжэнбин, Ма Цзы // Журнал транспортной инженерии и информатики. – 2017. – № 15 (01). – С. 28–33.
- 13 Лю Сун. Исследование эффективности планирования движения многосоставных поездов на межгородских железных дорогах / Лю Сун. – Пекин : Пекинский транспортный университет, 2020.

Получено 27.10.2025

A. A. Erofeev, He Hong. The model for comprehensive optimization of train formation and stop patterns on suburban railway lines.

Global experience in optimizing train formation and stop patterns on commuter rail lines is studied. The new method of integrated optimization is proposed that additionally takes into account limitations on the rolling stock capacity utilization rate. The commuter train schedule optimization problem is formulated taking into account train formation patterns and stop modes. The description of the phase, decision variables, and constant values of the model is formalized. The train schedule optimization model is proposed, and the model's objective function is formulated. The design constraints of the model are described, which include the number of cars in a train, the load factor, the frequency of service on different routes, and stop restrictions. A genetic algorithm is proposed for finding the optimal solution to the problem.