

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТИПА ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПРИГОРОДНЫХ ПОЕЗДОВ НА РАЗМЕЩЕНИЕ ЗОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Ю. О. ПАЗОЙСКИЙ, М. Ю. САВЕЛЬЕВ, Н. В. ПОПОВА
Российский университет транспорта (МИИТ), Москва

Тип графика движения пригородных поездов, очевидно, оказывает значительное влияние на выбор числа технических зон и размещение зонных станций на пригородном участке. От этого в конечном итоге зависит эффективность организации пригородных пассажирских перевозок.

Существующая математическая модель расчёта размеров движения пригородных поездов при применении классического зонного непараллельного графика движения [1; 2; 5; 6; 7] базируется на требовании освоения густот пассажиропотока для каждой технической зоны.

В этом случае число пассажиров, следующих на i -ю техническую зону пригородного участка

$$A_i = \int_{l_{i-1}}^{l_i} \rho(l) dl, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

При этом пассажиропоток, осаживающийся на i -й технической зоне пригородного участка, может осваиваться только поездами своей технической зоны, так как при применении классического зонного непараллельного графика движения на остановочных пунктах i -й технической зоны могут останавливаться только поезда i -й зоны (рисунок 1).

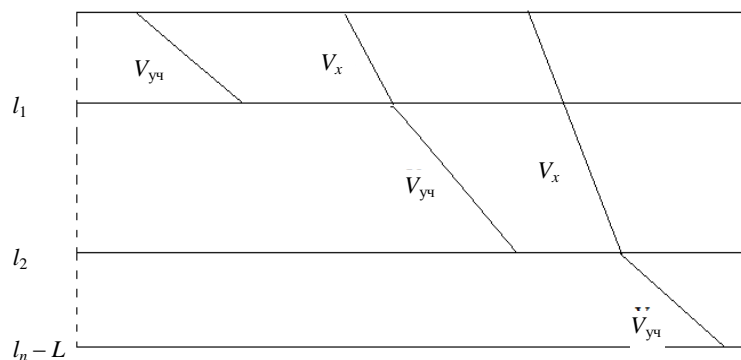


Рисунок 1 – Схема прокладки поездов при зонном непараллельном графике движения

Тогда зонные размеры движения:

$$N_i = \frac{A_i}{a\alpha_{исп}} = \frac{\int_{l_{i-1}}^{l_i} \rho l dl}{a\alpha_{исп}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где a – число мест для сидения в поезде; $\alpha_{исп}$ – коэффициент использования вместимости поезда; n – число технических зон на пригородном участке; l_i – расстояние от головной станции пригородного участка до i -й зонной технической станции; $l_n = L$ – длина пригородного участка; ρl – плотность пассажиропотока на участке;

При применении классического зонного непараллельного графика движения пригородных поездов в качестве критериальной функции оптимизационной задачи размещения зонных технических станций на участке используются суммарные затраты, пропорциональные поездо-километрам пробега $E_{п-км}$.

Затраты поездо-километров Z для поездов, следующих на i -ю техническую зону:

$$Z = l_i N_i \frac{l_i}{a\alpha_{исп}} = \int_{l_{i-1}}^{l_i} \rho l dl, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Тогда суммарные затраты

$$E_{\text{п-км}} = \frac{C_{\text{п-км}}}{a\alpha_{\text{исп}}} = \sum_{i=1}^n l_i \int_{l_{i-1}}^{l_i} \rho l dl. \quad (3)$$

Оптимальный вариант размещения зонных технических станций при фиксированном числе технических зон соответствует минимальному значению критериальной функции, которая определяется из условия:

$$\begin{cases} \frac{\partial E_{\text{п-км}}}{\partial l_1} = 0; \\ \frac{\partial E_{\text{п-км}}}{\partial l_{n-1}} = 0. \end{cases}$$

Или в общем виде получим систему линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных l_1, l_2, \dots, l_{n-1} , определяющих размещение зонных технических станций на пригородном участке.

$$\frac{\partial E_{\text{п-км}}}{\partial l_1} = \frac{C_{\text{п-км}}}{a\alpha_{\text{исп}}} \int_{l_{i-1}}^{l_i} \rho(l) dl + (l_1 - l_{i+1})\rho(l_i) = 0; \quad \forall_i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Рассмотрим частный случай.

При равномерном распределении пассажиропотока по длине пригородного участка.

$$\rho(l) = \rho_0 = \text{const.} \quad \text{Тогда } \rho_0 = \frac{A}{L}, \text{ так как } \int_0^L \rho_0 dl = A,$$

где A – величина суточного пассажиропотока, следующего на пригородный участок с головной станции.

Система уравнений для определения величины l_1, l_2, \dots, l_{n-1} , будет иметь следующий вид:

$$\frac{C_{\text{п-км}}}{a\alpha_{\text{исп}}} \rho_0 (2l_1 - l_{i-1} - l_{i+1}) = 0,$$

(6)

$$i = 1, 2, \dots, (n - y).$$

$$\text{Отсюда } 2l_i - l_{i-1} - l_{i+1} = 0, i = 1, 2, \dots, (n - 1).$$

Так как $l_0 = 0; l_n = L$ имеем:

$$\begin{cases} 2l_1 - l_2 = 0; \\ 2l_2 - l_1 - l_3 = 0; \\ 2l_3 - l_2 - l_4 = 0; \\ \dots \\ 2l_{n-1} - l_{n-2} - L = 0. \end{cases}$$

$$\text{Тогда } l_2 = 2l_1; l_3 = 3l_1; l_4 = 4l_1, \dots, l_{n-2} = (n-2)l_1; l_{n-1} = (n-1)l_1.$$

$$\text{Из последнего уравнения системы имеем } 2(n-1)l_1 - (n-1)l_1 - L = 0.$$

$$\text{Откуда } l_1 \frac{L}{n}, \text{ а следовательно, } l_2 \frac{2L}{n}; l_3 \frac{3L}{n}, \dots, l_{n-1} = \frac{(n-1)L}{n}.$$

Таким образом, при равномерном распределении пассажиропотока по длине пригородного участка с применением классического зонного непараллельного графика движения длины технических зон должны быть равны. При этом длина каждой технической зоны составляет $\frac{L}{n}$.

При применении зонного параллельного графика движения (рисунок 2) существующая модель расчета размеров движения пригородных поездов [2] основывается на минимизации пробега поездов на участке, т. е. имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^n l_i N_n \rightarrow \min(1).$$

При условии освоения густот пассажиропотока по каждой технической зоне:

$$a\alpha_{\text{исп}} \sum_{j=1}^n N_j \geq \Gamma_i, \forall_i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

$$\text{При этом } \Gamma_i = \int_{l_{i-1}}^{l_i} \rho(l) dl. \quad (8)$$

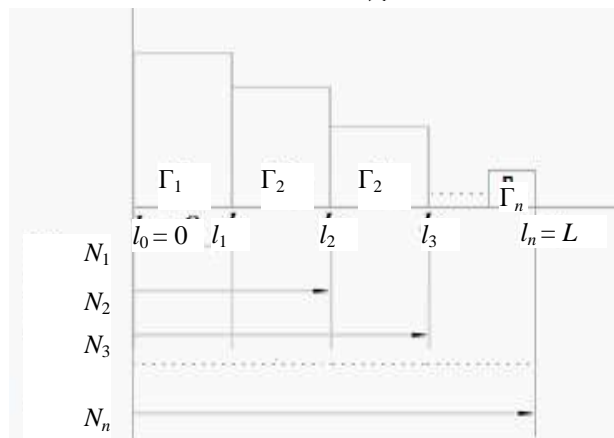


Рисунок 2 – Густоты пассажиропотока и схема прокладки поездов при зонном параллельном графике движения

Задача (1)–(3) является общей задачей линейного программирования. При этом оптимальное решение этой задачи достигается при выполнении точного равенства в системе ограничений (2):

$$\text{Тогда } N_i = \frac{\int_{l_{i-1}}^{l_i} \rho(l) dl}{a\alpha_{\text{исп}}}.$$

Левая часть уравнения системы (2) примет вид:

$$\sum_{j=i}^n l_j \int_{l_{j-1}}^{l_j} \rho(l) dl = \int_{l_{i-1}}^{l_n} \rho(l) dl = \Gamma_i.$$

Таким образом, левая часть уравнений системы (2) будет равна их правой части:

$$\Gamma_i = \Gamma_i, \forall_i = \overline{1, n}.$$

Физический смысл этого результата означает, что при применении зонного параллельного графика движения пригородных поездов и использования математической модели (1)–(3) суммарный пробег поездов достигается тогда, когда поезда каждой технической зоны перевозят пассажиров только своей зоны.

В реальных условиях при зонном параллельном графике движения поезда следуют со всеми остановками, такой тип графика является наиболее предпочтительным для пассажиров. При таком типе графика у пассажиров, следующих на остановочный пункт какой-либо зоны, есть возможность воспользоваться как поездами своей зоны, так и поездами более дальних технических зон. Это требование не учитывалось при разработке анализируемой математической модели. В связи с этим возникает существенная перенаселенность поездов, следующих на дальние технические зоны и недоиспользование вместимости поездов ближних зон.

В связи с этим возникает потребность в создании новой методики расчёта размеров движения и определения оптимального размещения зонных технических станций на пригородном участке [3; 4].

Рассмотрим задачу определения оптимального размещения зонной технической станции на пригородном участке при равномерном распределении пассажиропотока по длине участка для двух технических зон (рисунок 3).

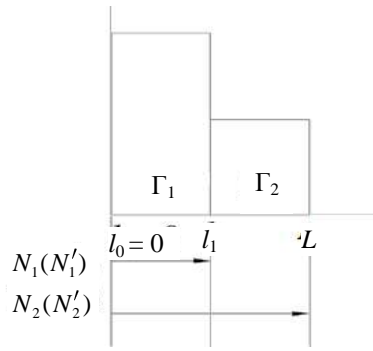


Рисунок 3 – Пример распределения густот при двух технических зонах

Предположим, что плотность распределения пассажиропотока на участке при движении с головной станции $\rho_0 = (l) = \text{const}$.

Расчет размеров движения по существующей методике [1; 2].

$$N_1 \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{a}; \quad N_2 \frac{\Gamma_2}{a}, \quad (9)$$

где N_1, N_2 – размеры движения соответствующей зоны, поездов; Γ_1, Γ_2 – густота пассажиропотока на соответствующей технической зоне за рассматриваемый период, пассажиров; a – вместимость поезда.

Приближенные к оптимальному зонные размеры движения при условии, что пассажиропоток соответствующей зоны равномерно распределяется по поездам, проходящих по ней, в соответствии с работой [3]:

$$\begin{aligned}
 N'_1 &= \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{a} \frac{N_1}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} = \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_1}{N_1 + N_2 + \dots + N_n}; \\
 N'_2 &= \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{a} \frac{N_2}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} + \frac{\Gamma_2 - \Gamma_3}{a} \frac{N_2}{N_2 + \dots + N_n} = \\
 &= \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_2}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} + \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_2}{N_2 + \dots + N_n}; \\
 N'_3 &= \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{a} \frac{N_3}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} + \frac{\Gamma_2 - \Gamma_3}{a} \frac{N_3}{N_2 + \dots + N_n} + \\
 &+ \frac{\Gamma_3 - \Gamma_4}{a} \frac{N_3}{N_3 + \dots + N_n} + \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_3}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} + \\
 &+ \frac{1}{a} \int_{l_1}^{l_2} \rho(l) dl \cdot \frac{N_3}{N_2 + \dots + N_n} + \frac{1}{a} \int_{l_2}^{l_3} \rho(l) dl \cdot \frac{N_3}{N_3 + \dots + N_n}; \\
 &\dots \\
 N'_n &= \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_n}{\sum_{k=1}^n N_k} + \frac{1}{a} \int_{l_1}^{l_2} \rho(l) dl \cdot \frac{N_n}{\sum_{k=2}^n N_k} + \dots + \frac{1}{a} \int_{l_{n-1}}^{l_n} \rho(l) dl \cdot \frac{N_n}{N_n}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Тогда приближенные формулы для расчета размеров движения пригородных поездов при равномерном распределении пассажиропотока по поездам [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} N'_1 &= \frac{(\Gamma_1 - \Gamma_2) N_1}{a(N_1 + N_2)}; \\ N'_2 &= \frac{(\Gamma_1 - \Gamma_2) N_2}{a(N_1 + N_2)} + \frac{\Gamma_2}{a}; \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\text{При этом, } \begin{cases} \Gamma_1 - \Gamma_2 = \rho_0 \int_0^{l_1} dl = \rho_0 l_1; \\ \Gamma_2 = \rho_0 \int_{l_1}^L dl = \rho_0 (L - l_1); \end{cases} \quad (12)$$

Тогда формулы (11) примут вид:

$$\begin{cases} N'_1 = \frac{\rho_0 l_1 \frac{\rho_0 l_1}{a}}{\frac{\rho_0 L}{a}} = \frac{\rho_0 l_1^2}{aL}; \\ N'_2 = \frac{\rho_0 l_1}{a} \frac{\rho_0 (L - l_1)}{a} + \frac{\rho_0 (L - l_1)}{a} = \frac{\rho_0 l_1 (L - l_1)}{L} + \rho_0 (L - l_1) = \frac{\rho_0 l_1 (L - l_1)}{aL} (l_1 + L) = \\ = \frac{\rho_0}{aL} (L^2 - l_1^2). \end{cases} \quad (13)$$

Суммарные поездо-километры пробега поездов по участку:

$$Z = l_1 N'_1 + L N'_2 = \frac{\rho_0 l_1^3}{aL} + \frac{\rho_0}{aL} (L^2 - l_1^2) L. \quad (14)$$

Для определения минимума целевой функции вычислим первую производную и приравняем её нулю:

$$\frac{dz}{dl_1} = \frac{\rho_0}{aL} (3l_1^2 - L2l_1) = 0.$$

Отсюда получим,

$$l_1 = \frac{2L}{3} \quad \text{или} \quad \frac{l_1}{L} = \frac{2}{3}.$$

Таким образом, для двух технических зон длина первой зоны должна быть равна 2/3 всей длины участка.

Рассмотрим пример определения оптимального размещения зонных технических станций на пригородном участке при равномерном распределении пассажиропотока по длине участка для трёх технических зон.

В этом случае размеры движения по существующей методике:

$$N_1 \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{a}; \quad N_2 \frac{\Gamma_2 - \Gamma_3}{a}; \quad N_3 \frac{\Gamma_3}{a}, \quad (15)$$

где N_1, N_2, N_3 – размеры движения соответствующей зоны, поездов; $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ – густота пассажиропотока на соответствующей технической зоне за рассматриваемый период, пассажиров; a – вместимость поезда.

Пусть $\rho_0 = (l)$ – плотность распределения пассажиропотока на участке.

Число пассажиров, следующих на остановочные пункты соответствующей технической зоны:

$$\begin{cases} \Gamma_1 - \Gamma_2 = \rho_0 \int_0^{l_1} dl = \rho_0 l_1; \\ \Gamma_2 - \Gamma_3 = \rho_0 \int_{l_1}^{l_2} dl = \rho_0 l_1 (l_2 - l_1); \\ \Gamma_3 = \rho_0 \int_{l_2}^L dl = \rho_0 l_1 (L - l_2). \end{cases} \quad (16)$$

При постоянной плотности распределения пассажиропотоков на участке и заданной вместимости поезда зонные размеры пригородного движения:

$$N_1 = \frac{\rho_0 l_1}{a}, \quad N_2 = \frac{\rho_0 l_1 (l_2 - l_1)}{a}, \quad N_3 = \frac{\rho_0 l_1 (L - l_2)}{a}. \quad (17)$$

В этом случае откорректированные размеры движения будут иметь вид [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} N'_1 = \frac{\rho_0 l_1^2}{aL}; \\ N'_2 = \frac{\rho_0 l_1}{a} \frac{\rho_0 l_1}{aL} (L_2 - l_1) + \frac{\rho_0 (l_2 - l_1)^2}{a(L - l_1)}; \\ N'_3 = \frac{\rho_0 l_1 (L - l_2)}{aL} + \frac{\rho_0 (l_2 - l_1)(L - l_2)}{a(L - l_1)} + \frac{\rho_0 (L - l_2)}{a}. \end{array} \right. \quad (18)$$

Суммарные поездо-километры пробега пригородных поездов

$$Z = l_1 N'_1 + l_2 N'_2 + l_3 N'_3 = \frac{\rho_0 l_1^3}{aL} + \frac{\rho_0 l_1 l_2 (l_2 - l_1)}{aL} + \frac{\rho_0 l_2 (l_2 - l_1)^2}{a(L - l_1)} + \frac{\rho_0 l_1 (l_1 - l_2)L}{aL} + \frac{\rho_0 (l_2 - l_1)(L - l_2)}{a(L - l_1)} L + \frac{\rho_0 L (L - l_2)}{a}. \quad (19)$$

Пусть

$$r_1 = \frac{l_1}{L}; \quad r_2 = \frac{l_2}{L}; \quad r_3 = \frac{L}{L} = 1. \quad \text{Тогда} \quad l_1 = r_1 L; \quad l_2 = r_2 L; \quad l_3 = r_3 L = L.$$

При этом,

$$Z = \frac{\rho_0 r_1^3 L^3}{aL} + \frac{\rho_0 r_1 L^3 r_2 (r_2 - r_1)}{aL} + \frac{\rho_0 r_2 L^3 (r_2 - r_1)^2}{aL(1 - r_1)} + \frac{\rho_0 r_1 L^3 (1 - r_2)}{aL} + \frac{\rho_0 L^3 (r_2 - r_1)(1 - r_2)}{aL(1 - r_1)} + \frac{\rho_0 L^3 (1 - r_2)}{aL}.$$

После преобразований

$$Z = \frac{\rho_0 L^3}{aL} [r_1^3 + r_1 r_2 (r_2 - r_1) + \frac{r_2 (r_2 - r_1)^2}{1 - r_1} + r_1 (1 - r_2) + \frac{(r_2 - r_1)(1 - r_2)}{1 - r_1} + (1 - r_2)]. \quad (20)$$

Значение целевой функции определим путем численного перебора с шагом 0,05. При условии:

$$r_1 < r_2 < 1. \quad (21)$$

После проведённых расчетов видно, что минимум функции будет достигаться при $r_1 = 0,55$, $r_2 = 0,80$.

Таким образом, при равномерном распределении пассажиропотока по длине пригородного участка для трёх технических зон и параллельном графике движения первую зону выгодно устраивать на расстоянии 0,55, а вторую – 0,80 от всей длины участка.

Список литературы

- 1 **Пазойский, Ю. О.** Пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте (примеры, задачи, модели, методы и решения): учеб. пособие / Ю. О. Пазойский, В. Г. Шубко, С. П. Вакуленко. – М. : Учебно-методический центр на железнодорожном транспорте, 2016. – 364 с.
- 2 Организация пригородных железнодорожных перевозок: учеб. пособие / Ю. О. Пазойский [и др.]; под ред. Ю. О. Пазойского. – М. : Учебно-методический центр на железнодорожном транспорте, 2015. – 270 с.
- 3 **Пазойский, Ю. О.** Специфика применения зонного параллельного графика движения пригородных поездов / Ю. О. Пазойский, М. Ю. Савельев, А. А. Сидраков // Проблемы перспективного развития международных станций и узлов : междунар. сб. науч. тр. под ред. А. К. Головнича. – М. : БелГУТ, 2019. – С. 86–92.

4 **Пазойский, Ю. О.** Размеры движения пригородных поездов при параллельном типе графика / Ю. О. Пазойский, А. М. Соловьев // Наука и техника транспорта. – 2019. – № 3. – С. 71–76.

5 Организация железнодорожных пассажирских перевозок: учеб. пособие для студ. учреждений среднего профессионального образования / под ред. В. А. Кудрявцева. – 3-е изд., стер. – М. : Академия, 2008. – 256 с.

6 **Кочнев, Ф. П.** Пассажирские перевозки на железнодорожном транспорте: учеб. для вузов / Ф. П. Кочнев. – М. : Транспорт, 1980. – 586 с.

7 Организация пассажирских перевозок: учеб. / под ред. А. Г. Котенко и Е. А. Макаровой. – М. : Учебно-методический центр на железнодорожном транспорте, 2017. – 136 с.

УДК 656.224(476):004.9

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПАССАЖИРСКОГО КОМПЛЕКСА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Е. А. ФЁДОРОВ, И. М. ЛИТВИНОВА

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В настоящее время система управления перевозочным процессом на Белорусской железной дороге функционирует на базе комплекса автоматизированных информационно-управляющих систем, с помощью которых принимаются решения, реализуемые технологическими процессами в сфере пассажирских перевозок на полигоне дороги.

Реализация отдельных управляющих решений выполняется с использованием автоматизированных систем управления перевозочного процесса.

Для принятия управленческих решений по основным бизнес-процессам в сфере пассажирских перевозок на Белорусской железной дороге используется ряд ключевых независимых автоматизированных систем:

- Автоматизированная система управления пассажирскими перевозками АСУ «Экспресс-3»;
- Кассовая компьютерная система;
- Единая корпоративная интегрированная система управления финансами и ресурсами (далее – ЕК ИСУФР);
- Актуальное расписание поездов городских, региональных, межрегиональных и международных линий корпоративного интернет-сайта Белорусской железной дороги;
- Единая автоматизированная система информирования пассажиров о движении поездов;
- Система продажи проездных документов (билетов) через Интернет Белорусской железной дороги;
- Автоматизированная система контроля безопасности движения (АСКБД);
- АС Цифровая модель объектов инфраструктуры Белорусской железной дороги;
- АС «Паспорт объектов железнодорожной инфраструктуры» (АС «Паспорт ОЖИ»);
- Автоматизированная система «Отраслевые атласы Белорусской железной дороги» (АС «Атлас»);
- Система динамического управления тарифами и стимулирования спроса ДУТИСС.

Принятие управленческих решений по основным бизнес-процессам пассажирского комплекса осложняется отсутствием взаимосвязей большого количества автоматизированных информационно-управляющих систем, поддерживающих локальные задачи отдельных элементов бизнес-процессов, что приводит к снижению эффективности управляющих воздействий на организацию пассажирских перевозок, снижению оперативности и гибкости решений, надежности реализации основных бизнес-процессов, а также неэффективности КРІ пассажирской деятельности.

Основными бизнес-процессами в сфере пассажирских перевозок на Белорусской железной дороге являются:

- прогнозирование и планирование пассажирской деятельности;
- ресурсное обеспечение плана пассажирских перевозок;
- организация и оперативное регулирование пассажирской деятельности;
- контроль и анализ организации пассажирской деятельности.