

## 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).

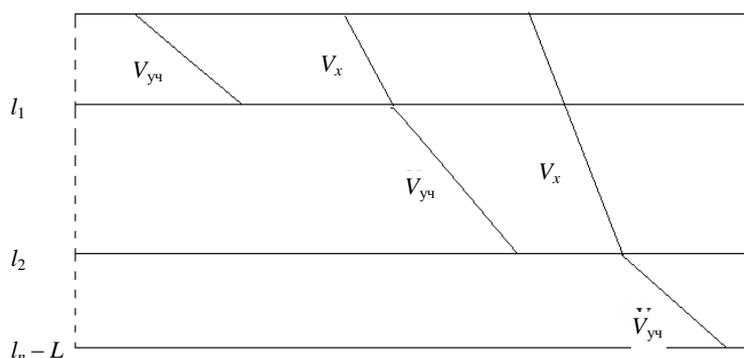


Рисунок 1 – Схема прокладки поездов при зонном непараллельном графике движения

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;  $\rho l$  – 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:

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

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

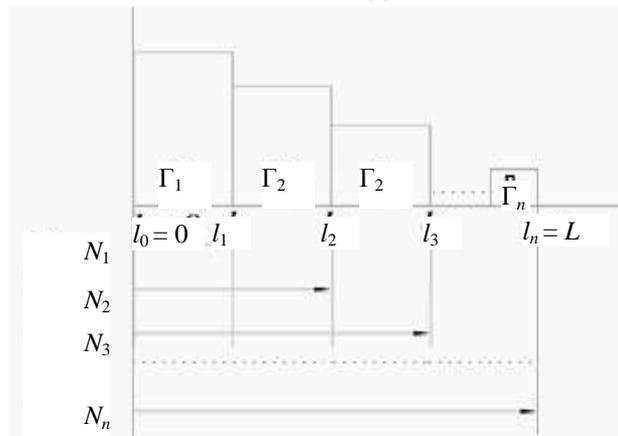


Рисунок 2 – Густоты пассажиропотока и схема прокладки поездов при зонном параллельном графике движения

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).

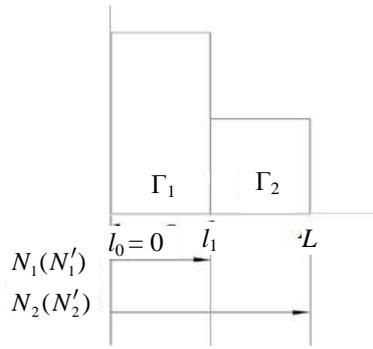


Рисунок 3 – Пример распределения густот при двух технических зонах

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;  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – 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]:

$$\begin{aligned}
 N'_1 &= \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{a} \frac{N_1}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} = \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_1}{N_1 + N_2 + \dots + N_n}; \\
 N'_2 &= \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{a} \frac{N_2}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} + \frac{\Gamma_2 - \Gamma_3}{a} \frac{N_2}{N_2 + \dots + N_n} = \\
 &= \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_2}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} + \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_2}{N_2 + \dots + N_n}; \\
 N'_3 &= \frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{a} \frac{N_3}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} + \frac{\Gamma_2 - \Gamma_3}{a} \frac{N_3}{N_2 + \dots + N_n} + \\
 &+ \frac{\Gamma_3 - \Gamma_4}{a} \frac{N_3}{N_3 + \dots + N_n} + \frac{1}{a} \int_0^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_3}{N_1 + N_2 + \dots + N_n} + \\
 &+ \frac{1}{a} \int_{l_1}^{l_2} \rho(l) dl \cdot \frac{N_3}{N_2 + \dots + N_n} + \frac{1}{a} \int_{l_2}^{l_a} \rho(l) dl \cdot \frac{N_3}{N_3 + \dots + N_n}; \\
 &\dots \\
 N'_n &= \frac{1}{a} \int_{l_0}^{l_1} \rho(l) dl \cdot \frac{N_n}{\sum_{k=1}^n N_k} + \frac{1}{a} \int_{l_1}^{l_2} \rho(l) dl \cdot \frac{N_n}{\sum_{k=2}^n N_k} + \dots + \frac{1}{a} \int_{l_{n-1}}^{l_n} \rho(l) dl \cdot \frac{N_n}{N_n}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

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

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

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.