

# Взаимодействие видов транспорта в системе с одним пересадочным узлом



**Ю. А. Капитонов,**  
канд. техн. наук,  
доцент кафедры  
«Интермодальные  
перевозки и логистика»  
Санкт-Петербургского  
государственного  
университета  
гражданской авиации

Рассматривается задача планирования работы автобусного вокзала (пересадочного узла), примыкающего к железнодорожному вокзалу, как элемента транспортной сети. Предлагается математическая модель такого расчета расписаний движения транспортных средств, чтобы суммарное время ожидания пассажиров в пересадочном узле было минимальным. На примере Зеленогорска анализируются возможности построения эффективного взаимодействия двух видов транспорта.

**В** современных городах и городских конгломерациях используется региональный транспорт; электрички, автобусы, трамваи, метро, региональные поезда. Развивается транспортная инфраструктура, совершенствуются транспортные средства, улучшаются их характеристики. Это связано с демографическими и экономическими особенностями регионов, определяющими транспортные потоки, в том числе пассажиропотоки.

Организация пассажирских перевозок рассмотрена в работах многих российских и иностранных авторов. Анализируется распределение перевозок в зависимости от целей, географии поездок (например, городские, пригородные). Общими критериями, характеризующими транспортные процессы, считают объем транспортной работы, транспортные расходы и тарифы, скорость, безопасность [1, 2]. В работе [3] дан системный анализ управления транспортом в условиях ры-

ФОТО: СЕРГЕЙ ТОРИН



ночной экономики при многообразии форм собственности и конкурентном рынке транспортных услуг. Принципиально, что в книге вопросы управления транспортным комплексом основываются на единой стохастической экономико-математической модели транспортной деятельности. Транспортная деятельность в общем случае отображается случайным вектором функцией от параметров и характеристик состояния.

С позиций качественной организации пассажирских перевозок рекомендован принцип непрерывности потоков транспортных средств или транспортных возможностей. Принцип непрерывности представляется как равномерная последовательность движения транспортных средств на отдельных участках и соединение различных транспортных линий в единую систему с минимальным временем пересадки с одного транспортного средства на другое. Принцип непрерывности, равномерной последовательности привел к появлению тактовых расписаний [4–6] и интегральных тактовых расписаний. Под тактовым расписанием понимают такое расписание, при котором рейсы на маршрутах общественного транспорта осуществляются с равномерным, периодически повторяемым интервалом. Такие расписания относятся к жестким, точно исполняемым. Тактовые расписания в силу своей предсказуемости очень удобны для пассажиров, которым не нужно долго ожидать транспорта. В дальнейшем появились интегральные тактовые расписания, действующие в региональной транспортной сети. Сегодня подобные системы реализованы (или разработаны их проекты) в Голландии, Германии, Швейцарии и в других странах Европы.

В концепции рандеву как элемента интегрального тактового расписания предполагается организация работы одного транспортного пересадочного узла с учетом существующей инфраструктуры. Обычно в нем предполагается веерный тип расписаний: транспортные средства последовательно прибывают в узел, где происходит пересадка пассажиров, а затем последовательно разъезжаются. Масштабным примером работы, основанной на концепции рандеву, можно считать проектный вариант железнодорожного вокзала Штутгарта К-21, где планировалось согласованное прибытие и отправление 15 поездов различных классов. На той же концепции основана организация движения части автобусов в городе Хер-

форд (Германия, земля Северный Рейн – Вестфалия). Транспортный узел в этом городе находится на площади Altermarkt в центральной части города, где сходятся маршруты шести автобусных линий. Движение всех автобусов подчинено тактовому расписанию.

Создание математических моделей оптимизации или синхронизации расписаний движения транспортных средств в сети описано в работах многих авторов. Наибольшее распространение в сетях автобусных пассажирских сообщений получила математическая модель синхронизации израильского специалиста А. Ceder [7, 8], которая сводится к задаче линейного целочисленного программирования.

Мы провели апробацию такой модели синхронизации для расчета расписаний автобусных маршрутов на примере автовокзала Зеленогорска (курортный район Санкт-Петербурга), задав один узел и три автобусных линии. Исходные данные для задачи взяты из действующего расписания автобусных маршрутов 211, 213, 305 [9]. В результате пробных расчетов были выявлены существенные затруднения при использовании указанной модели.

В работе [10] предложена математическая модель синхронизации расписаний только автобусных маршрутов. Рассмотрим вариант стыковки расписаний при использовании регионального железнодорожного транспорта и нескольких автобусных линий, имеющих железнодорожный вокзал как исходную точку маршрута. Такая схема взаимодействия характерна для многих малых городов России, городов-спутников. Например, в Ленинградской области это Выборг, Зеленогорск, Новый Петергоф и др. Как и в [10], в одном узле встречаются  $n$  транспортных средств, работающих на  $n$  линиях. Прибытие и отправление осуществляются по веерной схеме, т. е. транспортные средства сначала последовательно прибывают, а затем последовательно убывают. Одновременное прибытие и отправление не допускается. Известна матрица числа пассажиров, желающих пересечь с одной линии на другую, в единицу времени (час). Известны два вектора: вектор возможного времени отправления, что определяется из инфраструктурных особенностей пересадочного узла. Вектор времени прибытия зададим относительно центральной точки веерного расписания, аналогично

можно задать вектор времени отправления. Требуется определить такой порядок прибытия и отправления транспортных средств, чтобы суммарное время ожидания пассажиров было минимальным, и тем самым определить расписание движения транспортных средств, встречающихся в пересадочном узле.

### Математическая модель

Математическая формулировка задачи синхронизации в одном узле будет иметь вид, представленный в работе [10]. Обозначим  $t_{arr,i}$  – значение возможного времени прибытия,  $i = 1, \dots, n$ ;  $t_{dep,j}$  – значение возможного времени отправления,  $j = 1, \dots, n$ ;  $f(k,l)$  – матрица потока пересадок,  $k = 1, \dots, n$ ,  $l = 1, \dots, n$ ;  $f(k,l) = 0$  при  $k = l$ .

Требуется найти

$$\min \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f(k,l) \tau(k,l), \quad (1)$$

где  $\tau(k,l)$  – время на пересадку пассажиров с линии  $k$  на линию  $l$ .

Представим это время как сумму двух составляющих по веерной схеме, тогда получим другой вид критерия (1):

$$\min \left( \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n C_{A,ik} \cdot XARR_{ik} + \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^n C_{D,jl} \cdot XDEP_{jl} \right), \quad (2)$$

где

$$C_{A,ik} = t_{arr,i} \cdot \sum_{k=1}^n f(k,l), \quad C_{D,jl} = t_{dep,j} \cdot \sum_{k=1}^n f(k,l), \quad (3)$$

На время нахождения транспортного средства в пересадочном узле наложены дополнительные ограничения согласно условию тактовых расписаний.

Матрица  $C_{A,i,k}$  представляет значения пассажиро-минут ожидания при прибытии пассажиров по веерной схеме, если транспортное средство  $k$ -линии прибывает  $i$ -м, отсчитанным от центральной части веера; матрица  $C_{D,j,l}$  аналогично представляет значения пассажиро-минут ожидания при отправлении пассажиров по веерной схеме, если транспортное средство  $l$ -й линии отправится  $j$ -м, отсчитанным от центральной части веера. Суммы в выражении (3) – это сумма числа пассажиров, прибывших по линии  $k$  и желающих пересечь на другие линии, и сумма числа пассажиров, прибывших со всех линий и желающих уехать по линии  $l$ . В матрице  $XARR$  значение  $XARR_{ik}$  равно единице, если транспортное средство  $k$ -линии прибывает  $i$ -м, иначе  $XARR_{ik}$  равно нулю. Это ограничение означает, что одновременное прибытие транспортных средств не допускается. В матрице  $XDEP$  значение

Таблица 1

Номер периода	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время (ч:мин)	7:30	8:30	9:30	11:30	14:30	15:00	16:30	17:30	21:30
	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	8:30	9:30	11:30	14:30	15:00	16:30	17:30	21:30	22:30
Возможный интервал – такт (мин), ΔT	20	30	60	180	30	90	60	30	60

Таблица 2

Номер автобуса	211	213	305	321	322	319	404	410
Возможный интервал – такт (мин), ΔT	15	30	30	30	180	90	120	180

$XDEP_{jl}$  равно единице, если транспортное средство  $l$ -й линии отправится  $j$ -м, иначе  $XDEP_{jl}$  равно нулю, т. е. одновременное отправление транспортных средств также не допускается.  $t_{arr,k}$  – время ожидания при прибытии транспортного средства  $k$ -й линии, отсчитанное от центральной точки веера;  $t_{dep,k}$  – время ожидания при отправлении транспортного средства  $k$ -й линии, отсчитанное от центральной точки. Время ожидания выражается через  $\Delta T$  – принятый такт при организации тактовых расписаний.

Размерность матриц  $C_{Ai,k}$ ,  $C_{Di,l}$ ,  $XARR_{ik}$ ,  $XDEP_{jl}$  –  $n \cdot n$ ; размерность всех векторов в задаче –  $n$ . Задача (1)–(3) – двоякая линейная задача назначений с дополнительными ограничениями. При числе линий  $n$  потребуется  $2n^2$  булевых переменных, на которые наложены  $4n$  ограничений типа равенств и  $n$  ограничений на время пребывания транспортного средства в узле типа неравенств. Данная модель реализована в программном пакете Excel и решается надстройкой «Поиск решения».

Сложность решения задачи синхронизации расписаний в условиях России определяется прежде всего тем, что железнодорожные и автобусные линии находятся под управлением различных транспортных ведомств, а не единого транспортного регионального союза.

### Установка такта для всех линий

Пример видоизмененного из [11] расписания прибытия электропоездов в Зеленогорск представлен в табл. 1.

Отклонение видоизмененного расписания от реального в периоды 1, 2 составляет не более 5 мин, в период 3 – не более 20 мин, для остальных периодов – не более 10 мин. Расписание движения напоминает эпюру пассажиропотоков по времени для рабочего дня: утренний пик (периоды 1, 2), дневные

часы (периоды 3–6) с пониженным спросом, вечерний пик (протяженный период 8) и вечерний спад (период 9)

Для автобусных линий, сходящихся в на железнодорожном вокзале, возможные такты из действующих расписаний представлены в табл. 2.

Как видно, в большинстве периодов прибытия электричек и для всех автобусных линий общим может быть принят единый интервал – 30 мин, т. е. единый такт с изменяющимся количеством стыкующихся линий в зависимости от времени суток. Самое эффективное взаимодействие можно организовать в периоды 2 и 8 и для первых четырех автобусных линий (211, 213, 305, 321)

**Веерное расписание.** Для автобусных линий веерное расписание может быть установлено в транспортном узле таким образом, что время прибытия в узел и время отправления из него регламентируются критерием оптимальности стыковки и возможностью инфраструктуры. Время пребывания пассажиров в узле не должно быть большим. Это выполнимо за счет переноса мест отстоя автобусов из транспортного узла в другую конечную точку их маршрута.

Для железнодорожных сообщений задача существенно усложняется. Во-первых, рассматриваемый транспортный узел не является для части электропоездов в дневном расписании конечной точкой маршрута. Электропоезда следуют в другие пункты, и время их возвращения в промежуточную точку зависит от длины дальнейшей части маршрута. Например, в рассматриваемом примере для четверти электричек Зеленогорск служит конечной точкой маршрута. Три четверти электричек двигаются дальше, в Рошино, Выборг. Организация короткого времени пересадок для таких электропоездов к возможна либо на прямом рейсе, либо на

обратном. Веерное расписание можно установить только для той части электропоездов, конечной точкой маршрута которых служит Зеленогорск.

При этом еще время пребывания этих электропоездов в транспортном узле должно быть сокращено. В действующем расписании время между прибытием электричек в Зеленогорск и их отправлением обратно в Санкт-Петербург составляет около 20 мин. Это сопоставимо со временем выполнения рейса на некоторых автобусных маршрутах, входящих в транспортный узел.

Таким образом, веерное расписание, в котором можно упорядочивать прибытие и отправление транспортных линий с тактовым расписанием, в полном варианте возможно для электропоездов, следующих только до транспортного узла и обратно. Для проходящих электропоездов можно реализовать только часть веерного расписания с организацией стыковок либо на прямом, либо на обратном рейсе.

Вернемся к рассмотрению транспортного узла – железнодорожного вокзала и автовокзала в Зеленогорске. В качестве основного такта расписания примем  $\Delta T = 30$  мин.

В указанном узле сходятся электрички (см. табл. 1) и маршруты социальных автобусов (см. табл. 2). Один из вариантов таблицы прибытий и отпавлений относительно нуля веерной точки с учетом инфраструктуры автовокзала представлен в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что минимальное время пребывания в пересадочном узле будет у прибывающего последним и отправляющегося первым транспортного средства, и оно составляет восемь минут. За это время должны выйти одни пассажиры и войти другие.

Матрица пассажиропотоков пересадок пассажиров  $f(k,l)$  в данной работе

Таблица 3

Номер прибытия	8	7	6	5	4	3	2	1
Время ожидания при прибытии (мин)	18	16	14	12	10	8	6	4
Номер отправления	8	7	6	5	4	3	2	1
Время ожидания при от отправлении (мин)	11	10	9	8	7	6	5	4

Таблица 4

Электропоезд, номер автобуса	Время прибытия на вокзал Зеленогорска			
Электропоезд		:56		:26
211		:54	:09	:24
213		:52		:22
305		:50		:20
321		:48		:18

Таблица 5

Электропоезд, номер автобуса	Время отправления от вокзала Зеленогорска			
Электропоезд		:04		:34
211		:05	:20	:50
213		:06		:36
305		:07		:37
321		:08		:38

задавалась случайным образом в некотором диапазоне. Вариант решения задачи и построения тактового расписания для электричек и первых четырех автобусов (см. табл. 2) для рассматриваемых периодов 2, 5, 8 (см. табл. 1) дневного времени суток приведен в табл. 4, 5.

В периоды суток, отличные от 2, 5, 8 (см. табл. 1), в расписаниях не будет электропоездов. Согласуются только автобусные линии.

Из допущения о постоянстве времени выполнения рейсов можно легко получить время отправления транспортных средств из противоположной к пересадочному узлу точки маршрутов.

В случае нескольких линий возможны разные варианты осложнений. Может потребоваться введение дополнительных автобусов либо исключение каких-то маршрутов из веерной схемы прибытий-отправлений. Время решения одного варианта задачи (1)–(3) для девяти транспортных линий составило пять секунд в программе Excel на компьютере с тактовой частотой 2,60 GHz, процессор x64.

Таким образом, взаимодействие видов транспорта в региональной пассажирской транспортной системе с одним пересадочным узлом можно осуществить

при использовании тактовых расписаний движения электропоездов и автобусов, задавая для них единый такт или кратные такты. Для этого необходимы некоторые усилия организаций, осуществляющих организацию перевозок. Существенное осложнение в организацию полного взаимодействия вносит то обстоятельство, что на некоторых линиях транспортный узел может быть промежуточной точкой маршрута. В этом случае тактовые расписания автобусных линий можно согласовать только с прямыми рейсами электропоездов либо только с обратными. В целом переход на тактовые расписания и их синхронизация позволяют существенно сократить время пребывания пассажиров в транспортном узле. ■

**Литература**

1. Вельможин А. В., Гудков В. А., Миротин Л. Б. Теория транспортных процессов и систем: учеб. для вузов. – М.: Транспорт, 1998.
2. Спирин И. В. Перевозки пассажиров городским транспортом: справ. пособие. М.: Академкнига, 2006.
3. Крыжановский Г. А., Шашкин В. В. Управление транспортными системами. СПб., 1998.

4. Рюгер З. Эксплуатация городского пассажирского транспорта / пер. с нем. М.: Транспорт, 1977.
5. Капитонов Ю. А. Региональные транспортные системы на тактовом принципе // Транспорт: Наука, техника, управление. 2013. № 12. С. 30–31.
6. Капитонов Ю. А. Расчет тактового расписания одной линии в региональной пассажирской транспортной системе // Транспорт: Наука, техника, управление. 2014. № 12. С. 13–16.
7. Ceder A., Golany B., Tal O. Creating bus timetables with maximal synchronization// Transp. Res. Part A: Policy and Practice. 2001. Vol. 35, № 10. P. 913–928.
8. Ceder A. Systems Analysis as an Introduction to Operations Research. Michlol Publication – Technion (Israel), 1999.
9. СПб ГКУ «Организатор перевозок». URL: <http://www.orgp.spb.ru>.
10. Капитонов Ю. А. Математическое моделирование расписаний в региональной пассажирской системе с одним пересадочным узлом // Транспорт: Наука, техника, управление. 2015. № 12. С. 12–16.
11. Туту.ру. URL: <http://www.tutu.ru>.