

Пути дальнейшего развития рельсовой пассажирской системы Минска необходимо переосмыслить с использованием вариантов реализации не только за счет метрополитена. Обоснованное перераспределение финансовых потоков, возможностей существующих в Минске проектных и строительных организаций позволило бы в более короткие сроки сформировать сбалансированную рельсовую пассажирскую систему (рис. 13).

Пассажирская система в целом может «свернуться» до модели «метро + автобус» с исключением не только трамвайного, но и троллейбусного движения (при этом троллейбусная система г. Минска по количеству маршрутов в 2017 г. стала первой в мире, по другим показателям – второй после г. Москвы).

Рельсовая система с тремя полноценными составляющими обеспечит потребности большего количества жителей в перемещениях по городу с меньшими затратами времени и более высоким уровнем комфорта. Такая система станет «каркасом» всей транспортной системы города, будет способствовать уменьшению доли городских перемещений на личных автомобилях, уменьшит экологическое воздействие транспорта на воздушную среду, повысит дорожную безопасность (за счет снижения интенсивности автомобильного движения). В итоге система мобильности в г. Минске будет в большей степени соответствовать принципам «устойчивого развития».

Поступила 27 декабря 2017 г.

УДК 681.5:001.891.57

Критический взгляд на реорганизацию ГПТ г. Екатеринбурга

С.П. Трофимов, Н.Г. Дружинина, О.Г. Трофимова

В работе проведен анализ проекта реорганизации сети городского пассажирского транспорта г. Екатеринбурга, предложенного фондом «Город.Про», в котором реализуются идеи Дж. Уокера. Приводятся математически обоснованные возражения против данного проекта. Предложен вариант реорганизации сети ГПТ, основанный на пятимодульной концепции, которая предполагает предварительную обработку исходных данных ГПТ, реализацию алгоритмов построения оптимальных маршрутов, идентификацию матрицы корреспонденций пассажиропотока с использованием электронной системы оплаты, моделирование перемещения пассажи-

ропотока с известной плотностью по оптимальным маршрутам с получением количественных оценок текущей сети ГПТ и, наконец, разработку мобильной информационной системы информирования пассажира о возможных вариантах его маршрута.

Authors made the analysis of the reorganization project that was, proposed by the fund «Gorod.Pro» and in which the ideas of J. Walker are realized about the urban passenger transport network in Yekaterinbur. Mathematically grounded objections to this project are given. A variant of the reorganization of the UPT network based on the five-module concept is proposed. It assumes the preliminary processing of the UPT initial data, the implementation of algorithms for constructing optimal routes, the correspondence matrix identification of the using the electronic payment system, the modeling of the passenger traffic movement with a known density by optimal routes with obtaining quantitative estimates of the UPT current network. And, lastly, the development of a mobile information system for informing the passenger about his route possible variants.

В результате длительных обсуждений Администрация г. Екатеринбурга приняла решение о реорганизации ГПТ летом 2017 года. Автором идеи является Джарретт Уокер и команда фонда «Город.PRO». Все доступные биографические сведения об Д. Уокере свелись к тому, что он имеет степень искусств и гуманитарных наук PhD (Arts and Humanities PhD (Stanford, 1996)) [1], основные идеи его концепции изложены в [2].

Данная концепция в течение 2016 г. проходила общественное обсуждение, например, были проведены встреча с горожанами (апрель 2016 г. в центре Палладиум), выставка ПРОМЭКСПО (июль 2016 г.), интернет-интервью с администрацией [3]. Однако, научной дискуссии со специалистами не было. В частности, на международной конференции «Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния» в 2016 г. эта тема не поднималась. В начале 2017 г. прошли «бурные» общественные обсуждения и в феврале 2017 г. проект был отложен на 2 года. Поэтому анализ предлагаемого проекта остается актуальным.

Основные претензии к существующей системе ГПТ г. Екатеринбурга сводятся к следующему:

1. Большое количество маршрутов.
2. Дублирование маршрутов разных видов транспорта.

В результате реформы команда г-на Уолкера предполагает получить следующие результаты:

1. Количество маршрутов уменьшится.
2. Количество пересадок увеличится.
3. Частота движения на коротких маршрутах увеличится.
4. Можно отказаться от точного поостановочного расписания.
5. Можно не учитывать матрицу корреспонденций, которая определяет плотность пассажиропотока.

Основные возражения против проекта «Города-Про»

В данной работе мы приводим соображения, которые противостоят тезисам проекта команды г-на Уолкера.

Тезис 1. Построим пример, который противоречит этому тезису. Рассмотрим звездообразную топологию сети с n лучами и одним центром пересадок. Оценим количество различных длинных маршрутов между концами противоположных лучей: $D = n/2$. Если длинные маршруты соединяют все пары концов по отдельности, то $D = n(n - 1)/2$. Количество K коротких маршрутов от конца луча до центра пересадки равно $K=n$. Таким образом, для данного случая числа K и D не связаны каким-либо неравенством. Для более сложной топологии ситуация может быть аналогичной.

Тезис 2. Пусть количество пересадочных остановок для пассажира из пункта A в пункт B по старой схеме равно $P_{ст}(A, B)$. По новой схеме между пересадочными остановками можно пустить новый маршрут, и в этом случае количество пересадок равно $P_{нов}(A, B)$. Тогда выполняется неравенство $0 \leq P_{ст}(A, B) \leq P_{нов}(A, B)$. Таким образом, количество пересадок может не увеличиться.

Тезис 3. Будем называть частотой движения по перегону количество ПЕ (подвижных единиц), прошедших за единицу времени, через заданную точку перегона. Длина перегона не существенна. На коротких маршрутах (при новой системе) можно установить свою частоту движения независимо. При старой системе частота между смежными пересадочными остановками является результатом решения задачи о потоках в сетях. Обозначим r_{ij} – частота движения всех транспортных единиц между смежными пересадочными остановками i, j . Получаем поток частот в сети, где для каждого узла (пересадочная остановка) сумма входных частот равна сумме выходных частот. Для конечных остановок (парки) выходные частоты задаются расписанием выезда. Данная задача имеет много допусти-

мых решений, одним из которых является фактическое движение ПЕ. Таким образом, частоты на перегонах могут меняться в самых разных диапазонах. Вряд ли это является существенным недостатком действующего графика движения. Если не учитывать различные номера маршрутов, то сумма частот движения по всем смежным участкам в обоих случаях одинакова, т.к. количество ПЕ одинаково и суммарная длина пробега ПЕ тоже одинакова.

Тезис 4. Д. Уокер утверждает, что расписание не важно, т.к. пассажир может пользоваться любым ПЕ. При действующей системе тоже можно пользоваться любым ПЕ и делать пересадки, только при действующих тарифах это не экономично для пассажира (кроме тех, у кого проездной). Если в рамках действующей системы сделать пересадки бесплатными, то новая система теряет свое основное преимущество – отказ от расписания. Мы считаем, что от точного расписания отказываться нельзя.

Тезис 5. Матрицу корреспонденций нельзя заменить геометрическим методами построения топологии сети. Матрица содержит информацию о транспортном потоке между определенными участками и в определенные моменты времени, т.е. позволяет учитывать плотность пассажиропотоков. Топология сети должна содержать диагональные маршруты, проходящие через центры пересадок. Для разгрузки этих центров пересадок нужны кольцевые маршруты.

Предлагаемая реформа системы ГПТ имеет ряд явных и скрытых недостатков.

1. Она отказывается от создания и сопровождения постановачного расписания движения ПЕ.

2. Она предполагает использование административных рычагов для организации взаимодействия различных видов ГПТ.

3. Увеличение количества пересадок и планируемый рост стоимости проезда непременно вызовет недовольство граждан.

4. Новая модель страдает «упрощенчеством». Вместо создания сложной интеллектуальной системы предлагаются простые решения. Модель не предоставляет возможности сравнения и оценки качества различных топологий сети ГПТ.

Критерий качества пассажирского транспорта

Мы считаем необходимым сформулировать основное требование к моделям городского пассажирского транспорта. Допустим, есть две различные сети ГПТ (включает: топология дорог, топология маршру-

тов и расписание движения ПЕ). Модель должна определить, какая из этих сетей является лучшей по целому ряду критериев.

Проект, предлагаемый г-н Д. Уокером, как будто не предполагает сложной математической или статистической модели. В то же время задача моделирования пассажирского транспорта требует интеллектуальной обработки больших объемов данных и построения оптимизационных моделей.

Модульная концепция модели городского пассажирского транспорта

Мы разрабатываем пятимодульную концепцию, построенную на математическом и статистическом базисе.

В модуле предварительной обработки данных мы анализируем топологию сети и преобразуем данные о маршрутах и расписании движения ТЕ с помощью структур данных, которые мы называем кластеры. Кластер создается для каждого остановочного пункта и состоит из перегонов, исходящих из этой остановки. Перегон содержит следующую информацию: время старта, номер и направление маршрута, тип маршрута и пр. Таким образом, кластер состоит из нарезанного на кусочки расписания. Кластеры могут соединяться между собой специальными перегонами, например, пешеходные участки. Кластеры позволяют агрегировать информацию о расписаниях различных типов транспорта.

Во втором модуле пассажиру предоставляется новая информационная услуга: построение оптимального маршрута с пересадками с учетом ранее строго утвержденного расписания [4, 5]. Оптимальный маршрут строится по заданным точкам начала и окончания поездки и времени старта. Критериями оптимальности могут являться: время поездки, стоимость поездки с учетом пересадок, уровень комфорта и др. Кроме утилитарной пользы оптимальных маршрутов, данный модуль играет решающую роль в нашей системе. Разумно предполагать, что пассажир интуитивно или осознанно выбирает именно оптимальные маршруты для своих поездок. Поэтому при изменениях в сети ГПТ мы можем рассчитать фактическую реализацию пассажиропотока при моделировании.

Третий модуль включает в себя идентификацию и статистический анализ матрицы корреспонденций пассажиропотока с использованием информации электронной системы оплаты за проезд. При этом пересадки пассажира склеиваются в один маршрут. На осно-

вании анализа всех однодневных транзакций этого пассажира, мы определяем стартовую точку его обратного пути, которая, скорее всего, совпадает с конечной точкой его прямого пути. Таким образом, пересадки не учитываются в матрице корреспонденций [6, 7, 8]. Аналогичный подход к анализу данных Е-карт с построением траекторий пассажира содержится в работе [9].

Таким образом, мы определяем матрицу корреспонденций как функцию плотности в 5-мерном пространстве точек ($x_{ст}$, $У_{ст}$, $t_{ст}$, $x_{кон}$, $У_{кон}$). Для оценки матрицы корреспонденций всего мегаполиса мы предлагаем оценить матрицу корреспонденций для одного пассажира, но за длительное время, например, в течение года. Пассажир идентифицируется по номеру Е-карты. Значительный объем информации об одном пассажире позволяет разработать экспертные системы для восстановления неполных или искаженных данных о маршрутах этого пассажира. В результате строится годовая индивидуальная матрица корреспонденций (ИМК). Для получения однодневной ИМКмы предлагаем нормировать годовую матрицу путем деления на 365 дней.

Общая однодневная матрица корреспонденций строится как взвешенная сумма однодневных ИМК, в которой весами являются активность перемещений отдельного пассажира, например, количество его поездок за год.

Таким образом, ежедневное перемещение индивидуального пассажира представляет собой не отдельные поездки одного человека, а его поездки по всем траекториям, которые он совершил в течение года. При этом в каждой такой поездке участвует не весь пассажир, некоторая его часть в соответствии с весом этой поездки в его ИМК.

В четвертом модуле на основе построенной матрицы корреспонденций мы предполагаем, что пассажиропоток с известной плотностью перемещается по оптимальным маршрутам. И на этом этапе можно получать и сравнивать количественные оценки расписания, топологии маршрутов и сети ГПТ.

Реализация первых четырех модулей делает возможным сформулировать новую концепцию системы информирования пассажиров о работе ГПТ.

Пятый модуль предполагает разработку мобильной информационной системы «Поводырь». Основная трудность любой ИС ГПТ состоит в отсутствии современных способов доведения информации

до пассажиров. Система «Поводырь» позволит отказаться от маршрутизированного ГПТ. Транспортные единицы (ТЕ) могут идентифицироваться не по номеру маршрута, а с помощью индивидуальных признаков: цвет, фактура, ID-номер. Система будет предлагать пассажиру пересадку не на маршрут, а на конкретную ТЕ. Это позволит вводить временные безномерные маршруты, включить их в базу кластеров и оперативно предлагать пересадки на эти маршруты.

Статистический анализ пассажиропотока

Статистический анализ основан на отчетно-статистическом методе обследования при различных способах оплаты проезда (наличный и безналичный расчет на примере электронной системы оплаты проезда).

Разработана программа статистического анализа пассажиропотока на базе данных электронной системы оплаты проезда [10]. В процессе анализа использовались пять различных критериев согласия: о совпадении средних, дисперсий, коэффициентов корреляции, независимости выборок и резко выделяющихся исходных данных. Проведен аналитический обзор результатов статистического анализа пассажиропотока по месяцам за 7 лет для 50 маршрутов трамвайно-троллейбусной сети г. Екатеринбурга. Выявлены маршруты трамваев и троллейбусов, у которых пассажиропоток при различных способах оплаты проезда (наличный и безналичный расчет по Е-карте) неоднороден во времени и пространстве. При анализе учитывалась маршрутная схема движения общественного транспорта.

Например, была сформулирована статистическая гипотеза о совпадении средних значений ежедневного количества пассажиров (оплачивающих проезд наличным и безналичным способом по Е-карте) за сезон года и за отдельный месяц этого сезона. Эта гипотеза проверялась 72×50 раз: по 12 раз в году для каждого месяца в течение 7 лет для каждого из 50 маршрутов отдельно. В результате анализа для большинства месяцев выявлено отличие средних значений количества пассажиров в троллейбусах 20 и 5 маршрутов. Таким образом, для этих маршрутов в матрице корреспонденций наблюдаются статистически значимые отклонения среднемесячных показателей от среднесезонных. Было бы целесообразно изменить интенсивность движения по данному маршруту в большую или меньшую сторону. При уменьшении интенсивности данный маршрут станет не востребован и возникает риск его закрыть. По результатам наше-

го анализа руководство может принимать решение, например, о закрытии этого маршрута или об увеличении его интенсивности. Можно провести более детальный статистический анализ, если рассматривать средний дневной объем пассажиропотока.

Литература

1. <http://jarrettwalker.com/team/>
2. Human Transit: How Clearer Thinking about Public Transit Can Enrich Our Communities and Our Lives. Island Press, 2011. – 256 p.
3. http://www.e1.ru/news/spool/news_id-459025.html
4. Аналитическое моделирование транспортной системы мегаполиса / С.П. Трофимов, О.Г. Трофимова, Н.Г. Дружинина, М.Ю. Низова // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2009. – № 10 (28). – С. 56–71.
5. Трофимов, С.П. Предварительная обработка исходных данных для реализации алгоритмов поиска оптимальных маршрутов пассажира / С.П. Трофимов, О.Г. Трофимова, Н.Г. Дружинина // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния. Том I. : Материалы XXII Междунар. (двадцать пятой екатеринбургской) науч.-практ. конф. (16-17 июня 2016 г.) / науч. ред.: С.А. Ваксман. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2016. – С. 346–352.
6. Дружинина, Н.Г. Оценка распределения межрайонного пассажиропотока городского электротранспорта / Н.Г. Дружинина, О.Г. Трофимова, С.П. Трофимов // Программные продукты и системы. – 2015. – № 2 (110). – С. 147–153.
7. Дроздов, Н.П. Анализ перевозки пассажиров с использованием системы электронной оплаты проезда по Е-карте / Н.П. Дроздов, Н.Г. Дружинина, О.Г. Трофимова // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: материалы XIX Междунар. (двадцать второй екатеринбургской) науч.-практ. конф. (16-17 июня 2013 г.) / науч. ред. С.А. Ваксман. Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2013. – С. 213–223.
8. Дружинина, Н.Г. Формирование транзакциопотоков на городском электротранспорте / Н.Г. Дружинина, С.П. Трофимов, О.Г. Трофимова // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014661819 от 13.11.2014. – М.: ФСИС, 2014.
9. Морозов, А.С. Построение матрицы пассажирских корреспонденций по данным о валидациях билетов и навигационным отметкам / А.С. Морозов, А.А. Черников // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы XXIII Международной (XXXVI Екатеринбургской, I Минской) научно-практической конференции. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 149–162.
10. Дружинина, Н.Г. Статистический анализ пассажиропотока на примере электронной системы оплаты проезда / Н.Г. Дружинина, К.В. Схиртладзе, О.Г. Трофимова // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016661213. – М.: ФСИС. Бюл. № 10 (120) от 20.10.2016. 2016.

Поступила 17.06.2017 г.

Окончательно поступила 11.01.2018 г.