

Методика постановки натуральных экспериментов на городской транспортной сети

П. Л. ЧЕЧЕТ, В. Н. ГАЛУШКО

Введение

Целью натурального эксперимента (НЭ) с городской транспортной сетью (ГТС) является изучение структуры существующих пассажиропотоков маршрутных троллейбусных линий для построения на основе результатов имитационных моделей (ИМ). С помощью ИМ ГТС появляется возможность изучения динамики пассажиропотоков в течение суток на транспортных линиях. Данные НЭ используются в качестве исходной информации при “запитке” ИМ ГТС. Поставленная цель определила необходимость разработки программы анализа результатов НЭ, а также создания средств построения ИМ и технологий проведения исследования. С их помощью необходимо получить следующую статистику о поведении пассажиров ($PASS_i$) на остановках (OST_{rj}), транспортных средств ($TRSR_{jk}$) в ГТС, режимов работы светофоров (SV_i). По результатам измерения этих статистик формируются интенсивности появления пассажиров на каждом остановочном пункте маршрута (λ_i) и оценивается социальный состав пассажиропотока (SOPAS). Интенсивность появления пассажиров λ_i на остановочном пункте (OST_r) определяется по его гистограмме распределения числа вошедших (n_i) и число покинувших остановку пассажиров (n_j) на r -ом OST_r . Социальный состав перевезенных пассажиров определяет количество различных групп населения, составляющих пассажиропоток на OST_r (рабочие, служащие, учащиеся и остальные). Данная информация позволяет определить структуру модели поведения пассажира в виде транзактов, имитирующих поступление пассажиров в ИМ ГТС. Различаем следующие характеристики информационных транзактов: социальная группа населения ($SOPAS_i$), OST_r посадки, OST_k пересадки, OST_j высадки, список используемых маршрутов при движении транзакта по ИМ ГТС.

1. Условия проведения и технология постановки НЭ на ГТС

Исследование основано на анкетировании пассажиров в ГТС. Для организации анкетирования выбирается день недели, являющийся типовым для загрузки ГТС. При этом в ходе НЭ стремятся изучить типовую структуру пассажиропотоков на выбранных маршрутах ГТС. Предварительно разрабатывается два типа анкет, которые согласовываются с администрацией ГТС для легализации проведения НЭ и исключения ошибок процесса анкетирования. Первый тип анкет по своей сути имеет целью получить статистическую информацию о характере и особенностях движения маршрутного транспорта. Второй тип анкет предназначен для изучения социального состава пассажиропотока и структуры передвижений пассажиров в исследуемой ГТС.

Выбираются типовые маршруты ГТС для определенного характера загрузки транспортных средств с целью получить статистику движения пассажиропотоков. На наиболее важных OST_r (в двух направлениях движения маршрутного транспорта) проводится суточная процедура анкетирования. Для остальных маршрутов исследовались OST_{rj} , являющиеся местами пересадки пассажиров исследуемых типовых маршрутов движения транспортных средств. В регистрационной анкете первого типа статист фиксирует фактическую количественную информацию о каждом пассажире, появляющемся на OST_r . Этой информацией является: наполняемость подвижного состава (H); время посадки и высадки пассажиров (t_{ex} и $t_{вых}$) из транспортного средства на остановке; количество вышедших (n_i) и вошедших (n_j)

пассажиров; интервалы времени между приходами транспортных средств на OST_r ($t_{\text{движ}}$). В анкете второго типа фиксируется информация о целях использования ГТС пассажирами, пришедшими на OST_r , которая по своей сути отражает качественные характеристики каждого элемента пассажиропотока на OST_r . В этой анкете фиксируются следующие данные: номер OST_r , являющейся местом пересадки k -го пассажира; номер OST_r , являющейся пунктом начала движения k -го пассажира; номер OST_r , являющейся местом пересадки k -го пассажира с данного маршрута на другой номер маршрута движения; тип социальной группы населения (SOGRi), к которой относит себя пассажир (рабочий, служащий, учащийся, остальные типы пассажиров на ГТС).

Результаты анкетирования, полученные в ходе НЭ статистиками, в конце суточного цикла исследования ГТМС заносятся в базу данных (БД) программы анализа результатов анкетирования в ходе НЭ (ПАРАН).

2. Программы анализа результатов анкетирования

Программа ПАРАН формирует первичную статистику о составе и структуре пассажиропотоков в исследуемой ГТМС. По этой первичной статистике можно проводить экспресс-анализ текущей ситуации в ГТС на время проведения НЭ, а также получать исходную информацию для построения ИМ рабочей нагрузки (РН) ан ИМ ГТС. С помощью ПАРАН фиксируют: гистограммы распределения количества пассажиров на остановочных пунктах в течение заданных исследователем часов суток $F_1(v)$; гистограммы вошедших $F_2(v_i)$ и вышедших $F_3(v_j)$ пассажиров по всем OST_r (для выбранных срезов времени и изучения динамики их изменения во времени); связь длительности времени стоянки транспортного средства (t_{cm}) при пассажирообмене на OST_r ; коэффициент пересадочности пассажиров на другие маршруты (k_{nep}), характерные места OST_r пересадок; главные направления пассажиропотоков для различных периодов времени; социальный состав пассажиропотока (SOGR_F) по OST_r и изменение его структуры в течение суток; распределение вероятностей появления определенной группы населения по часам суток и по OST_r (P_{OST}); общее количество перевезенных пассажиров на маршруте (N_{nep}); общее количество пассажиров на остановочных пунктах по часам суток (N_t); средняя длина поездки на маршруте (l_{cp}); средняя скорость сообщения между отдельными OST_r (V_{cpi}) и общая скорость для всего маршрута (v_{cp}); количество перевезенных пассажиров при заданной скорости движения (ω).

Для формирования вторичной статистики требуется углубленное изучение структуры города: мест приложения труда, зоны проживания населения, мест отдыха. С помощью этой статистики можно получить информацию о том, как необходимо изменить направление основных маршрутов, исходя из данных об основных направлениях пассажиропотоков, что позволит уменьшить количество пересадок и разгрузить OST_r в часы пиковых нагрузок пассажиров. Можно также построить распределения пассажиров по OST_r в зависимости от расположения зон проживания населения, мест приложения труда для корректировки ситуации путем подачи транспортных средств на OST_r в зависимости от их заполнения пассажирами.

Технология анализа результатов анкетирования, полученных с помощью ПАРАН в ходе НЭ на ГТС, реализуется следующими этапами:

Этап 1. Обработка анкет и формирование первичной статистики о поведении пассажиропотока и использовании транспортных средств в ГТС.

Этап 2. Формирование вторичной статистики о структуре и составе пассажиропотока.

Этап 3. Определение откликов пассивного НЭ и нахождение обобщенных показателей качества реализации в ГТС.

Этап 4. Анализ откликов и определение узких мест исследования в ГТС.

3. Метод имитационного моделирования ГТС по данным натурального эксперимента

При реализации метода исследователь должен реализовать следующие этапы разработки:

1. Формализация РН (осуществляется один раз разработчиком ИМ ГТС)
2. Мониторинг ГТС для определения параметров РН для построения ИМ ГТС (осуществляется периодически службами ГТС)
3. Формирование инвариантов РН для формирования ИМ ГТС по данным НЭ (осуществляется периодически службами ГТС при “запитке” ИМ ГТС)

На **этапе 1** РН формализуется последовательностью шагов. На *шаге 1.1* РН формализуется на уровне функционирования пассажиров $PASS_{ri}$. На *шаге 1.2* РН формализуется на уровне функционирования остановок OST_{rj} . На *шаге 1.3* РН формализуется на уровне функционирования транспортных средств $TRSR_{jk}$. На *шаге 1.4* РН формируется на уровне функционирования всей ГТС, состоящей из множеств $\{PASS_i\}$, $\{OST_{rj}\}$, $\{TRSR_{jk}\}$, $\{MLIN_j\}$.

На **этапе 2** осуществляется мониторинг ГТС для определения параметров РН и построения ИМ ГТС с помощью результатов, полученных системой мониторинга. Этап реализуется следующей последовательностью шагов. На *шаге 2.1* выполняются НЭ на транспортной маршрутной сети по специальной методике проведения мониторинга, в ходе которых собирается статистика поведения будущих компонентов ИМ ГТС в виде множеств $\{PASS_i\}$, $\{OST_{rj}\}$, $\{TRSR_{jk}\}$, $\{SV_l\}$. На *шаге 2.2* формируется статистика поведения пассажиров $PASS_i$, светофоров SV_l и транспортных средств $TRSR_{jk}$. На *шаге 2.3* оценивается пропускная способность транспортной сети, исходя из следующих критериев: наиболее загруженные и недоиспользованные по пассажиропотоку маршрутные транспортные линии.

На **этапе 3** формируются инварианты РН для создания ИМ ГТС. При выполнении *шага 3.1* по исходной статистике измерения реальной нагрузки определение инвариантов функционирования пассажиров $PASS_{ri}$ и формируются модели РН, используемой в генератор транзактов $GENER_{ri}$ ИМ ГТС. При выполнении *шага 3.2* по исходной статистике измерения реальной нагрузки определяются статистики загрузки реальных остановок OST_{rj} . На *шаге 3.3* по исходной статистике измерения реальной нагрузки определяются инварианты транспортных средств $TRSR_{jk}$, различающиеся максимальной вместимостью салона. Для всех интервалов $\tau(\xi)$ формируется на каждом $MLIN_j$ интенсивность выхода на линию ГТС множеств транспортных средств $TRSR_{jk}(\eta_j(\xi))$.

4. Испытание имитационной модели

Верификация имитационной модели ГТС по данным натурального эксперимента. При этом определяются исходные данные для “запитки” в ИМ ГТС: средняя скорость движения транспортных средств между остановками маршрутов $V_{движ}$, частота поступления пассажиров на остановки $\lambda_{пасс}$, Частота выпуска транспорта на линию $\omega_{трансп}$. Верификация имитационной модели ГТС по данным натурального эксперимента состоит из последовательности проверок того, что средние значения: времени, проведенного всеми пассажирами в ГТС (τ_i); времени движения транспорта между остановками ($\tau_{трансп}$); наполнения салона между остановками (H_i); времени ожидания транспорта на остановках ($\tau_{ож}$); времени посадки и высадки ($\tau_{пос}$ и $\tau_{выс}$) с точностью до ошибки ε_i (определяемой процедурой усреднения по методике Монте-Карло) близки к их ожидаемым значениям. Согласно процедуры Монте-Карло по каждой выборке $\{ST_{jh}\}$, $h = \overline{1, N}$ формируются оценки математического ожидания $M_{ST_{jh}}$ и дисперсия изменения статистики $S_{ST_{jh}}^2$ для h-го варианта ИЭ. Как известно из [1], любая **верификация ИМ** состоит в доказательстве утверждений соответствия алгоритма ИМ реальному функционированию ИМ ГТС путем формальных и неформальных исследований реализованных программ ИМ ГТС. Неформальные исследования включают в себя ряд процедур проверки выполненных в ходе комплексной отладки алгоритмов компонентов ИМ ГТС. При имитации ГТС формальные методы осуществляются по технологиям использования базовой СМ МІСІС. **Испытание вариантов** ИМ ГТС реализуется следующей последовательностью процедур: оценки точности, проверки устойчивости алгоритмов имитации, анализа стационарности режимов работы ИМ ГТС, оценка чувствительности откликов ИМ ГТС к вариаци-

ям параметров модели. Отметим, что любая ИМ в принципе не точна за счет наличия ошибок аппроксимации реальных ГТС. Как известно, к общей ошибке имитации добавляются еще ошибки, появляющиеся за счет вероятностного характера процедур розыгрыша конкретных значений параметров маршрутных карт транзактов MKi и поступления пассажиров в транспортные средства на OST_r . Эти два типа ошибок трудно разделить, и поэтому мы вынуждены рассчитывать

Проверка адекватности имитационной модели ГТС по данным натурального эксперимента. Проверяем гипотезу о близости средних значений откликов модели (время, затрачиваемое транспортными средствами при проезде между остановками (t_{tr}); среднее наполнение салона транспортного средства между остановками (H); суммарные и средние потери времени пассажирами на ожидание транспорта на остановках ($t_{ож}$); среднее время входа и выхода пассажиров в транспортные средства на каждом из маршрутов ($t_{вх}$ и $t_{вых}$) известным средним значениям откликов реальной системы. Выполняем $N_1=2$ опытов на реальной ГТС по каждой компоненте вектора откликов $\{Y_{nk}^*\}$ и $N_2=5$ опытов на ИМ ГТС, получая по тем же откликам модели выборки значений $\{Y_{nk}\}$. По выборкам вычисляем оценки математических ожиданий и дисперсии откликов модели и системы с помощью соотношений

$$\bar{Y}_n = \frac{1}{N_2} \sum_{k=1}^{N_2} Y_{nk}; D_n = \frac{1}{N_2 - 1} \sum_{k=1}^{N_2} (Y_{nk} - \bar{Y}_n)^2;$$

$$\bar{Y}_n^* = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} Y_{nk}^*; D_n^* = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{k=1}^{N_1} (Y_{nk}^* - \bar{Y}_n^*)^2$$

Основой проверки гипотезы является разность $E_n = \bar{Y}_n - \bar{Y}_n^*$ оценкой дисперсии которой будет $D_{pn} = \frac{(N_1 - 1) \cdot D_n + (N_2 - 1) \cdot D_n^*}{N_1 + N_2 - 1}$.

Величины $\bar{Y}_n - \bar{Y}_n^*$ и D_{pn} являются статистически независимыми, поэтому можно использовать t -статистику

$$t_n = (\bar{Y}_n - \bar{Y}_n^*) \sqrt{\frac{N_1 \cdot N_2}{(N_1 + N_2) \cdot D_{pn}}}$$

Воспользуемся таблицей распределения t -статистики с числом степеней свободы $N_1 + N_2 - 1$ и уровнем значимости $\alpha=0,05$. Если выполняется неравенство $t_n \leq t_{кр}$, то гипотеза о близости средних значений откликов модели и системы принимается. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1– Результаты расчета проверки адекватности

Название отклика	данные реальной системы		данные ИМ ГТС		t_n	$t_{\alpha, \nu}$
	\bar{Y}_n	D_n	\bar{Y}_n^*	D_n^*		
время, затрачиваемое транспортными средствами при проезде между остановками (t_{tr})	5	51	5,118	20,09	0,03	2,015
среднее наполнение салона транспортного средства между остановками (H)	19	96,3	18	49,7	0,17	2,015

суммарные и средние потери времени пассажирами на ожидание транспорта на остановках ($t_{ож}$)	10,3	240	8	190,23	0,21	2,015
среднее время входа и выхода пассажиров в транспортные средства на каждом из маршрутов ($t_{вх}$ и $t_{вых}$)	2,8	36	3,27	18,32	0,131	2,015

Abstract. Methods of designing full-scale experiments on city transport network are considered in the article.

Литература

1. Максимей, И. В. Задачи и модели исследования операций. Ч.3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: Учебное пособие / И. В. Максимей [и др.] // Гомель: БелГУТ, 1999. – 150 с.
2. Левчук, В.Д. Система моделирования МІСІС / В. Д. Левчук // Вопросы экономики и организации информационных технологий. – Гомель, 1991. – С. 66–69.

Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины

Поступило 17.04.07