

*М. С. Турпищева*

**РАЗРАБОТКА ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК  
МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*M. S. Turpishcheva*

**DEVELOPMENT OF A LOGISTIC MODEL  
OF PASSENGER TRANSPORTATION  
BY MEANS OF SIMULATION TECHNIQUES**

Рассмотрены методы моделирования транспортных систем для определения основных показателей с целью обеспечения качества пассажирских перевозок. Предполагаемая математическая модель позволяет получать реализации процессов перевозки. Их анализ на выходе программы дает возможность определить показатели моделируемой системы. Натурные испытания, проведенные авторами, подтвердили адекватность модели. Дальнейшие исследования позволят расширить объектную базу, уточнить параметры и разработать систему управления транспортными процессами пассажироперевозок.

**Ключевые слова:** логистические модели, математическое моделирование, дорожное движение.

Methods of transport systems modeling are considered in order to identify main indicators to ensure the quality of passenger transportation. The proposed mathematical model allows the implementation of transportation processes. Their analysis at the exit of the program makes it possible to determine the indicators of a modeling system. Full-scale tests, conducted by the authors, have confirmed the adequacy of the model. Further research will enable to enhance an object database, specify the parameters and to develop a control system of passenger transportation.

**Key words:** logistic models, mathematical modeling, traffic.

Моделирование пассажирских потоков сопряжено со значительными трудностями, вызываемыми спецификой объекта исследования (в частности, стихийность подхода и накопления пассажирских потоков, подверженность влиянию климатических, сезонных, временных и других внешних факторов).

Имитационное моделирование позволяет достаточно быстро и с высокой точностью прогнозировать характеристики реальной транспортной системы в зависимости от задания требуемого количества факторов внешней среды, оказывающих влияние на систему, а также оптимизировать данную транспортную систему путем подбора соответствующих параметров (как наиболее простой пример – увеличение (уменьшение) количества маршрутных транспортных средств на линии).

Объектная схема процессов представляет собой маршрут пассажирского транспорта или систему маршрутов и остановочных комплексов, а ресурсы модели – транспортные системы, базирующиеся на автобусах малой и средней вместимости, и пассажиропотоки, поступающие на остановки для посадки в автобусы.

Для разработки имитационной модели, описывающей транспортную сеть на микроуровне, предлагается использовать пакет AnyLogic 5.4.1 в качестве одного из средств имитационного моделирования разнообразных систем и процессов. AnyLogic использует язык моделирования UML (Unified Modeling Language) и может быть адаптирован к изучению и оптимизации транспортных потоков.

Математическое описание совместного движения автобусов и поведения пассажиров как объектов, взаимозависящих друг от друга, для фрагмента маршрутной сети – конкретного маршрута – базируется на следующих параметрах:  $L_\alpha$  – расстояние между остановками  $(\alpha - 1)$  и  $\alpha$ ;  $t_\alpha$  – время прохождения перегона (участка между остановочными комплексами),  $\alpha$  – текущий номер остановки посадки  $\alpha = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  – число остановок;  $\gamma$  – текущий номер остановки вы-

хода  $\gamma > \alpha$ ;  $\sigma$  – текущий номер предыдущих остановок  $\sigma < \alpha$ ;  $n$  – текущий номер автобуса,  $n = 1, 2, 3, \dots, k$ ,  $k$  – число автобусов на маршруте;  $\beta_{\alpha, \gamma}$  – матрица интенсивности подхода пассажиров на остановку  $\alpha$ , для выхода на остановке  $\gamma$  ( $\gamma > \alpha$ ),  $S_{(\alpha-1), \gamma}^n$  – число пассажиров, севших на остановке  $(\alpha - 1)$  в автобус  $n$ , чтобы доехать до остановки  $\gamma$  ( $\gamma > (\alpha - 1)$ );  $T_{\alpha}^n, T_{\alpha-1}^n$  – время прихода автобуса  $n$  на остановки  $\alpha$  и  $(\alpha - 1)$  соответственно;  $\Delta_{\alpha-1}^n$  – временной интервал посадки пассажиров на остановке  $(\alpha - 1)$ ;  $H_{\alpha, \gamma}^n$  – наполняемость автобуса, пришедшего на остановку  $\alpha$  ( $\gamma > \alpha$ ), пассажирами, едущими до остановки  $\gamma$ .

Время начала движения каждого последующего автобуса  $(n + 1)$  из начального пункта

$$T_0^{n+1} = T_0^n + \tau_0, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  – начальный временной интервал между выходами автобусов  $n$  и  $(n + 1)$  на маршрут.

Задержки автобусов при посадке – высадке пассажиров  $\Delta$  зависят от количества выходящих  $B$  и садящихся  $S$  пассажиров. Для автобусов малой вместимости величину  $\Delta$  можно принять

$$\Delta = c_B B + c_S S, \quad (2)$$

где  $c_B, c_S$  – соответственно время на высадку и посадку одного пассажира.

Число пассажиров на остановке  $\alpha$  к приходу автобуса  $n$

$$\Pi_{\alpha}^n = \int_{\tau_{\alpha}^n} \beta_{\alpha} dt, \quad (3)$$

где  $\tau_{\alpha}^n$  – интервал времени между приходами автобусов  $n$  и  $(n - 1)$  на остановку  $\alpha$ ,

$$\tau_{\alpha}^n = T_{\alpha}^n - T_{\alpha}^{n-1}; \quad (4)$$

$\beta_{\alpha}$  – функция интенсивности прихода пассажиров на остановку  $\alpha$ , пас./мин;  $T_{\alpha}^{n-1}, T_{\alpha}^n$  – время прихода автобусов  $(n - 1)$  и  $n$  на остановку  $\alpha$  [1].

Число пассажиров, пришедших на остановку  $\alpha$ , чтобы доехать до остановки  $\gamma$ , к моменту подхода автобуса  $n$

$$\Pi_{\alpha, \gamma(\gamma > \alpha)}^n = \int_{\tau_{\alpha}^n} \beta_{\alpha, \gamma} dt. \quad (5)$$

В случае, если  $\beta_{\alpha, \gamma} = \text{const}$ , то  $\Pi_{\alpha, \gamma} = \beta_{\alpha, \gamma} \cdot \tau_{\alpha}^n$ , а общее число пассажиров, пришедших на остановку  $\alpha$  к автобусу  $n$ ,

$$\Pi_{\alpha}^n = \sum_{\gamma > \alpha} \Pi_{\alpha, \gamma}^n = \tau_{\alpha}^n \sum_{\gamma > \alpha} \beta_{\alpha, \gamma}. \quad (6)$$

Связанное движение автобусов и пассажиров может быть описано системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_{\alpha}^n &= T_{\alpha-1}^n + \Delta_{\alpha-1}^n + t_{\alpha}, \\ H_{\alpha, \gamma}^n &= H_{(\alpha-1), \gamma}^n + S_{(\alpha-1), \gamma}^n, \\ \Pi_{\alpha, \gamma}^n &= (\Pi_{\alpha, \gamma}^{n-1} - S_{\alpha, \gamma}^{n-1}) + \beta_{\alpha, \gamma} \cdot \tau_{\alpha}^n, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $T_{\alpha}^n, T_{\alpha-1}^n$  – время прихода автобуса  $n$  на остановки  $\alpha$  и  $(\alpha - 1)$  соответственно;  $\Delta_{\alpha-1}^n$  – временной интервал посадки пассажиров на остановке  $(\alpha - 1)$ ;  $H_{\alpha, \gamma}^n$  – наполняемость автобуса, пришедшего на остановку  $\alpha$  ( $\gamma > \alpha$ ), пассажирами, едущими до остановки  $\gamma$ .

Уравнения связки между функциями, входящими в систему (7):

$$\Delta_{\alpha-1}^n = c_B \cdot B_{(\alpha-1)}^n + c_S \cdot S_{(\alpha-1)}^n;$$

$$S_{(\alpha-1)}^n = \sum_{\gamma>\alpha} S_{(\alpha-1),\gamma}^n.$$

Для маршрутных такси  $S_{(\alpha-1)}^n = \left\{ \begin{array}{l} \Pi_{\alpha}^n \text{ при } \Pi_{\alpha}^n < (13 - H_{\alpha}^n), \\ (13 - H_{\alpha}^n) \text{ при } \Pi_{\alpha}^n \geq (13 - H_{\alpha}^n), \end{array} \right\}$

$$H_{\alpha}^n = \sum_{\gamma>\alpha} H_{\alpha,\gamma}^n;$$

$$\Pi_{\alpha}^n = \tau_{\alpha}^n \cdot \sum_{\gamma>\alpha} \beta_{\alpha,\gamma};$$

$$B_{(\alpha-1)}^n = \sum S_{\sigma,\alpha}^n. \tag{8}$$

Для примера кольцевого маршрута ( $n = 6$ ) матрица интенсивности имеет вид

$$\beta_{\alpha,\gamma} = \begin{array}{c} \gamma>\alpha \\ \left| \begin{array}{cccccc} \beta_{12} & \beta_{13} & \beta_{14} & \beta_{15} & \beta_{16} \\ & \beta_{23} & \beta_{24} & \beta_{25} & \beta_{26} \\ & & \beta_{34} & \beta_{35} & \beta_{36} \\ & & & \beta_{45} & \beta_{46} \\ & & & & \beta_{56} \end{array} \right| \end{array}. \tag{9}$$

Для решения системы рекуррентных уравнений (7) с учетом уравнений связки (8) необходимо задать параметры:  $c_S, c_B$ , вектор-столбцы  $\nu_{\alpha}, L_{\alpha}$ , матрицу  $\beta_{\alpha,\gamma}$  для получения функций  $T_{\alpha}^n, H_{\alpha}^n, \Pi_{\alpha}^n$

На основании найденных функций могут быть получены значения:  $\tau_{\alpha}^n$  – интервалы между автобусами ( $n$ ) и ( $n - 1$ ) на каждой остановке;  $H_{\alpha}^n = \sum_{\gamma>\alpha} H_{\alpha,\gamma}^n$  – наполняемость автобусов между остановками;  $\Pi_{\alpha}^n = \sum_{\gamma>\alpha} \Pi_{\alpha,\gamma}^n$  – число ожидающих автобуса  $n$  на остановке  $\alpha$ .

Идеальный случай движения по расписанию, т. е. случай соблюдения условия надежности перевозки, возможен при соблюдении регламентируемого интервала  $\tau_{\alpha}^n$ .

Отклонения от него объясняются отклонением скорости  $v$  от средней номинальной, вариативностью интенсивности подхода пассажиров на остановку  $\beta_{\alpha,\gamma}$  и возможными непредвиденными задержками автобуса.

Изучение предпочтений пассажиров на остановках показало, что число ожидающих пассажиров  $\Pi_{\alpha,\gamma}$  можно описать экспоненциальным законом с интенсивностью притока  $\beta_{\alpha}$  [2].

Величины  $\beta_{\alpha,\gamma}$  различны для разных остановок, они зависят от множества факторов: временных (времена года, дни недели, время суток), другого рода (климатические, социальные, в частности удаленность от центров тяготения, таких как районные центры и пр.). Значения  $\beta_{\alpha,\gamma}$  принимаются на основании данных обследований пассажиропотоков, проведенных для данного остановочного пункта как минимум четыре раза в год [3].

В первом приближении при создании модели число выходящих из автобусов пассажиров и время стоянки автобусов на остановках описываются треугольным законом.

Библиотека элементов предлагаемой имитационной модели транспортной сети содержит следующие элементы: парк (генератор/приемник) маршрутных транспортных средств, участок дороги, остановочные комплексы [4].

Этих элементов достаточно для построения простейшего обособленного маршрута транспортной сети.

Каждый из данных элементов обладает варьируемыми характеристиками, определяющими наиболее критичные свойства объектов.

На рис. 1 представлена структура имитационной модели.

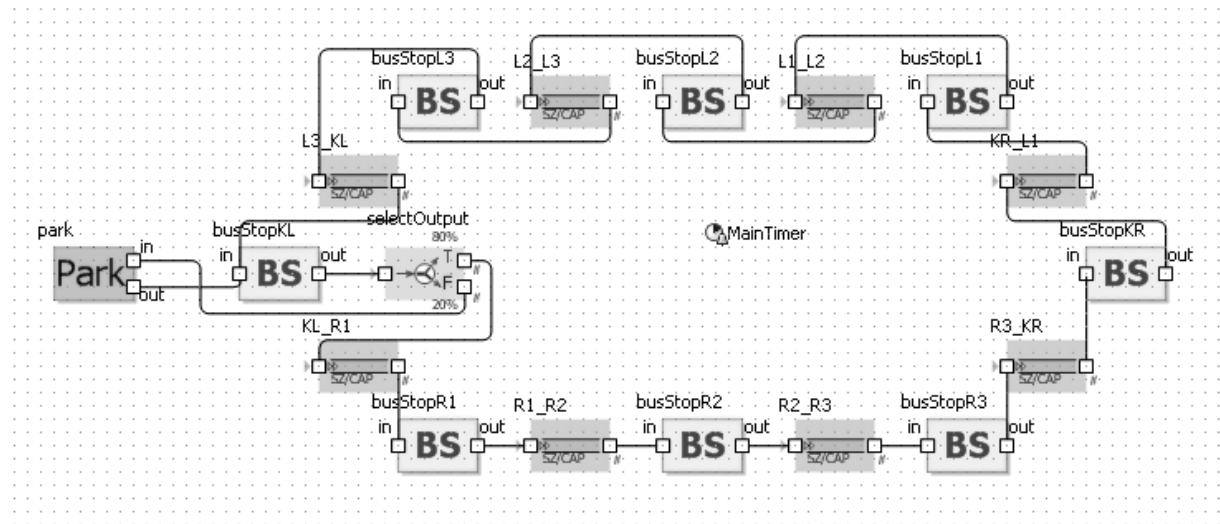


Рис. 1. Структура фрагмента имитационной модели

Задачей моделирования данного маршрута является определение параметров выходного процесса для управления пассажирскими перевозками.

В общем случае, после выхода транспортных средств из депо «Park» на линию, осуществляется перевозка пассажиров (заявки которых генерируются с заданной интенсивностью) между остановками «BS» (busStopXX) по связующему участку дороги (ветка «Right» – Rx\_Rx – прямое направление, ветка «Left» – Lx\_Lx – обратное).

Входными и выходными портами являются порты «in» и «out» соответственно. Через порт «in» маршрутные транспортные средства доставляют на остановочные комплексы «BS» пассажиров, а через порт «out» уходят с наполненным салоном.

В объекте «selectOutput» определяется тип сообщения (является ли оно заявкой). Соответствующая визуализация представлена на рис. 2.

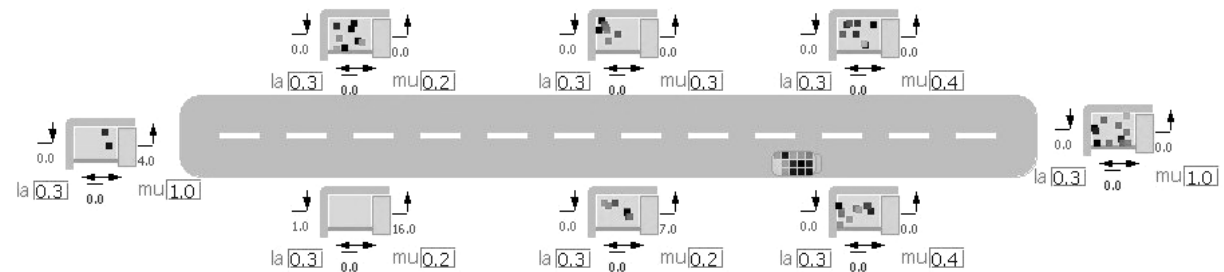


Рис. 2. Схема имитационной модели движения пассажиров и автобусов

Здесь  $la$ ,  $\mu$ ,  $d$  – случайные величины, задаваемые автоматически для получения количества приходящих на каждую остановку пассажиров, количества выходящих из каждого автобуса пассажиров и времени стоянки каждого автобуса на каждой остановке соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Регирер С. А., Шаповалов Д. С.* Заполнение пассажирами пространства в общественном транспорте // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 8. – С. 111–121.
2. *Блинкин М. Я., Гуревич Г. А.* Модифицированная схема Зильберталя: построение, анализ, применение // Совершенствование перевозок пассажиров автомобильным транспортом: сб. тр. Гос. НИИ автомобильного транспорта (НИИАТ). – 1981. – Вып. 5. – С. 16–32.
3. *Нургалиев Е. Р.* Имитационное моделирование пассажиропотоков при помощи программного продукта ANYLOGIC с целью повышения качества пассажироперевозок // Наука: поиск-2009: сб. науч. ст. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2009. – С. 223–227.
4. *Турпищева М. С., Нургалиев Е. Р.* Моделирование системы организации пассажироперевозок с целью повышения ее надежности // Материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. «Политранспортные системы», Новосибирск, 22 апреля 2009 года. – Новосибирск, 2009. – С. 295–298.

Статья поступила в редакцию 2.06.2011

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

**Турпищева Марина Семёновна** – Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; профессор кафедры «Погрузочно-транспортные машины, производственная логистика и механика машин»; [ctl@astu.org](mailto:ctl@astu.org).

**Turpishcheva Marina Semenovna** – Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Science, Assistant Professor; Professor of the Department "Pick-and-Place Devices, Industrial Logistics and Mechanics of Machines"; [ctl@astu.org](mailto:ctl@astu.org).