



АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПАССАЖИРОПОТОКОВ В ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛАХ

Т. Р. Сигина, С. В. Уголков

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Моделирование играет ключевую роль в исследовании сложных систем, включая пассажиропоток. Создание моделей позволяет анализировать систему и разрабатывать высококачественные модели для ее эксплуатации. В процессе моделирования можно отобразить процессы функционирования системы и описать ее текущее состояние.

Особенностью моделирования является возможность оценки работоспособности как существующего, так и потенциального объекта. Моделирование пассажирских потоков является неотъемлемой частью подготовки проектных решений. Математические модели позволяют описать транспортные процессы, происходящие в транспортно-пересадочных узлах, и прогнозировать потоки пассажиров. Основная цель таких моделей заключается в определении и прогнозировании параметров функционирования транспортной системы, учитывая качество осуществляемых транспортных процессов.

В данной статье представлен анализ моделей пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах, рассмотрены их преимущества и недостатки, рассмотрены формы представления моделей, а также несколько программных пакетов, применяемых при моделировании транспортных объектов.

Ключевые слова: модели транспортного потока, классификация моделей транспортного потока, макроэкономические модели, микроэкономические модели, мезоэкономические модели.

Для цитирования:

Сигина, Т. Р. Анализ моделей пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах / Т. Р. Сигина, С. В. Уголков // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 2(40). – с. 65 – 72. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-2-65-72.

ANALYSIS OF PASSENGER FLOW MODELS IN TRANSPORTATION JOINTS

T. R. Sigina, S. V. Ugolkov

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Modeling plays a key role in the study of complex systems, including passenger flow. Modeling allows you to analyze a system and develop high-quality models for its operation. During the modeling process, it is possible to display the functioning processes of the system and describe its current state.

A feature of modeling is the ability to assess the performance of both an existing and potential object. Modeling passenger flows is an integral part of preparing design solutions. Mathematical models make it possible to describe transport processes occurring at transport hubs and predict passenger flows. The main goal of such models is to determine and predict the parameters of the functioning of the transport system, taking into account the quality of the transport processes being carried out.

This article presents an analysis of models of passenger flows in transport hubs, discusses their advantages and disadvantages, considers the forms of presentation of models, as well as several software packages used in modeling transport facilities.

Keywords: traffic flow models, classification of traffic flow models, macroscopic models, microscopic models, mesoscopic models.

For citation:

Sigina, T. R. Analysis of passenger flow models in transportation joints / T. R. Sigina, S. V. Ugolkov // System analysis and logistics. – 2024. – № 2(40). – p. 65 – 72. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-2-65-72.

Введение

Для транспортных сетей крупных городских агломераций, которые обеспечивают перемещение пассажиров, характерны ограниченные пропускные и провозные возможности. Поэтому одной из ключевых задач становится оптимизация взаимодействия различных видов транспорта и улучшение технологических процессов функционирования их составных элементов. Транспортно-пересадочные узлы (ТПУ), как места соприкосновения различных транспортных систем, играют важную роль в этом взаимодействии. Решение таких проблем связано не только с использованием информации о текущем состоянии транспортной системы



для оперативного управления в режиме реального времени, но и с прогнозированием развития транспортной ситуации на будущий период. На сегодняшний день выбор параметров для создания или развития ТПУ требует учета их технических и технологических возможностей на основе анализа моделей пассажиропотоков, что позволяет получить прогнозы их развития.

Моделирование пассажиропотоков является неотъемлемой частью процесса подготовки предпроектных и проектных решений. Создание имитационной модели движения пассажиров обязательно при проектировании различных объектов, таких как аэропорты, железнодорожные и автобусные вокзалы, спортивные комплексы, торговые центры, парковки и прочее.

Анализ моделей пассажиропотоков в транспортно-пересадочных узлах

Транспортно-пересадочный узел (ТПУ) представляет собой комплекс пассажирских систем различных видов транспорта, где функционирование связано с перемещением пассажиров между его отдельными элементами. Эффективность работы ТПУ в значительной степени зависит от того, насколько хорошо организованы транспортные процессы внутри него и взаимодействие его компонентов.

Математические модели позволяют описать транспортные процессы, происходящие в ТПУ, и прогнозировать потоки пассажиров. Основная цель таких моделей заключается в определении и прогнозировании параметров функционирования транспортной системы, учитывая качество осуществляемых транспортных процессов.

Математические модели, применяемые для изучения транспортных систем, представляют собой широкий спектр по своему математическому аппарату, используемым данным и уровню детализации описания движения пассажиропотоков.

Классически в сфере теории и практики моделирования транспортных процессов по уровню детализации модели пешеходных потоков делят на:

- микроскопические, которые учитывают поведение каждого пешехода отдельно
- мезоскопические, учитывающие поведение отдельного пешехода, но с целью определения характеристик потока или его закона распределения
- макроскопические, которые описывают поток в терминах скорости, плотности, без учета поведения отдельных индивидуумов.

Модели транспортных потоков приведены на рисунке 1.



Рис. 1. Модели транспортных потоков

Во многих моделях использовались физические законы для моделирования движения



пешеходов, сводя их перемещение к движению элементарных частиц. В газокинетической модели движение пешеходов рассматривается как движение молекул в разреженном газе. Точная скорость и положение пешеходов-молекул неизвестны, но известно распределение частиц, исходя из уравнения Больцмана, рис 2.

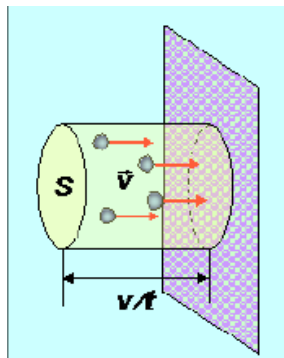


Рис. 2. Схематичный алгоритм работы газокинетической модели

Удобным аппаратом для реализации микроскопических моделей оказались клеточные автоматы – пространство представляется сеткой, в каждой ячейке которой может поместиться только один пешеход, движение моделируется за счет перехода пешеходов между клетками по определенным правилам. Поток объектов рассматривается как случайный процесс перемещения дискретного множества частиц, рис. 3.

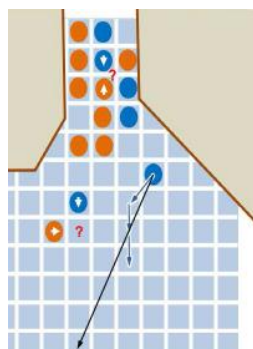


Рис. 3. Схематичный алгоритм работы модели-клеточные автоматы

Мезоскопическая модель транспортного потока, основанная на идее гравитационной модели, может быть применена для анализа движения и взаимодействия транспортных средств на мезоскопическом уровне. Гравитационная модель в контексте транспортных потоков использует аналогию с законом всемирного тяготения, чтобы предсказать интенсивность перемещений между двумя точками в системе транспортной сети.

Формула для гравитационной модели транспортного потока может быть записана следующим образом:

$$T_{ij} = K \cdot \frac{P_i \cdot P_j}{D_{ij}} \quad (1)$$

Где T_{ij} – интенсивность потока между точками i и j ;

K – коэффициент пропорциональности (обычно выбирается для соответствия общему объему транспортного потока);

P_i и P_j – аттрактивности (например, численность населения, экономическая активность) точек i и j ;

D_{ij} – расстояние между точками i и j .



На графике показано изменение интенсивности транспортного потока в зависимости от расстояния между точками для разных комбинаций аттрактивности точек.

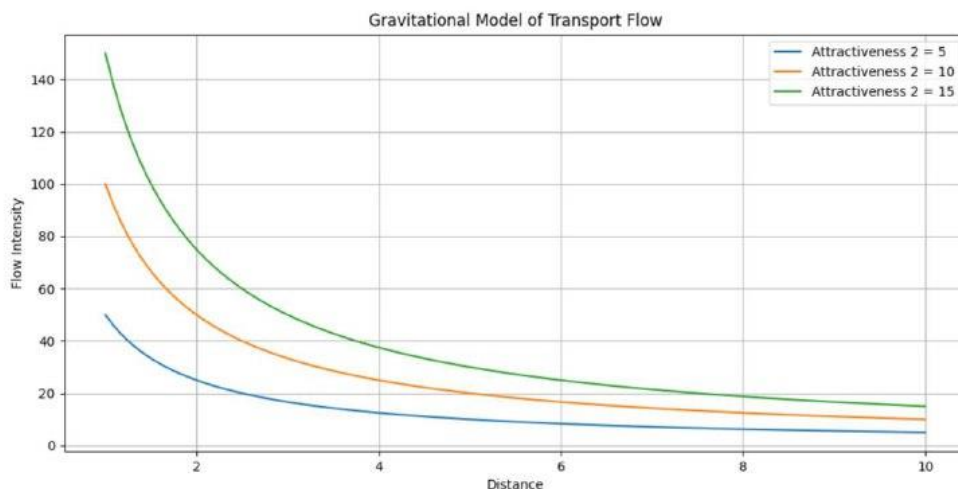


Рис. 4. Гравитационная модель транспортного потока

Описание моделей с преимуществами и недостатками сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Описание моделей

Модели	Описание	Преимущества	Недостатки
Макроскопические	описывают потоки транспортных средств на уровне сегментов, таких как дороги, маршруты или районы. Они обычно игнорируют детали индивидуального поведения транспортных средств и пассажиров. Модель формируется путем определения плотности потока, средней скорости и интенсивности движения	низкие требования к вычислительным ресурсам при высокой скорости	статичность результатов и относительно низкая точность расчетов
Мезоскопические	находятся на промежуточном уровне между макро- и микромоделями и являются их комбинированием. Здесь определяется поведение каждой транспортной единицы, но при этом их взаимодействие рассматривается на макроскопическом уровне	Преимущество этих моделей заключается в их относительной компактности	обладают более ограниченным набором настраиваемых параметров по сравнению с другими моделями, и практически не учитывают динамику корреспонденций, что ограничивает их применимость в некоторых задачах
Микроскопические	учитывают индивидуальное поведение транспортных средств и пассажиров, что позволяет более детально моделировать движение на уровне отдельных транспортных средств. Они используются для более точного моделирования движения на дорогах, включая учет факторов, таких как изменение полосы, взаимодействие между транспортными средствами и т. д.	позволяют создавать модели с многополосными дорогами, так как воспроизведение движения автомобилей достаточно реалистично и соответствует реальным условиям. Другим преимуществом является высокая точность получаемых результатов.	обладают недостатком в высоком потреблении ресурсов вычислительной техники, что может быть проблематично при моделировании значительных участков транспортной системы. Кроме того, высокая степень детализации требует обширных наборов исходных данных.



Методы, техники и средства, которые мы используем для описания и визуализации моделей транспортных потоков, составляют их форму представления. Форма представления модели показана на рисунке 5.

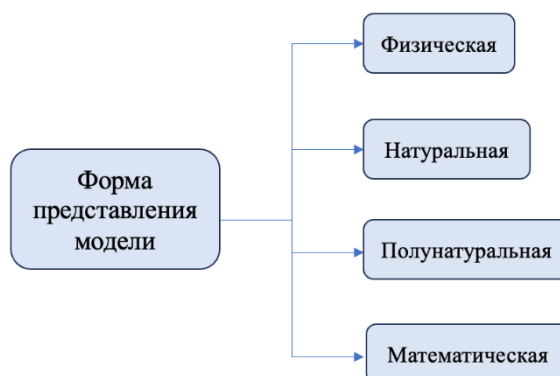


Рис. 5. Форма представления модели

Физический метод предполагает создание модели объекта на основе его характеристик, полученных в результате реальных испытаний.

Натурный метод подразумевает исследования, проводимые на реальном объекте в определенных условиях, что обеспечивает максимальное сходство полученной модели с исходным объектом.

Полунатурный метод включает моделирование одной части объекта математически, а другой части – с использованием специализированного испытательного стенда.

Математическое моделирование – это идеальное научное знаковое формальное моделирование, при котором описание объекта осуществляется на языке математики, а исследование модели проводится с использованием тех или иных математических методов. Существует два основных типа математического моделирования: аналитическое и имитационное.

Аналитическое моделирование представляет собой метод исследования, при котором логистическая система анализируется с помощью математических приемов. При использовании этого подхода формулируются и записываются характеристики системы, а также устанавливаются взаимосвязи и влияние параметров друг на друга. При правильном внесении начальных данных этот метод обеспечивает точные результаты. Применение аналитического метода оправдано в случае, когда система относительно проста или когда отсутствуют случайные параметры, влияющие на деятельность организации.

Имитационное моделирование включает в себя несколько этапов, которые обычно включают в себя следующие шаги:

1) Определение целей и задач:

На этом этапе определяются цели моделирования и задачи, которые необходимо решить. Это может включать в себя определение конкретных аспектов системы, которые требуется исследовать, а также определение вопросов, на которые необходимо ответить.

2) Формулирование модели:

На этом этапе разрабатывается структура модели, включая определение переменных, параметров и взаимосвязей между компонентами системы. Это может включать в себя выбор типа модели, определение правил поведения и установление начальных условий.

3) Разработка программы моделирования:

После формулирования модели разрабатывается компьютерная программа или алгоритм, который реализует эту модель. Программа должна быть способна имитировать поведение системы во времени и обрабатывать входные данные и параметры модели.



4) Верификация и валидация модели:

После разработки программы моделирования модель должна пройти процесс верификации и валидации, чтобы убедиться в ее правильности и достоверности. Верификация заключается в проверке того, что программа моделирует систему правильно, а валидация - в сравнении результатов моделирования с реальными данными или ожидаемыми результатами.

5) Эксперименты и анализ результатов:

После верификации и валидации модели проводятся эксперименты, в ходе которых модель запускается с различными входными данными и параметрами, чтобы изучить ее поведение и получить результаты. После завершения экспериментов проводится анализ результатов, чтобы сделать выводы и принять решения на основе полученных данных.

6) Интерпретация и документация результатов:

Интерпретация результатов моделирования включает в себя анализ полученных данных и выявление основных выводов и трендов. После этого результаты моделирования документируются и представляются в виде графиков, таблиц и т.д.

Для проведения имитационного моделирования работы ТПУ требуется программный пакет, который должен соответствовать следующим критериям:

- способность описать всех участников транспортного потока;
- возможность задать интенсивность движения как для пешеходного, так и для транспортного потока;
- возможность установить интенсивность скорости движения как для пешеходного, так и для транспортного потока;
- возможность определить интенсивность плотности как для пешеходного, так и для транспортного потока;
- способность описать модель обслуживания очередей;
- функционал для оптимизации работы системы;
- возможность собирать статистические данные;
- возможность вывода результатов моделирования;
- возможность создания реалистичной анимации.

Исходя из установленных критериев для имитационного моделирования транспортно-пересадочного узла, было проведено рассмотрение нескольких программных пакетов, результаты которого представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Список программного обеспечения, применяемого при моделировании транспортных объектов

Название	Производитель ПО	Область применения	Краткое описание
AnyLogic	Экс Джей Текнолоджик	Системная динамика, агентное моделирование	Возможность создания модели для широкого спектра задач
PTV Vision	A+C CONSTAL	Имитационное моделирование потоков	Способность моделировать перемещение пешеходов и их взаимодействие с другими участниками движения.
Aimsun	TSS (transport simulation systems)	Моделирование транспортных потоков	Инструмент для аналитики транспортных потоков

Однако AnyLogic выделяется преимуществами по сравнению с упомянутыми выше системами моделирования. Модель транспортно-пересадочного узла (ТПУ) в AnyLogic описывается как система массового обслуживания, где заявки представляют собой пассажиров. Однако описание пассажиров как потока однородных заявок оказывается



недостаточным для достижения положительного результата. Важно также учитывать их поведение, взаимодействие, скорость передвижения, зависимость скорости от количества пассажиров в ТПУ и другие аспекты, что требует введения непрерывных переменных. В AnyLogic внедрение таких непрерывных параметров поведения объектов происходит легко и просто. Именно поэтому для построения математической модели взаимодействия пассажиропотоков в ТПУ следует отметить систему AnyLogic. Она объединяет возможности создания гибридных моделей, основанных на моделях системной динамики, дискретно-событийных моделей и агентном подходе. Выбор программного пакета AnyLogic обусловлен особенностями разрабатываемой системы массового обслуживания.

Заключение

Моделирование пассажиропотоков в ТПУ имеет огромное значение в современном управлении и планировании транспортных систем. Транспортно-пересадочный узел представляет собой сложную систему, где пассажиры перемещаются в дискретном пространстве и времени. В этой системе каждый пассажир способен автономно принимать решения о своих действиях на следующем этапе, основываясь на своем собственном поведении или состоянии системы в целом. Для моделирования такой системы необходимо учитывать логические взаимосвязи.

При решении задач, связанных с моделированием транспортных потоков, первоочередным является выбор подходящего метода моделирования. Этот выбор определяется как типом задачи, так и имеющимися временными и трудовыми ресурсами. Метод моделирования определяет способ построения модели, настройку её параметров и необходимые данные для её создания.

Описание поведения всех возможных потоков пассажиров в ТПУ, учитывающее логические зависимости в организации движения и перемещения пассажиров, позволяет оценить существующий и задать желаемый уровень устойчивости, безопасности, комфорта и эффективности функционирования ТПУ. Результаты моделирования позволяют установить внутренние параметры ТПУ и определиться с транспортно-технологическим и планировочным решением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семёнов, В. В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / В. В. Семёнов – М.: Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша, 2004 – 44 с.
2. The AnyLogic Company: Системная динамика. Электронные текстовые данные [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/system-dynamics/> (дата обращения 04.04.2024).
3. Morecroft J., Wiley J. Strategic Modelling and Business Dynamics: A Feedback Systems Approach. – 2007. – 464 p.
4. Маликов, Р.Ф. Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic / Р.Ф. Маликов – Уфа: ФГБОУ ВПО «Башкирский Государственный Педагогический Университет им. М. Акмуллы», 2013. – 297 с.
5. The AnyLogic Company: Дискретно-событийное моделирование. Электронные текстовые данные [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.anylogic.ru/use-of-simulation/discrete-event-simulation/> (дата обращения 04.04.2024).
6. The AnyLogic Company: Справка AnyLogic [Электронный ресурс]. – URL: <https://help.anylogic.ru/index.jsp> (дата обращения 04.04.2024).
7. Швецов, В. И. Математическое моделирование транспортных потоков / В. И. Швецов – М.: Институт системного анализа РАН, 2013. – 52 с.
8. Wilensky U., Rand W. An Introduction to Agent-Based Modeling. Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. – 2015. – 504 p.



9. Fishman G. Discrete-Event Simulation. Modeling, Programming, and Analysis. – 2001. – 537 p.
10. Боев, В. Д. Моделирование в среде anylogic: учеб. пособие для СПО [Электронный ресурс] // В. Д. Боев. – М.: Издательство Юрайт, 2017. – 298 с. – URL: <https://bibliotonline.ru/book/modelirovanie-v-srede-anylogic-437871>.
11. Savrasov M. Development of new approach for simulation and analysis of traffic flows on mesoscopic level: doctoral thesis. – Riga, 2013. – 161 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сигина Татьяна Романовна

магистр кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: tanyasigina@yandex.ru

Уголков Сергей Вячеславович

Кандидат военных наук, доцент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
e-mail: uglkvserg@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sigina Tatyana Romanovna

Graduate student of the Department of Systems Analysis and Logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: tanyasigina@yandex.ru

Ugolkov Sergey Vyacheslavovich

Candidate of Military Sciences, Associate Professor of the Department of System Analysis and Logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: uglkvserg@mail.ru