

**ТЕХНОЛОГИЯ ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ МАРШРУТА ГОРОДСКОЙ  
ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ  
С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ  
ПАССАЖИРОВ И ТЕХНОГЕННОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

**Введение**

Организация работы городской пассажирской транспортной системы (ГПТС) с учетом качества обслуживания пассажиров на рейсах маршрутов пассажирского транспорта и экологического воздействия на окружающую среду невозможна без исследования процессов, протекающих в ней [1].

Теоретические и методологические основы организации работы ГПТС представлены в трудах А.В. Базилюк, М.Д. Блатнова, Е.П. Володина, А.И. Воркута, П.Ф. Горбачева, Н.Н. Громова, А.С. Игнатенко, Ю.С. Лигума, Е.Г. Логачева, В.С. Марунича, Ю.П. Моспана, И.В. Спирина, В.Ф. Штанова и других исследователей. Вопрос организации работы при ГПТС с учетом вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) автомобильного пассажирского транспорта в окружающую среду при соблюдении показателей качества обслуживания пассажиров изучен недостаточно и является приоритетным направлением научных исследований. С другой стороны, должны соблюдаться коммерческие интересы перевозчика.

Зарубежный опыт организации работы муниципального транспорта в развитых странах максимально приближен к нуждам пассажиров, качество обслуживания которых постоянно контролируется, однако подробная информация такого рода — коммерческая тайна организации, которая оказывает пассажирские транспортные услуги и, соответственно, закрыта для общественности.

Существует несколько общепринятых подходов к вопросу исследования функционирования систем. При исследовании системы любой природы, если есть возможность физически изменить систему и запустить ее в действие в новых условиях, лучше так и поступить, в этом случае вопрос адекватности полностью решается. Однако часто так поступить невозможно, поскольку необходимы либо большие расходы либо возможно разрушающее воздействие на исследуемую систему. Поэтому наиболее целесообразно исследование предметной области — создание модели и использование ее как заменителя исследуемой системы.

При выборе между физической и математической моделью чаще отдают предпочтение последней. Она представляет собой систему логических и количественных отношений, которые затем подвергаются обработке и изменениям, чтобы определить, как система реагирует на изменения, точнее, как бы она реагировала, если бы существовала на самом деле.

Если отношения, создающие модель, достаточно просты для получения точной информации о поведении исследуемой системы, то можно использовать математические методы для получения характеристик системы и такое решение называется аналитическим. Но большинство существующих систем, в том числе и транспортных, очень сложные, и для них невозможно составить адекватную аналитическую модель. Такие модели нужно изучать с помощью имитационного моделирования, т.е. многократного испытания модели с необходимыми входными данными для определения их влияния на выходные критерии оценки работы системы. Имитационное моделирование — один из самых распространенных методов при проектировании и анализе работы ГПТС и ее подсистем, каковыми являются маршрут и рейс. Отечественный и зарубежный опыт подтверждает высокую эффективность имитационного моделирования при проектировании и анализе работы транспортных систем.

© О.Е. СОКУЛЬСКИЙ, Е.Ю. ГИЛЕВСКАЯ, Н.Н. ВАСИЛЬЦОВА, Д.Л. ПАНЧЕНКО, 2017

тем [2–4]. Его использование, в конечном итоге, позволит увеличить обоснованность управленческих решений, принимаемых в сфере организации работы городского пассажирского транспорта.

Цель данной статьи — определение особенностей при имитационном моделировании процесса функционирования рейса маршрута ГПТС.

### Основные этапы имитационного моделирования ГПТС

Анализ источников, посвященных вопросам технологии имитационного моделирования [2–4], позволяет определить следующие типичные этапы исследования системы путем имитационного моделирования.

1. Формулировка проблемы, содержательная постановка задачи, планирование исследования системы.
2. Разработка концептуальной модели.
3. Создание программной реализации модели.
4. Проверка адекватности модели.
5. Организация и планирование проведения экспериментов.
6. Анализ результатов моделирования и принятия решений.
7. Оформление результатов исследования.

На первом этапе формулируется проблема построения адекватной математической модели функционирования рейса маршрута ГПТС, которую необходимо решить путем имитационного моделирования. Определяется глобальная цель исследования, специальные вопросы, ответ на которые можно получить в результате исследования и решения задач. В данном случае цель можно сформулировать следующим образом: получение основных временных и эксплуатационных характеристик функционирования рейса маршрута пассажирского транспорта, непосредственно определяющих качество обслуживания пассажиров на маршрутах ГПТС [5]. Достижения цели состоит из следующих задач: определить коэффициент наполнения салона пассажирского транспортного средства (ТС), среднее время ожидания ТС на остановке маршрута и среднее количество пассажиров на остановках. Именно эти параметры определяют уровень качества пассажирских транспортных услуг.

На втором этапе разрабатывается концептуальная модель. Она позволяет выявить причинно-следственные связи, присущие исследуемому объекту. Также, соответствуя целям моделирования, определяются показатели степени детализации: отношение реального времени к модельному и временная разрешающая способность модели — кратчайший интервал между последовательными событиями. Выбор этих параметров зависит от целей проекта, критериев качества работы, доступности данных, запланированного уровня достоверности полученных результатов, вычислительных возможностей, заключений экспертов по вопросам городского пассажирского транспорта, ограничений различного типа (например, финансовых и временных). Также определяются исходные данные и показатели.

В случае исследования маршрута ГПТС временная разрешающая способность модели — секунда, а предметная область представляет собой систему массового обслуживания (СМО), в которой пассажиры описываются транзактами, остановки — очередями, пассажирские ТС — многоканальными устройствами обслуживания с количеством каналов, равной паспортной пассажироместимости движущихся транспортных единиц (автобусов, троллейбусов, трамваев, речных трамваев, составов метро или городской электрички). Согласно этому подходу степень детализации можно принять в следующем масштабе: один пассажир—один транзакт, одна остановка—одна очередь, одно ТС—одно многоканальное устройство обслуживания. В таком случае основные параметры, которые нам нужно найти, определяют качество обслуживания пассажиров, в терминах СМО — это коэффициент наполнения салона пассажирского ТС, коэффициент использования многоканального устройства, среднее время ожидания пассажиром ТС на остановке маршрута, среднее время пребывания транзакта в очереди, среднее количество пассажиров на остановках, среднее количество транзактов в очереди.

В общем случае СМО, описывающую маршрут ГПТС, можно упрощенно представить следующим образом [6]:

$$GI / G / n \times c : FIFO / \infty / \infty.$$

Здесь  $GI$  — распределение произвольного вида моментов поступления в систему заявок на обслуживание (или интервалов времени между двумя последовательными поступлениями требований);  $G$  — распределение произвольного вида изъятия из СМО обслуженных заявок (или длительности их обслуживания);  $n \times c$  — количество устройств обслуживания ( $n$ ) и параллельных каналов обслуживания в каждом устройстве ( $c$ ); FIFO — дисциплина обслуживания очереди «первым пришел—первым обслужился» (First Input—First Output);  $\infty$  — максимальное количество требований в системе (количество требований в очереди плюс количество требований на обслуживании) и мощность источника требований соответственно.

Исходные данные для имитационной модели функционирования маршрута ГПТС, которые тоже определяются на данном этапе, — величины пассажиропотоков (функции распределения времени между последовательными приходами пассажиров на остановке) и маршрутных корреспонденций (вероятности или коэффициенты выхода пассажиров на определенной остановке) на остановках маршрута ГПТС. Их определение требует значительных затрат времени на сбор информации и ее статистический анализ, по результатам которого определяют распределение вероятностей, регрессионные, корреляционные и другие зависимости. Особенностью прибытия пассажиров и выход на остановки является то, что требования могут поступать группами, поэтому их необходимо рассматривать как процесс, который описывается двумя распределениями: первый — для описания времени поступления групп; второй — для описания количества транзактов в группах [2].

Другие исходные параметры модели — маршрутная скорость пассажирского ТС, его тип, а значит, его паспортная пассажироместимость и уровень вредных выбросов в атмосферу (для автомобильного транспорта), количество остановок, расстояние между ними, время пребывания на них пассажирского ТС для высадки и посадки пассажиров.

На третьем этапе осуществляется выбор средства программирования (языки программирования или программного пакета), с помощью которого будет реализована модель, разрабатывается структурная схема модели и составляется описание ее функционирования, осуществляется программная реализация модели.

Средства программирования для реализации модели выбираются между языками программирования (имеют меньшую стоимость и короткое время выполнения модели) и специализированными пакетами (обеспечивают уменьшение продолжительности моделирования). Учитывая, что рейс маршрута ГПТС представляет собой СМО, в которой отображается развитие системы во времени и ее состояния меняются мгновенно, наиболее приемлемое программное средство для реализации имитационной модели маршрута ГПТС — дискретно-событийный язык моделирования (например, GPSS или AnyLogic).

Одна из самых сложных проблем, с которой сталкивается разработчик, заключается в ответе на вопрос, адекватна ли модель системе? Модель может быть достоверной, но не быть адекватной в силу ряда физических (пассажироместимость, заложенная в модели, превышает паспортную), экономических (нет определенного количества пассажирских ТС для обеспечения моделируемого интервала движения) или социальных причин (пассажирское ТС, которое используется в модели, не имеет низкого пола и мест для инвалидов в коляске). В таком случае она не может использоваться для принятия решений. Если модель адекватна, ее можно использовать в процессе принятия решений в моделируемой системе.

### **Проверка достоверности разработанной модели**

Понятно, что любая модель лишь в некоторой степени может соответствовать оригиналу, поэтому не существует абсолютно адекватных моделей. Каждый из вышеприведенных этапов должен завершаться проверкой достоверности разработанной модели. Проверку, как правило, разделяют на два аспекта:

- 1) валидация — проверка правильности создания концептуальной модели, т.е. определение степени соответствия между реальной системой и описываемой;
- 2) верификация — проверка правильности реализации модели.

После проверки адекватности модели проводятся мероприятия по организации и проведению экспериментов, включающие тестовые прогоны модели на основе кон-

трольных данных, анализируется чувствительность для определения значимых (их следует моделировать очень точно) и незначимых факторов, выполняются рабочие прогоны. С практической точки зрения, важно определить влияние вероятностей распределения пассажиропотоков и задержек движения пассажирского ТС на исследуемые параметры.

Для стоимостной оценки ущерба от ДВС пассажирских автомобильных ТС авторы предлагают использовать Директиву Европейского парламента и Совета № 2009/33 / ЕС от 23.04.2009 г. [7]. Документ требует в сфере общественных закупок учитывать энергетические и экологические последствия эксплуатации автомобильного транспорта, в том числе выбросы углекислого газа в течение всего жизненного цикла в целях предоставления преимуществ экологически чистым и энергетически эффективным ТС и их продвижения на рынке, а от государств-членов требует обмениваться практикой приобретения экологически чистых и энергетически эффективных автотранспортных средств. Директива также содержит методику подсчета ущерба от выбросов вредных веществ.

Полученные результаты анализируют и оценивают. Определяют качественные и количественные оценки моделирования. На этом этапе возможно представление результатов проведенных экспериментов в виде графиков, таблиц, распечаток, диаграмм, анимации.

Все вышеприведенные этапы моделирования взаимосвязаны. Кроме того, процедура создания имитационной модели итерационная. После каждого этапа проверяется правильность и достоверность модели. В случае несоответствия модели объекту необходимо возвращаться к предыдущим этапам для корректировки и доработки модели. В зависимости от характера внесенных изменений возвращаются либо к предыдущему этапу, либо к более ранним этапам.

На последнем этапе процесса имитационного моделирования маршрута ГПТС документально оформляют результаты исследования и готовят соответствующую отчетную документацию. Также из проведенных исследований формулируют выводы и рекомендации по использованию моделей и принятию решений. Для маршрута ГПТС такими рекомендациями могут быть: интервал движения и тип пассажирских ТС, который обеспечивает выполнение определенного объема перевозочной работы с заданными показателями качества обслуживания пассажиров и минимизирует техногенное воздействие на окружающую среду.

### Заклучение

В настоящей статье описаны особенности технологии имитационного моделирования при исследовании процесса функционирования рейса маршрута ГПТС с учетом качества обслуживания пассажиров и вредного экологического воздействия пассажирского автомобильного транспорта на окружающую среду. Дальнейшим направлением исследований может быть непосредственная разработка программной реализации имитационной модели рейса пассажирского ТС на маршруте ГПТС.

*О.Є. Сокульський, К.Ю. Гілевська, Н.М. Васільцова, Д.Л. Панченко*

## ТЕХНОЛОГІЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МАРШРУТУ МІСЬКОЇ ПАСАЖИРСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПАСАЖИРІВ І ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Розглянуто особливості технології моделювання процесу функціонування муніципальної транспортної мережі при побудові імітаційної моделі рейсу марш-

риту міської пасажирської транспортної системи. Модель враховує якість обслуговування пасажирів на маршруті і шкідливий екологічний вплив на навколишнє середовище двигунів внутрішнього згоряння пасажирських автомобільних транспортних засобів. Система «пасажир–зупинка–пасажирський транспортний засіб» розглядається як система масового обслуговування особливого виду.

*O.E. Sokulskiy, E.Yu. Hilevska, N.N. Vasilzova, D.L. Panchenko*

## SIMULATION TECHNOLOGY OF THE ROUTE OF THE CITY PASSENGER TRANSPORT SYSTEM WITH THE ACCOUNT OF QUALITY OF SERVICE OF PASSENGERS AND TECHNOGENIC IMPACTS ON THE ENVIRONMENT

The features of technology of the process modeling of the municipal transport network functioning while simulating of a route of the city passenger transport system are considered. The model takes into account the quality of passenger services on the route and the harmful ecological impact on the environment of internal combustion engines of passenger vehicles. The «passenger–stop–passenger vehicle» system is treated as a special type of queuing system.

1. *Игнатенко О.С., Марунич В.С.* Організація автобусних перевезень у містах. — Київ : УТУ, 1998. — 196 с.
2. *Кельтон В., Лоу А.* Имитационное моделирование. Классика CS: 3-е изд. — Киев : ВНУ, 2004. — 847 с.
3. *Томашевський В.М.* Моделювання систем. — Київ : ВНУ, 2007. — 349 с.
4. *Горев А.Э.* Основы теории транспортных систем. — СПб.: СПбГАСУ, 2010. — 214 с.
5. *Логачов Є.Г., Сокульський О.Є.* Визначення та використання вартісної оцінки неякісних транспортних послуг, що надаються перевізником на маршруті МПТС // Вісник НТУ — 2011. — № 24. — С. 183–188.
6. *Таха Х.* Введение в исследование операций: В 2-х книгах. Кн. 2. — М.: Мир, 1985. — 496 с.
7. *Directive 2009/33/EC of the European parliament and of the council of 23 april 2009 on the promotion of clean and energy efficient road transport vehicles // Official Journal of the European Union (L 120). — 2009. — P. 5–13.*

*Получено 11.05.2017*