

## Метод имитационного моделирования функционирования городской транспортной системы

В. Н. Галушко

**Идея метода имитационного моделирования функционирования ГТС.** Метод состоит в поэтапном отображении микротехнологических операций (МТХО<sub>s</sub>) обслуживания пассажиров на имитационной модели (ИМ) функционирования компонентов городской транспортной системы (ГТС) в течении суточного цикла ее функционирования. Он основан на применении принципов и правил формализации функционирования ГТС при построении, испытании и эксплуатации ИМ компонентов ГТС. Все исходные характеристики ИМ ГТС определяются на основе статистического анализа результатов мониторинга потока пассажиров за суточный цикл функционирования реальной ГТС и последующего измерения характеристик ГТС для имитации процесса обслуживания пассажиров *i*-го типа. С помощью ИМ ГТС имитируются все МТХО<sub>s</sub> по обслуживанию множества пассажиров  $\{PASS_{ir}\}$  имеющимся в ГТС составом транспортных средств  $\{TRSR_{kj}\}$ , движущихся согласно имеющимся в ГТС маршрутным линиям  $\{MLIN_j\}$  (здесь *kj*-номер транспортного средства на *j*-ой маршрутной линии). Во время имитации движения  $TRSR_{kj}$  вдоль  $MLIN_j$  за суточный цикл обслуживания ими множества  $\{PASS_{ir}\}$  фиксируется статистика моделирования, являющаяся исходной информацией для вычисления интегральных статистик и откликов имитационного моделирования ГТС.

**Особенностью построения ИМ ГТС** является необходимость отображения изменяющегося характера наполняемости  $TRSR_{kj}$  во время имитации передвижения по  $MLIN_j$  и уникальный характер структуры ГТС и состава транспортных средств для исследуемых микрорайонов города.

Метод реализуется в две стадии. Первая стадия включает в себя двенадцать этапов создания новых ИМ ГТС, выполняемых специалистами, владеющими языками и основами имитационного моделирования. При создании ИМ ГТС необходимо реализовать следующие этапы: составление содержательного описания ГТС (этап 1); организация мониторинга состава и структуры пассажиропотока для получения исходной информации, необходимой при построении ИМ ГТС (этап 2); формализация всех уровней представления ГТС (этап 3); разработка библиотеки программы универсальных компонентов ГТС (этап 4); новая разработка или модификация существующего программно-технологического комплекса имитации процессов в ГТС (этап 5); постановка НЭ на прототипах ГТС и получение исходной информации для “запитки” вариантов компонентов ИМ ГТС (этап 6); установка в тексте ИМ ГТС подпрограмм обеспечения технологий ИЭ (этап 7); перевод формального описания в текст ИМ, функционирующей в технологической среде ПТКИ ГТС (этап 8); разработка программы вторичной обработки статистики имитации, реализующей усреднение откликов и статистик, полученных при  $N_M$  реализациях ИМ ГТС по методу Монте-Карло (этап 9); формирование программы варианта ИМ ГТС на основе библиотеки компонентов ИМ ГТС с включением в базу данных модели информации, полученной при мониторинге реальной ГТС (этап 10); испытание и верификация универсальной программы ИМ ГТС, адаптированной для конкретной структуры исследуемой ГТС (этап 11); проверка адекватности варианта универсальной ИМ ГТС исследуемого ГТС с помощью средств ПТКИ ГТС на основе процедур, изложенных в [2] (этап 12). По завершении этих этапов ИМ ГТС готова к эксплуатации и записывается в виде очередной версии ИМ ГТС в библиотеку ПТКИ ГТС. На второй стадии реализации метода сами специалисты, обеспечивающие управление ГТС эксплуатируют созданный вари-

ант ИМ ГТС. Здесь уже не требуется высокой квалификации по программированию и моделированию, поскольку программа ИМ ГТС готова для использования этими специалистами и требуется только выполнение инструкции по эксплуатации ПТКИ ГТС. Вторая стадия метода реализуется тремя этапами эксплуатации вариантов ИМ исследуемой ГТС. На этапе 13 инициируется очередной вариант ИМ ГТС для исследования динамики функционирования ГТС в условиях того пассажиропотока, параметры которого были определены ранее в ходе мониторинга. При этом осуществляется информационная стыковка компонентов ИМ ГТС для конкретной структуры ГТС и состава транспортных средств в исследуемом варианте ГТС. Полученная на этапе 13 версия программы ИМ ГТС используется в дальнейшем в качестве базовой программы. Исследователю на этапе 14 (оценка технологических характеристик программы ИМ ГТС) необходимо определить: точность имитации, длину переходного периода, устойчивость и чувствительность имитационной модели конкретной структуры ГТС. Соответственно исследование функционирования динамики с помощью программы варианта ИМ ГТС осуществляется на этапе 14. По результатам имитации вариантов ГТС на этапе 14 принимается проектное решение по выбору варианта состава  $\{TRSR_{kj}\}$  на этапе 15. Как видим, число этапов эксплуатации намного меньше числа этапов разработки универсальной программы имитационного моделирования ГТС. Отметим, что первые 12 этапов метода выполняются разработчиками библиотеки компонентов ИМ ГТС, являющимися профессионалами по системному моделированию. Как видим, основная идея метода состоит в отделении этапов создания от этапов использования ИМ ГТС.

На рис. 1 приведена блок-схема этапов реализации метода имитационного моделирования ГТС. Связь между этапами метода осуществляется через информационную базу данных (ИБД) ПТКИ ГТС [1]. Как видно из рис.1, когда адекватности ИМ ГТС не удалось достичь, то может иметь место возврат на любой из предыдущих этапов метода: программирование ИМ ГТС и разработка программ вторичной обработки статистики; перевод формального описания в ИМ ГТС; постановка серий имитационных экспериментов при уточнении исходной информации имитационного моделирования ГТС; формализация ГТС и разработка алгоритмов ИМ ГТС; повторный мониторинг характеристик пассажиропотока; повторное составление содержательного описания ГТС.

#### **Основа метода – имитационное моделирование динамики обслуживания пассажиропотока ГТС**

Вершинами графа пассажиропотока являются остановки посадки и высадки пассажиров из  $TRSR_{jk}$ . Траекторию движения пассажиров по ГТС от места его проживания до места работы можно представить в виде последовательности остановок  $OST_{ir}$ , которые пассажир проезжает в множестве  $\{TRSR_{jk}\}$  за время суточного взаимодействия с ГТС. Время нахождения пассажира в ГТС является случайной величиной  $\{T_{ljk}\}$ , представляющей собой времена ожидания пассажиром транспорта на остановках  $\sum \tau_{ожir}$  и движения пассажира  $\sum \tau_{двir}$  в транспорте. Обе эти характеристики являются случайными величинами с произвольными типами законов распределения вероятностей. Определив количество реализаций ИМ технологии обслуживания пассажиропотока (ТОП)  $N_M$ , процедура Монте-Карло позволяет представить вероятностную ИМ ТОП как последовательность имитационных моделей  $\{\text{ИМ ТОП}_l\}$ , где  $l = \overline{1, N_j}$ . Каждую из этих подмоделей представляем как версию  $l$ -ой реализации вероятностной ИМ ТОП, в которой все вероятностные величины разыграны по жребиям с помощью функций распределения (ФР) случайных величин и вероятностей свершения событий  $P_{jn}$  в местах неопределенности алгоритма обслуживания пассажиропотока ГТС.

Попыток имитационного моделирования процесса обслуживания пассажиров транспортными средствами было много, однако уровень детализации был недостаточен и результаты имитации не были адекватны реальной ситуации и также не использовались в эксплуатационной практике. В рассматриваемом методе имитационного моделирования ТОП вероятностный граф движения  $TRSR_{jk}$  вдоль  $MLIN_j$ , как множество траекторий его движения в каждой реализации вероятностной технологии обслуживания пассажиров транспортными средствами  $MLIN_j$  в течение одних суток.

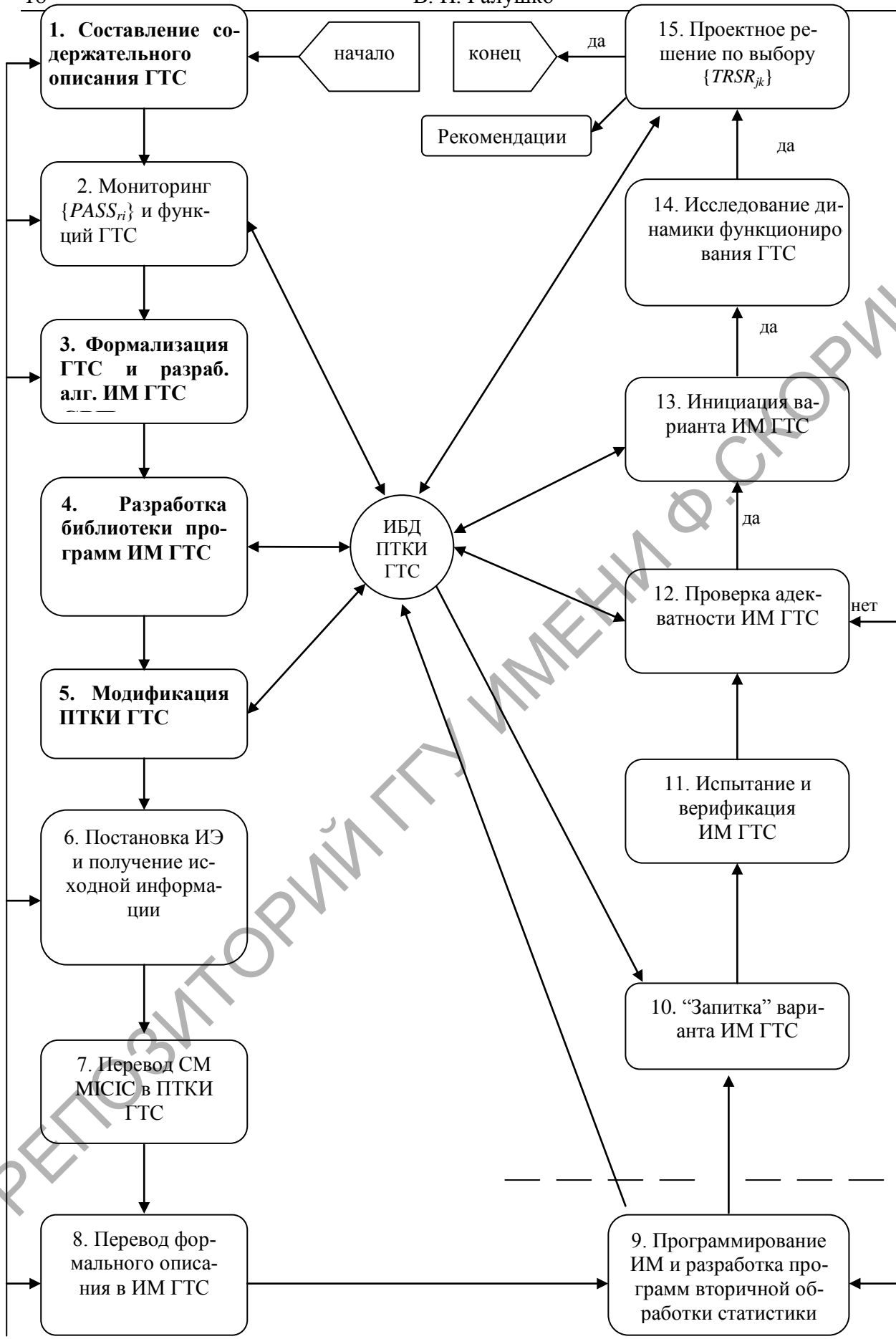


Рисунок – 1. Блок-схема метода имитационного моделирования ГТС

Основа метода состоит в одновременном имитационном моделировании двух сторон технологии обслуживания пассажиропотока. ИМ ГТС состоит из следующих компонентов. Множество процессов имитации функционирования  $TRSR_{jk}$ , обеспечивающих передвижение моделей поведения пассажиров (транзактов сложной структуры, обозначаемых как  $TR_{ir}$ ) от мест их проживания до мест работы в начале рабочей смены и обратно от мест работы до мест проживания в конце рабочей смены. Таким образом, множество процессов  $\{PR.TRSR_{jk}\}$  обслуживает множество транзактов-имитаторов движения пассажиров по ГТС  $\{TR_{ir}\}$ . Группы процессов  $\{PR.TRSR_{jk}\}$  составляют первый тип компонент ИМ ГТС (ИМ  $MLIN_j$ ). Поэтому  $\{K_j\}$  составляют первую группу параметров ИМ ГТС. Следующим типом процессов, входящих в ИМ ГТС, является множество процессов-имитаторов функционирования светофоров на маршрутных линиях  $\{SVTF_{jk}\}$ . В функции этих процессов входит регулирование функционирования процессов  $PR.TRSR_{jk}$  с помощью команд останова и пуска имитаторов движения транспортных средств. Количество светофоров на  $MLIN_j$  ( $n_{cj}$ ) представляет собой вторую группу параметров ИМ ГТС. Необходимо отметить, что алгоритмы процессов – имитаторов представляют на высоком уровне детализации динамику обслуживания пассажиров на  $MLIN_j$ , в которую входит имитация следующих функций  $TRSR_{jk}$ . Во-первых, это имитация операций высадки группы  $TR_{ir}$  на остановках пересадки или их прибытия на пункт назначения, согласно их маршрутной карты и посадки другой группы  $TR_{ir}$  на остановках пересадки или начала их движения к месту назначения. Во-вторых, это формирование  $TR_{ir}$  в кортежи тех пассажиров, которые вместе выходят из  $TRSR_{jk}$  на какой-либо остановке. В-третьих, это имитация движения  $TRSR_{jk}$  от одной остановки до следующей по ходу движения (при этом определяется время движения  $TRSR_{jk}$  на участке между соседними остановками). В-четвертых, это реакция на разрешающие и запрещающие сигналы светофоров в виде ожиданий  $TRSR_{jk}$  перед светофорами.

Процессы-имитаторы возникновения  $TRSR_{jk}$  в очередях на  $OST_{ir}$  в моменты появления пассажиров генерируют  $TR_{ir}$  ( $GENER_{ir}$ ) составляет первую группу компонентов ИМ суточного пассажиропотока. На основании результатов мониторинга пассажиропотока  $GENER_{ir}$  формирует информационную структуру, в которой находится: маршрутная карта движения пассажира по ГТС ( $MK_{ir}$ ); рабочие поля реентерабельной копии  $TR_{ir}$ , в которых сохраняется место в  $MK_{ir}$  на каждой стадии движения  $TR_{ir}$  по ГТС; статистика обслуживания  $TRSR_{jk}$  в очередях на  $OST_{ir}$  и  $TRSR_{jk}$  во время  $l$ -ой реализации ИМ ГТС. Сформировав  $MK_{ir}$  генератор,  $GENER_{ir}$  создает информационную триаду транзакта  $TR_{ir}$  ( $i, r, \alpha_{ir}$ ), в которой находится  $i$  – тип транзакта,  $r$  – номер остановки начала движения транзакта по ГТС,  $\alpha_{ir}$  – адрес информации о реентерабельном сложном транзакте  $TR_{ir}$  в базе данных ИМ ГТС. Таким образом триада  $TR_{ir}$  поступает в одну из очередей процесса-имитатора остановки транспортных средств. Каждый  $i$ -й тип пассажира со своей интенсивностью  $\lambda_{ir}$  поступает в ГТС на обслуживание согласно своей функции распределения времени между соседними поступлениями пассажиров, которые формируются на стадии мониторинга пассажиропотока. Вторым типом компонентов ИМ пассажиропотока являются процессы-имитаторы алгоритма обслуживания пассажиров на остановках  $PR.OST_{ir}$ . Эти процессы имеют стандартные алгоритмы постановки  $TR_{ir}$  в очереди ожидания транспортных средств и выбора  $TR_{ir}$  из этих очередей в моменты прихода на  $OST_{ir}$  очередного транспортного средства  $MLIN_j$ . Это позволило также представить все имитаторы остановок в виде реентерабельных программ ( $PR.OST_{ir}$ ), каждая из которых имеет стандартный алгоритм обслуживания  $TR_{ir}$ , но обладает своей областью информации для хранения очередей в общей базе данных ИМ суточного пассажиропотока. Таким образом, ИМ пассажиропотока состоит из двух множеств реентерабельных программ процессов:  $\{PR.OST_{ir}\}$  и  $\{PR.GENER_{ir}\}$ .

После завершения имитации  $l$ -й реализации ИМ ГТС и взаимодействия ее с ИМ пассажиропотока завершается один цикл процедуры Монте-Карло. Собранная статистика имитации  $l$ -й реализации ИМ ГТС формируется в соответствующие массивы интегральной статистики имитации варианта организации ГТС. В итоге обработки выборок объема  $N_M$  опреде-

ляются и статистики имитации и автоматически пересчитываются отклики имитации. Не требуется на этапах эксплуатации ни специалистов по программированию, ни специалистов по прикладной математике и имитации. Руководство ГТС получает результаты в готовом виде, графически оформленные и удобные для анализа функционирования ГТС, качества обслуживания ГТС пассажиропотока и принятия решений. В этом, как нам представляется, преимущество метода исследования ГТС перед попытками исследования ГТС, имевшими место до реализации метода.

**Abstract.** Methods of simulation modeling of city transport system functioning are considered in the paper.

#### Литература

1. Максимей, И. В. Задачи и модели исследования операций. Ч.3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений.:Уч. Пособие / В. Д. Левчук, С. П. Жогаль. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 150с.

Белорусский государственный  
университет транспорта

Поступила 14.05.2008