

УДК 629.4. 082.3

И.В. Максимей, В.Д. Левчук, В.Н. Галушко, В.С. Могила, П.Л. Чет

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГОРОДСКОМ ТРАНСПОРТЕ

На типовом примере даны содержательное и формальное описания имитационной модели транспортной сети города. Для построения имитационной модели предложено использовать программно-технологический комплекс имитации взаимодействия компонентов городской транспортной сети, являющийся предметно-ориентированным развитием системы моделирования MICIS.

Введение

Моделированием функционирования городских транспортных систем (ГТС) занимались многие исследователи [1–3]. Достаточно большое количество попыток исследования ГТС говорит о том, что проблема эта довольно сложна и в каждом случае удавалось достичь лишь ее частичного решения.

В данной работе излагается методика построения и применения имитационной модели (ИМ) ГТС, основанная на транзактно-процессном способе имитации динамики обслуживания пассажиров существующим подмножеством транспортных линий ГТС с высоким уровнем их детализации. Целью работы является иллюстрация возможностей использования транзактов сложной структуры, которые затем объединяются в «кортежи» транзактов переменной структуры внутри ИМ транспортных средств.

Под *транзактом* в теории массового обслуживания понимается заявка на обслуживание прибором системы массового обслуживания (СМО). Однако в отличие от общепринятого его применения, понятие транзакта существенно расширено по сравнению с понятием, используемым для определения СМО. В нашей модели транзакты, являясь моделями поведения пассажиров в ГТС, обладают «телом», в котором находится маршрутная карта движения пассажира по ГТС ($МК_{ir}$). Отметим, что у транзакта есть составной номер (ir), в котором первая часть (i) означает тип пассажира и служит в модели своего рода приоритетом пассажира в ГТС, а вторая часть (r) означает номер остановки, на которой транзакт поступил в ГТС из генератора и на которую он возвратится для имитации отдыха пассажира в месте его прихода в ГТС уже на следующие сутки. В маршрутной карте $МК_{ir}$ указывается список номеров станций пересадок пассажира при движении по ГТС от станции посадки r до станции назначения, предполагая, что эта станция не является станцией появления пассажира в ГТС. Далее модель пассажира претерпевает следующие стадии его нахождения в ИМ ГТС: в момент поступления транзакта в модель на станции с номером r он имеет идентификатор ir , где ожидает прихода своего транспортного средства с номером k_j (здесь k_j – номер транспортного средства на j -й линии движения троллейбусов по ГТС). В момент поступления в транспортное средство с номером k_j транзакт присоединяется в конец списка подобных транзактов, которые в совокупности образуют *кортеж транзактов*. Это новая имитационная модель группы пассажиров, состав которой изменяется на каждой новой остановке транспортного средства за счет добавления к кортежу новой группы транзактов (моделей пассажиров, ожидающих на этой остановке данное транспортное средство и совершающих поездку до одной и той же остановки).

Таким образом, в моменты завершения посадки пассажиров в модель транспортного средства состав кортежа изменяется в сторону его увеличения. Далее кортеж транзактов существует до достижения остановки, на которой пассажиры выходят из модели транспортного средства. Поэтому кортеж в этот момент уничтожается путем его расформирования, а транзакты с номером ir попадают в одну из очередей на новой остановке, имитируя переход пассажиров на другой маршрут. Если данная остановка является пунктом высадки пассажира на работу, то транзакт попадает на соответствующий имитатор очереди пассажира, где ожидает до момента возвращения пассажира с работы к месту проживания. Далее транзакт с номером ir возвра-

щается по старому маршруту (благодаря маршрутной карте) в обратном направлении до остановки с номером $г$. При этом транзакт подключается к кортежам транзактов в тех транспортных средствах, на которых возвращается в обратном направлении.

1. Структура объекта имитации

В качестве объекта исследования рассматривается фрагмент ГТС, состоящий из J маршрутных линий ($MLIN_j$) с двухсторонним движением и k_j транспортных средств ($TRSR_{kj}$). Поэтому общее количество транспортных средств определяется из выражения

$$K_T = \sum_{j=1}^J k_j.$$

По ходу движения $TRSR_{kj}$ на $MLIN_j$ встречается L_j светофоров (SV_l), регулирующих очередность пересечения $TRSR_{kj}$ перекрестков сети дорог. На $MLIN_j$ расположены три типа остановочных станций (OST_r): конечные, обычные и пересадочные. Фрагмент рассматриваемой ГТС приведен на рисунке. Каждая OST_r имеет порядковый номер $г$ и признак типа станции PS_{kr} . Порядковый номер $г$ является уникальным в ГТС, необходимо также учесть тот факт, что на $г$ -й пересадочной станции могут пересекаться несколько маршрутных линий.

Каждый пассажир ($PASS_{ir}$) обладает маршрутной картой (MK_{ir}) его передвижения по ГТС. Отметим, что на следующие сутки обслуживание $PASS_{ir}$ в ГТС повторяется. Между фазами обслуживания $PASS_{ir}$ «отдыхает в месте проживания» в течение $\tau_{отир}$ и находится на «месте трудовой деятельности» в течение $\tau_{рабир}$. На рисунке обычной штриховкой показаны места проживания $PASS_{ir}$, а двойной – места их трудовой деятельности. Различают следующие уровни представления ГТС:

1. Поведение $PASS_{ir}$ до и после контакта с $TRSR_{kj}$, на которых они передвигаются вдоль $MLIN_j$ (создание и уничтожение суточного пассажиропотока).
2. Обслуживание $PASS_{ir}$ на $MLIN_j$ с помощью $TRSR_{kj}$ (транспортное обслуживание ГТС пассажиропотока).
3. Функционирование транспортных линий, определяющих алгоритмы поведения $TRSR_{kj}$ согласно установленным расписаниям движения (организация транспортных маршрутов ГТС).
4. Обслуживание ГТС суточного пассажиропотока (функционирование всей ГТС).

2. Формальное описание технологии обслуживания пассажиров в ГТС

Для аппарата формализации ГТС используем транзактно-процессный способ описания динамики поведения пассажиров в сети и их обслуживание устройствами с управляющими входами. Динамическими элементами ИМ ГТС являются транзакты (TR_{ir}), которые затем объединяются в кортежи транзактов ($CORT_{jkr}$), представляя собой модели подмножества пассажиров, находящихся внутри транспортного средства и следующих до одной и той же станции назначения OST_r . Статическими элементами ИМ ГТС являются обслуживающие устройства с управлением – имитаторы транспортного средства (ИМ $TRAS_{jk}$), станции посадки-пересадки пассажиров (ИМ OST_r) и светофоров (ИМ $SVETF_{jl}$).

На *первом уровне* детализации ГТС представляется функционированием пассажиров $PASS_{ir}$, моделью которых является TR_{ir} сложной природы. В отличие от общепринятого способа описания, транзакт TR_{ir} , являясь моделью $PASS_{ir}$, кроме идентификатора ir и приоритета π_{ir} обладает «телом», в котором хранятся поле статистики обслуживания транзактов в ГТС (PST_{ir}) и маршрутная карта его движения по сети (MK_{ir}). MK_{ir} имеет списочную структуру вида

$$MK_{ir} = (i, n_{pi}, \mu_{r1}, \mu_{r2}, \dots, \mu_{rnp_i}), \quad (1)$$

где i – тип пассажира, вошедшего в сеть на остановке с номером $г$; n_{pi} – количество станций пересадки следования пассажира, включая и последнюю его высадку к месту работы; μ_{r1} – номер первой остановки, на которой происходит пересадка пассажира (номера меняются от 1 до r_{max} –

максимального номера всех остановок в ГТС); μ_{r2} – номер остановки, на которой происходит вторая пересадка пассажира на следующую линию; μ_{rpi} – номер последней остановки, на которой пассажир выходит к месту своей работы.

За суточный цикл пассажир использует ГТС в течение интервала времени

$$\tau_{\text{жир}l} = t_{\text{кир}l} - t_{\text{нир}l}, \quad (2)$$

где $t_{\text{нир}l}$ и $t_{\text{кир}l}$ – соответственно момент первого появления ($t_{\text{нир}l}$) пассажира i -го типа в ГТС на остановке с номером g в l -й суточный цикл $1 \leq N_{\text{Э}}$, где $N_{\text{Э}}$ – число суток имитации по методу Монте-Карло, и момент возврата ($t_{\text{кир}l}$) пассажира к месту его проживания на той же остановке с номером g в конце l -го суточного цикла, фиксирующиеся системой сбора статистики ИМ ГТС. Здесь индекс l означает номер реализации имитационного эксперимента по методу Монте-Карло ($l = 1, \dots, N_{\text{Э}}$; $N_{\text{Э}}$ – количество реализаций по методу Монте-Карло, зависящее от уровня достоверности β решения вероятностной задачи).

Значения временных интервалов нахождения пассажира либо на остановках, либо в транспортных средствах моделируются с помощью жребиев при заданных заранее функциях распределения этих времен. Весь суточный цикл обслуживания пассажиров транспортными средствами ГТС за l -е сутки моделируется заново, а затем фиксируются все статистики имитации и вычисляются соответствующие отклики имитации, которые по окончании l -й реализации ИМ по методу Монте-Карло запоминаются в базе данных модели, образуя при этом выборки откликов и статистик. Далее необходимо усреднение всех суточных откликов ИМ по выборкам объема $N_{\text{Э}}$ и вычисление по этим выборкам согласно методу Монте-Карло оценок средних значений откликов и дисперсий их вычисления. Заметим, что нельзя моделировать динамику взаимодействия компонентов ГТС и пользователей ни средними, ни максимальными значениями, поскольку в этих ситуациях модель неадекватна реальности.

Компонентами концептуальной модели первого уровня детализации ГТС является множество переменных, статистик и откликов моделирования поведения пассажиров:

$$\text{KM}_1 = (\{G_{ir}\}, \{X_{ir}\}, \{ST_{ir}\}, \{Y_{ir}\}). \quad (3)$$

Множество переменных определяет сложившуюся структуру пассажиропотока:

$$\{G_{ir}\} = \{F_{1ir}(\tau_{or}), F_{2ir}(\tau_{pb}), \{P_{ir}\}, MP_{ir} = \left| \left| P_{ir,r2} \right| \right\},$$

где P_{ir} – вероятность того, что вновь поступающий на g -ю остановку транзакт окажется i -го типа; $F_{1ir}(\tau_{or})$ – функция вероятности распределения интервалов времени нахождения пассажира в месте его проживания; $F_{2ir}(\tau_{pb})$ – функция вероятностей распределения времени нахождения пассажира на месте его работы; $\left| \left| P_{ir,r2} \right| \right|$ – матрица вероятностей корреспонденций пассажиров по сети.

В матрице $\left| \left| P_{ir,r2} \right| \right|$ ir означает номер строки. Если на остановке с номером g в ГТС поступает несколько типов пассажиров, то соответственно в этой матрице будет столько же строк. Номер столбца $r2$ матрицы означает номер остановки, где этот пассажир выходит на работу. Эти матрицы формируются в ходе мониторинга реальной ГТС и далее используются для формирования маршрутной карты движения пассажира MK_{ir} . Обратим внимание на различие записей в маршрутной карте MK_{ir} и матрице корреспонденций. Очевидно, что в ходе моделирования структуры MK_{ir} используется матрица $\left| \left| P_{ir,r2} \right| \right|$.

С помощью функций распределения $F_{1ir}(\tau_{or})$ и $F_{2ir}(\tau_{pb})$ имитируются моменты поступления транзактов на g -е остановочные пункты и поведение пассажира i -го типа вне ГТС множествами:

$$\{X_{ir}\} = \{\lambda_{ir}\} \text{ – параметров интенсивностей поступления } TR_{ir} \text{ } i\text{-го типа на остановках } OST_r;$$

$\{ST_{ir}\} = \{\tau_{жир}\}$ – статистик обслуживания пассажиров ir -го типа, поступающих в ГТС на узле OST_r ;

$\{Y_{ir}\} = \{\gamma_{nirj}\}$ – коэффициентов растяжения времени обслуживания пассажиров i -го типа из-за их ожиданий транспортного средства в очередях на OST_r .

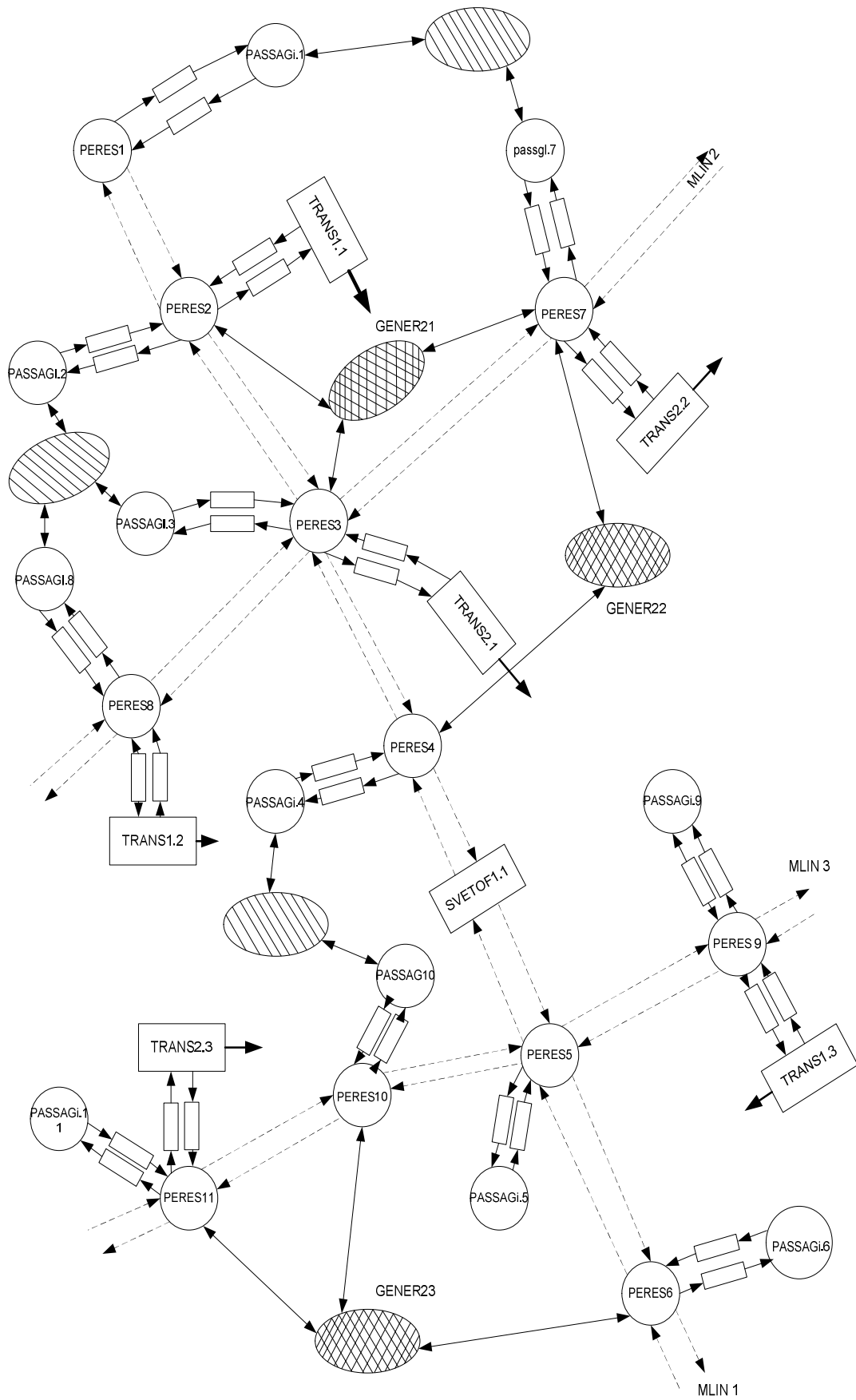


Рис. Фрагмент ИМ ГТС

На **втором уровне** детализации ГТС представляется множеством переменных, параметров, статистик и откликов функционирования самих OST_r . Общее количество остановок на $MLIN_j$ равно R_j и распределено согласно графу сетевой структуры ГТС. На каждой OST_r имеется столько очередей ($ОЧ_{ij}$), сколько $MLIN_j$ пересекаются на этой остановке. Предполагается, что в ходе натурального и имитационного экспериментов имеется возможность фиксировать статистики обслуживания очередей: среднюю длину очереди ($l_{очij}$) и среднее время нахождения пассажиров с индексом ig в очереди к $MLIN_j$ ($t_{очij}$). Качество обслуживания очередей транспортными средствами на $MLIN_j$ обычно характеризуется коэффициентом Литла [7]:

$$LT_{ij} = t_{очij} * l_{очij}. \quad (4)$$

Параметрами ИМ ГТС второго уровня детализации являются дисциплины обслуживания пассажиров с индексом ig в очереди к транспортным средствам $MLIN_j$ ($DISK_{ij}$), устанавливающим порядок поступления и выбора TR_{ir} из $ОЧ_{ij}$ после прихода транспортного средства. Будем использовать нормированные значения коэффициента Литла в виде откликов качества обслуживания очередей пассажиров на OST_r :

$$Y_{ij} = LT_{ij}^* = LT_{ij} / \max_{ij} LT_{ij}. \quad (5)$$

Множество $\{Y_{ij}\}$ откликов имитации характеризует потери пассажиров i -го типа на g -й остановке в очереди к очередному транспортному средству на j -й линии. В итоге множество $\{Y_{ij}\}$ позволяет найти узкие места второго уровня детализации ГТС. Концептуальная модель второго уровня детализации ГТС содержит подмножества

$$KM_2 = (\{DISK_{ij}\}, \{Y_{ij}\}). \quad (6)$$

На **третьем уровне** детализации ГТС исследуется функционирование транспортных средств в суточном цикле обслуживания пассажиров. Параметрами транспортных средств являются допустимое количество пассажиров, вмещающихся в транспортное средство $TRSR_{jk}$ (v_{jk}), скорость его движения (V_{jk}), время входа (выхода) одного пассажира в транспортное средство (τ_{bjk}). Статистиками динамики движения $TRSR_{jk}$ являются времена посадки ($\tau_{посjkr}$) и высадки ($\tau_{высjkr}$), его чистого движения ($\tau_{Дjkl}$). Определяется важный отклик качества движения, представляющий собой коэффициент растяжения времени движения транспортного средства из-за остановок ($\gamma_{Дjkl}$) в l -м суточном цикле. Все $TRSR_{jk}$ движутся по $MLIN_j$ согласно своим расписаниям, которые устанавливаются до имитации ГТС. Таким образом, компонентами концептуальной модели транспортных средств являются множества переменных, статистик и откликов:

$$KM_3 = (\{G_{jk}\}, \{X_{jk}\}, \{ST_{jk}\}, \{Y_{jk}\}), \quad (7)$$

где $\{G_{jk}\} = \{v_{jk}, V_{jk}, \tau_{bjk}, Q_{tmax}, Q_{tmin}\}$ – множество технологических переменных транспортных средств;

Q_{tmax} – величина мощности электроэнергии, потребляемой $TRSR_{jk}$ в моменты его пусков и остановок;

Q_{tmin} – величина мощности электроэнергии, потребляемой $TRSR_{jk}$ во время равномерного движения со скоростью V_{jk} ;

$\{X_{jk}\} = \{n_{jk}\}$ – множество параметров, характеризующих количество транспортных средств на $MLIN_j$;

$\{ST_{jk}\} = \{v_{ost jkrl}\}$ множество статистик средней заполняемости $TRSR_{jk}$ на интервалах между посадками-высадками пассажиров в l -е сутки исследований;

$\{Y_{jk}\} = \{\gamma_{Дjkl}, v_{ostkrl}, \Delta\tau_{отjkl}, ЭРПОТ_{Rjkl}\}$ – множество откликов имитационного моделирования ГТС, отображающих качество функционирования транспортных средств;

$ЭРПОТ_{Rjkl}$ – эпюра среднесуточного потребления электроэнергии $TRSR_{jk}$ вдоль $MLIN_j$.

На **четвертом уровне** детализации ГТС определяем состав переменных, параметров, статистик и откликов функционирования троллейбусных линий ГТС. Предполагается, что на

$MLIN_j$ расположено L_j светофоров, работающих по своим расписаниям. Расположение светофоров и остановок на $MLIN_j$ определяется структурой линии $\{STR\ MLIN_j\}$, имеющей вид списка. Общая структура ГТС задается графом $GRGTS$, в котором узлами являются OST_r и $SVETF_i$, а ребрами – участки безостановочного передвижения $TRSR_{jk}$ длиной (l_{jkr}). Множество $MLIN_j$ характеризуется числом остановок R , светофоров n_{sv} , транспортных средств m_{ots} . Откликами качества функционирования $MLIN_j$ в составе ГТС являются:

– результаты сложения эпюр потребления электроэнергии всеми $TRSR_{jk}$

$$INTEPT_{ji} = \sum_k EPPOTR_{jkl} ; \quad (8)$$

– функции распределения заполняемости транспортных средств на $MLIN_j$ $\Phi_{7ij}(\gamma_z)$ и коэффициентов растяжения времени движения транспортных средств из-за остановок $\Phi_{8ij}(\gamma_y)$.

В качестве интегральных статистик функционирования ГТС формируются графы распределения потребленной электроэнергии ($GR\ POTR$), заполняемости транспортных средств ($GR\ ZAPO$), пропускной способности элементов ГТС ($GR\ PROP$). Это характеристики качества функционирования ГТС со стороны администрации.

Интегральным откликом, характеризующим множество $\{MLIN_j\}$, является граф пропускных способностей каждой l -й реализации модели на j -й транспортной линии. На каждой j -й транспортной линии в l -й реализации модели определяется суммарное количество пассажиров m_{jl} , обслуженных на $MLIN_j$:

$$W_{LINjl} = \sum_{k=1}^{m_{jl}} W_{TSJKl} , \quad (9)$$

где W_{TSJKl} – общее количество пассажиров на k -м интервале между остановками вдоль j -й транспортной линии в l -й реализации модели по методу Монте-Карло.

Таким образом, эпюра распределения числа пассажиров на линии будет состоять из K_j участков, на которых различно число пассажиров, обслуженных всеми транспортными средствами данной $MLIN_j$. Множество подобных эпюр отображает загрузку транспортных средств на j -й линии в l -й реализации модели, а в совокупности составит граф пропускных способностей транспортных линий. Согласно классическому определению пропускной способности можно выделить максимальные значения W_{TSJKl} вдоль $MLIN_j$, которые можно было бы называть пропускной способностью $MLIN_j$. Однако по $MLIN_j$ могут проходить несколько маршрутов транспортных средств. Поэтому такое определение пропускной способности транспортной линии не является точным. Ближе к истине определение пропускной способности всей ГТС в виде графа $GRGTS$, в котором транспортные линии характеризуются зависимостью (9).

Суточную пропускную способность ГТС представим в виде графа $GRGTS$, в котором транспортные линии помечены значениями W_{LINjl} . В итоге концептуальная модель всей ГТС представляет собой множество вложенных друг в друга перечисленных выше концептуальных моделей (3), (6)–(9), в которых указаны множества переменных $\{G\}$, параметров $\{X\}$, статистик $\{ST\}$ и откликов моделирования $\{Y\}$. Все концептуальные модели входят друг в друга согласно иерархии уровней вложенности компонентов технологии обслуживания ГТС пассажиропотока. Множества $\{PASSAG_{it}\}$ и $\{GENER_{it}\}$ представляют собой внешнюю среду ИМ ГТС (см. рисунок).

При апробации программно-технологического комплекса имитации (ПТКИ) ГТС используются процедуры принятия решений в условиях неопределенности и риска, имеющиеся в составе технологической оболочки ПТКИ ГТС. Выбор рационального варианта технологии обслуживания пассажиров в ГТС осуществляется на основе матрицы решений. Эта матрица формируется по результатам моделирования вариантов организации ГТС при известном составе транспортных средств и пересадочных станций. Каждый h -й вариант организации ГТС определяется набором откликов Y_h , которые задаются с помощью ПТКИ ГТС.

В вариантах организации ГТС усредняются значения откликов, полученных в l -х реализациях ИМ ГТС. Поэтому компоненты множества $\{Y_h\}$ представляют собой математические ожидания каждого элемента этого множества, усредненные по выборке объема $N_{\text{сyt}}$. При этом определяются дисперсии значений элементов множества $\{Y_h\}$, что позволяет оценить точность решения вероятностной задачи методом Монте-Карло. С помощью ИМ ГТС и критериев теории принятия решений можно найти компромисс между интересами администрации ГТС и потребностями пассажиров.

3. Структура ИМ компонентов ГТС

Иерархический характер построения ИМ ГТС, типов и состава алгоритмов поведения компонентов модели каждого уровня детализации ГТС определил набор типовых параметризованных подмоделей, из которых можно оперативным образом конструировать варианты ИМ ГТС, характерных для конкретного города. Динамику появления пассажиров на остановках и их обслуживание на первом уровне детализации ГТС можно отобразить с помощью подмоделей имитаторов поступления пассажиров i -го типа на OST_r (PM.PASSAG_{ir}), которых должно быть по одной на каждый тип пассажира на r -й остановке, и имитаторов обслуживания пассажиров на остановках (PM.PERES_r). Обслуживание пассажиров в троллейбусах имитируется множеством подмоделей транспортных средств (PM.TRANS_{jk}). Все множество PM.TRANS_{jk} объединяется в подмодель троллейбусной линии PM.TROLIN_j, которая дополняется множеством подмоделей-имитаторов светофоров (PM.SVETF_{jl}). Каждая из PM.TRANS_{jk} состоит из шести устройств обслуживания транзактов TR_{ir} с управлением имитаторов: высадки и посадки PASS_{ir} в TRSR_{kj} (US.VISAD и US.POSAD), движения TRSR_{jk} вдоль TRLIN_j (US.DVIGEN), взаимодействия TRSR_{kj} со светофорами (US.REASVIT_l), управления движением согласно расписанию (US.RASPIS), расхода электроэнергии транспортным средством (US.POTR).

Каждая из этих подмоделей взаимодействует с моделью пассажира, являющейся транзактом сложной структуры (TR_{ir}). По сути, TR_{ir} представляют собой элементарные модели поведения пассажиров i -го типа, появившиеся в модели на остановках r .

Подмодель PM.PASSAG_{ir} состоит из генератора транзактов (GENER_{1ir}), устройства-имитатора трудовой деятельности пассажира (GENER_{2ir}) и множества $\{TR_{ir}\}$, поступающих в ГТС с интенсивностями (λ_{ir}) в соответствующие очереди PM.PERES_r. Длительности отдыха и работы пассажира формируются по функциям распределения $F_{1ir}(\tau_{от})$ и $F_{2ir}(\tau_{рб})$. Тип пассажира моделируется по векторам вероятностей $\{P_{ir}\}$. Для формирования в теле TR_{ir} маршрутной карты МК_{ir} вида (1) устройство GENER_{1ir} использует матрицу корреспонденций $\|P_{r1r2}\|$, которая формируется до начала имитации по результатам мониторинга пассажиропотока реальной ГТС.

Подмодель PM.PERES_r состоит из одного обслуживающего устройства и набора очередей TR_{ir} на посадку, перевозку и возврат к месту отдыха пассажира. С помощью этих очередей осуществляется синхронизация обслуживания TR_{ir} подмоделями PM.PASSAG_{ir} и PM. TRSR_{kj}.

Устройства подмоделей PM. TRSR_{kj} обеспечивают:

- расформирование кортежей транзактов, покидающих TKSR_{jk} на PERES_r, и перевод TR_{ir} по очередям PM.PERES_r;
- объединение TR_{ir} в кортежи, находящиеся в рабочих массивах PM.TRANS_{jk}, которые поступают из очередей PM.PERES_r;
- имитацию останова и запуска движения TRSR_{jk} по мере его прибытия к местам установки светофоров на MLIN_j или же к местам расположения OST_r.

Подмодель PM.TROLIN_j включает в себя множество устройств-имитаторов светофоров $\{US.SVETOF_{jl}\}$, массив указателей состояния светофоров, станций остановок, расписания прибытия и отправления TRSR_{jk} на конечные пункты MLIN_j.

4. Программно-технологический комплекс имитации ГТС

В работе [7] приведен анализ описательных и технологических возможностей систем моделирования (СМ), эксплуатирующихся в странах СНГ. Несмотря на универсальный характер возможностей наиболее технологичных СМ, они ориентированы в основном на про-

фессионалов по программированию и имитации, их трудно использовать специалистам-транспортникам. Перечисленный состав новых задач эксплуатации существующих ГТС и отсутствие средств оперативной разработки вариантов ИМ ГТС определили актуальность разработки ПТКИ ГТС, который представляет собой предметно-ориентированное расширение системы моделирования MICIS [8] на данную область исследования сложных систем и состоит из универсальной и предметно-ориентированных частей. Универсальная часть комплекса разработана путем добавления к СМ MICIS библиотек программ и процедур испытания ИМ и адаптации к операционной среде СМ MICIS пакета программ обработки данных СТАТИСТИКА [9]. Предметно-ориентированная часть комплекса содержит библиотеки процедур и программ, из которых формируются алгоритмы перечисленных ранее подмоделей устройств-имитаторов компонентов ГТС.

В составе универсальной части ПТКИ ГТС, кроме адаптированного пакета программы СТАТИСТИКА, реализованы библиотеки процедур общего назначения: исследования свойств и имитации ИМ (LIB.ISPIM), технологического обеспечения (LIB.TECHNO), принятия решений (LIB.RECHN). В LIB.ISPIM входят процедуры оценки точности имитации, проверки стационарности и устойчивости имитации и оценки чувствительности откликов к вариациям параметров ИМ. Все эти процедуры реализуют алгоритмы и методики исследования ИМ, опубликованные в работе [8]. В состав LIB.TECHNO входят процедуры генерации случайных величин по заданным функциям распределений и проверки адекватности ИМ реальной СС. Процедуры LIB.RECHN обеспечивают «свертку» компонент множества откликов ИМ (Y_b) к скалярной величине, формирование матриц решений, определение значений классических критериев решения в условиях неопределенности и риска по известным методикам [8].

В состав предметно-ориентированной части ПТКИ ГТС входят две библиотеки: подмоделей элементов ГТС (LIB.IMELEM) и готовых параметризованных ИМ вариантов ГТС (LIB.IMVGTS). Библиотека LIB.IMELEM содержит параметризованные «заготовки» подмоделей: PM.PASSAG_{ir}, PM.PERES_r, PM.TRANS_{jk}, PM.SVETF_{jl}, PM.TROLIN_j. Эти подмодели с помощью технологической оболочки комплекса позволяют оперативным образом конструировать пользователю-предметнику варианты ИМ ГТС и каталогизировать их в библиотеку LIB.IMVGTS. Все эти ИМ, в свою очередь, представляют собой высокопараметризованные заготовки вариантов ИМ ГТС, реализованные в среде СМ MICIS.

5. Технология использования ПТКИ ГТС

Разработка даже простейшей ИМ ГТС с помощью ПТКИ ГТС требует больших ресурсов ЭВМ и затрат труда исследователя. Поэтому для облегчения исследований предлагается многоэтапная технология использования ПТКИ ГТС. Следуя технологии имитационного моделирования сложных систем [7], необходимо реализовать весь комплекс исследований в шесть этапов.

На **этапе 1** осуществляется построение ИМ ГТС средствами технологической оболочки ПТКИ ГТС. С помощью библиотеки LIB.IMELEM выполняется замена элементов {STRMLIN} заготовками множеств подмоделей. При этом в состав варианта ИМ ГТС включаются: R подмоделей PM.PERES_{ir} и J подмоделей PM.PASSAG_{ir}; n_{sj} подмоделей PM.TRANS_{jk} и J подмоделей PM.TROLIN_j; n_{sv} подмоделей PM.SVETF_{jl}. Устанавливается принадлежность каждой PM.TRANS_{jk} к области данных PM.TROLIN_j и каждой PM.PASSAG_{ir} к области данных PM.PERES_{ir}. С помощью технологической оболочки ПТКИ ГТС осуществляется заготовка полей для каждой из перечисленных подмоделей, которые, являясь реентерабельными программами, в режиме разделения времени используют и модифицируют информацию из соответствующих рабочих полей, число которых соответствует числу PERES_{ir}, TRANS_{jk}, SVETF_{jl}, TROLIN_j. Таким образом, информационную часть ИМ ГТС составляют все эти рабочие поля, а в ее исполнительную часть входят по одной программе PM.PASSAG_{ir}, PM.PERES_{ir}, PM.TRANS_{jk}, PM.SVETF_{jl}, PM.TROLIN_j. Скомпонованные в одну ИМ, все эти программы заготовок подмоделей элементов с помощью технологической оболочки ПТКИ ГТС каталогизируются в библиотеку LIB.IMVGTS. В результате вариант ИМ ГТС также представляет собой параметризованную заготовку ИМ, требующую операций замены формальных параметров подмоделей фактическими их значениями, которую назовем «запиткой» ИМ ГТС.

На **этапе 2** организуется натурный эксперимент (НЭ) на реальной ГТС с целью получения исходной информации для «запитки» ИМ ГТС реальной статистикой поведения $PASSAG_{ir}$, функционирования $TRANS_{jk}$ и $SVETF_{jl}$. Кроме того, в ходе НЭ определяется статистика, используемая для верификации и проверки адекватности ИМ реальной ГТС. С помощью программ обработки статистики НЭ, входящих в состав PS.ISPIM, формируются функции распределения параметров поведения $TRSR_{jk}$, $SVETF_{jl}$, $PASSAG_{ir}$; матрица поведения пассажиров в ГТС, а также остальные характеристики, измеренные с помощью мониторинга и функционирования реальной ГТС.

На **этапе 3** осуществляются запитка и верификация варианта ИМ ГТС с помощью библиотеки процедур LIB. ISPIM. Более сложно происходит верификация ИМ ГТС, поскольку не существует формальных методов верификации ИМ. Согласно общей технологии верификации сложных систем [7] верификация ИМ состоит в доказательстве утверждений о соответствии алгоритма ее функционирования замыслу исследователя. Процедуры библиотеки LIB. ISPIM включаются в состав ИМ ГТС, анализируют результаты, формируемые каждым элементом ИМ, и выдают исследователю сообщение о наличии логических ошибок в коммутации компонентов модели.

На **этапе 4** проводятся испытание и исследование свойств ИМ ГТС с помощью библиотеки процедур LIB. ISPIM. По запросам пользователя инициируется выполнение следующих технологических шагов исследования ИМ ГТС: оценки точности имитации; определения длины переходного периода, по окончании которого ИМ входит в стационарный режим имитации; оценки устойчивости имитационных экспериментов с ИМ ГТС при десятикратном увеличении интервала моделирования. Следующим шагом испытания и исследования свойств является оценка чувствительности откликов ИМ к вариациям параметров ИМ ГТС. Если h -й элемент множества $\{\Delta Y_h\}$ при изменении каждого параметра моделирования на всем диапазоне его изменения в процентах приращения ΔY_h меньше точности моделирования ϵ , то это означает, что отклик Y_h не «чувствует» вариаций параметров ИМ ГТС и его можно исключить из рассмотрения на этапе анализа. Проанализировав все отклики Y_h по величине ΔY_h , можно минимизировать количество элементов в множестве откликов $\{Y_h\}$, «чувствующих» изменения параметров модели ГТС. Завершающим шагом этапа является проверка адекватности ИМ реальной ГТС. Исходя из априорных соображений исследователь должен из множества $\{Y_h\}$ выбрать подмножество откликов $\{Y'_h\}$, которые он будет считать контролируруемыми откликами при проверке адекватности ИМ ГТС.

На **этапе 5** организуется эксплуатация ИМ ГТС в среде ПТКИ ГТС на основе использования процедур Монте-Карло и формирования множества откликов $\{Y_{hl}\}$ с целью достижения заданной достоверности моделирования β .

В зависимости от решаемой задачи исследования в качестве основных используются различные отклики. В общем случае параметрами моделирования являются множества интенсивностей пассажиропотока $\{\lambda_{ir}\}$ и количества транспортных средств на линиях $\{n_{si}\}$. При решении задачи поиска «узких мест» в структуре ГТС основными откликами являются приведенные коэффициенты Литла, означающие потери времени пассажирами в очередях $\{LT^*_{ir}\}$, и коэффициенты увеличения времени доставки пассажиров по сети из-за ожидания на остановках $\{\gamma^*_{ir}\}$. Каждая станция пересадки характеризуется парой значений $\{LT^*_{ir}; \gamma^*_{ir}\}$, представляя собой точку в системе координат $(LT^*; \gamma^*)$.

При решении задачи оценки пропускной способности ГТС основными откликами являются графы наполняемости транспортных средств, растяжения времени движения $\{TRSR_{kj}\}$ из-за остановок перед светофорами и на пересадочных остановках, отклонения времени движения транспортных средств от расписаний. Эти графы представляют собой результат наложения на графовую структуру ГТС соответственно значений основных откликов для данной задачи. Тем участкам GR.GTS, у которых велики значения откликов модели, исследователи должны уделить первоочередное внимание при выявлении причины снижения пропускной способности ГТС.

Важным откликом ИМ ГТС для городского электрохозяйства являются графы потребления электроэнергии GR.POTR, являющиеся результатом сложения эпюр потребления электроэнергии на всех линиях ГТС. На этих графах вдоль $MLIN_j$ будут изображены интегральные эпюры потребления электроэнергии, изменяющиеся в допустимых пределах амплитуд

мощностей. Такая информация затем используется при построении ИМ распределения мощностей в ГТС.

На **этапе 6** принимается решение о завершении исследований с помощью ИМ ГТС. В этом случае исследователь может использовать библиотеку LIB.RECHN. Типовые операции этапа анализа результатов имитации стандартизованы в виде набора следующих процедур: «свертки» компонент вектора откликов к скалярной величине, формирования матрицы решений, расчета критических значений критериев принятия решения (MN-критерий, Севиджа, Байеса – Лапласа, Ходжа – Лемана, Гурвица и т. д.). В составе библиотеки LIB.RECHN дополнительно реализованы процедуры выделения главного компонента, последовательных уступок и логического объединения критериев. Необходимо отметить, что этап изучения динамики ГТС требует высокой квалификации исследователя в области математической статистики и теории принятия решений. Поэтому в ПТКИ ГТС имеется набор методических указаний, позволяющих исследователю-предметнику принимать обоснованные решения с точки зрения прикладной математики.

Заключение

Рассмотрим основные отличия описанного имитационного подхода к моделированию ГТС от известных попыток моделирования отечественных и зарубежных ГТС. В работе [1] предложено использовать автоматизированный имитационный комплекс городской пассажирской транспортной системы (АИК-ГПТС) в качестве инструмента автоматизации проектирования АСУ процессом перевозки пассажиров в ГТС, который позволяет установить комплексные характеристики структуры сети и выбрать вариант функционирования внедряемой в конкретном городе транспортной системы. В работе [2] приведена технология оценочного проектирования маршрутной сети и формирования невложенных кратчайших путей на графе транспортной сети, формирования матриц корреспонденций пассажиров и составления расписаний движения транспортных единиц. В работе [3] изложен опыт зарубежных разработок ИМ. Как правило, это детерминированные ИМ, в которых имитация ведется по средним значениям, либо по методикам теории расписаний [3], либо с помощью аналитико-имитационных моделей массового обслуживания [5]. В других типах ИМ имеет место сочетание методик описания сетевых структур с методиками динамического программирования при решении задач выбора путей минимальной стоимости или кратчайшего пути [4, 6].

Подход авторов к построению ИМ ГТС имеет принципиальные отличия. Во-первых, это действительно вероятностная ИМ динамики обслуживания пассажиропотока ГТС, использующая метод статистических испытаний при решении перечисленных задач проектного моделирования. Во-вторых, структура сети уже задана матрицей вероятностей корреспонденций пассажиров и формируется на основе мониторинга существующего пассажиропотока ГТС. Результаты мониторинга оформляются в виде функции распределения параметров подмодели ГТС, которые затем используются при моделировании реализаций вариантов ГТС с помощью розыгрыша по матрице вероятностей маршрутов следований и формирования маршрутных карт движения пассажиров по сети. В-третьих, используются два типа элементов ИМ ГТС: динамические элементы в виде моделей поведения пассажиров, представляемые как транзакты со сложной структурой; статические элементы с типовым алгоритмом их поведения, представляемые как обслуживающие устройства с управлением [7]. В-четвертых, вводится еще одно понятие динамического элемента в виде кортежа транзактов, представляющих собой модель поведения группы пассажиров, следующих внутри модели транспортного средства до одной и той же станции их пересадки (кортежей транзактов), состав которых постоянно пополняется за счет поступления на остановках новых групп пассажиров, имеющих ту же самую станцию высадки, что и остальные составляющие кортежа транзактов. В-пятых, использование процедур Монте-Карло при имитации динамики поведения компонентов ГТС приводит к необходимости формирования функций распределения новых классов статистик имитации и вычисления откликов ИМ ГТС, которые не применялись в предыдущих типах моделей городских пассажиропотоков.

Наконец, немаловажной особенностью предлагаемой методики имитационного моделирования ГТС является ориентация технологической оболочки ПТКИ ГТС на пользователя-

предметника, не являющегося профессионалом в области программирования и имитационного моделирования.

Перечисляемые особенности предлагаемой методики обеспечивают перспективу развития использования ПТКИ ГТС при оперативном решении задач анализа поиска узких мест ГТС и оценки пропускной способности транспортной линии ГТС. При этом службы энергоснабжения ГТС могут получить обобщенные эпюры распределения мощностей электролиний для их применения в своей практике эксплуатации энергохозяйства ГТС.

Список литературы

1. Лопатин, А.П. Автоматизация проектирования АСУ перевозочным процессом на городском пассажирском транспорте с использованием методов и средств имитационного моделирования / А.П. Лопатин. – М.: НПО «Луч», 1982. – 117 с.
2. Лопатин, А.П. Моделирование перевозочного процесса на городском пассажирском транспорте / А.П. Лопатин. – М.: Транспорт, 1985. – 117 с.
3. Бонсалл, П.У. Моделирование пассажиропотоков в транспортной системе (оценка вариантов развития транспортной системы и анализа чувствительности модели): пер. с англ. / П.У. Бонсалл, А.К. Мейсон, А.Г. Уилсон. – М.: Транспорт, 1982. – 207 с.
4. Яворский, В.В. Модели и алгоритмы проектирования сети городского пассажирского транспорта / В.В. Яворский // Проблемы построения автоматизированных систем управления на транспорте. – Киев, 1978. – 102 с.
5. Падин, В.А. Применение теории массового обслуживания на транспорте / В.А. Падин. – М.: Наука, 1973. – 152 с.
6. Яковлев, Л.А. Программное обеспечение технического расчета системы городских путей сообщения, представленной в сетевой форме / Л.А. Яковлев. – М.: Стройиздат, 1976. – 136 с.
7. Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. – М.: Радио и связь, 1987. – 230 с.
8. Задачи и модели исследования операций: в 3-х т. Т. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: учеб. пособие / И.В. Максимей [и др.]. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 150 с.
9. Боровиков, В.П. STATISTIKA. Искусство анализа данных на компьютере для профессионалов. 2-е изд. / В.П. Боровиков. – СПб., 2003. – 688 с.

Поступила 30.06.05

*Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины,
Гомель, Советская, 104
e-mail: mpu@gsu.unibel.by*

I.V. Maximey, V.D. Liauchuk, V.N. Galushko, V.S. Mogila, P.L. Chechat

SIMULATION MODEL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES ON THE URBAN TRANSPORT

Urban transport network simulation model description is given on a standard example. The program and technological tools of simulation of urban transport network component are offered to be used for simulation model construction. They are the subject oriented development of MICIC4 tools.