

УДК 004.021+656.25

**Булавский П. Е., д-р техн. наук,  
Марков Д. С., канд. техн. наук,  
Соколов В. Б., канд. техн. наук,  
Соколов В. А.**

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»,  
Петербургский государственный университет путей сообщения  
Императора Александра I

## **СИНТЕЗ GPSS-МОДЕЛИ ОБСЛУЖИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПОРЦИОННОЙ ФОРМАЛИЗАЦИИ**

Предложена GPSS-модель обслуживающих устройств сложных систем массового обслуживания на основе порционной формализации потоков заявок. Модель создана на основе совершенствования метода порционного динамического моделирования с целью оценки не только параметров загрузки сложных систем массового обслуживания и ее устройств, но и временных характеристик процессов обслуживания заявок. Требование оценки временных характеристик процессов обслуживания заявок определяет необходимость учета следующих состояний модели: одновременное занятие одной заявкой-порцией нескольких моделей устройств в многофазной ветви; одновременное занятие одной модели несколькими заявками-порциями; направление заявки-порции в накопитель при невозможности занятия модели по соотношению производительности обслуживающих устройств и интенсивности входного потока. Для моделирования этих состояний в среде GPSS предложено использовать многоканальный объект оборудования «память», на основе которого синтезирована модель обслуживания заявок-порций. Метод порционного динамического моделирования на основе библиотеки модели обслуживающих устройств дает возможность операционных исследований с оценкой полного спектра операционных характеристик сложных систем массового обслуживания при сокращении в десятки раз затрат машинного времени. Показано, что перспективным объектом исследований с целями доказательства адекватности метода и получения практических рекомендаций по организации режимов работы обслуживающих устройств являются процессы обслуживания пассажиропотоков в пересадочных узлах метрополитена.

сложные системы массового обслуживания; порция заявок; метод порционное динамическое моделирования; модель обслуживающих устройств; сетевая модель сложных систем массового обслуживания

### **Введение**

Предлагаемая работа является результатом развития идей, изложенных авторами в [1–3], суть которых сформулирована в виде концепции синтеза модели порционного динамического моделирования (МПДМ) сложных систем массового обслуживания (ССМО), основой которой является понятие

«заявка-порция». МПДМ предназначены для исследования ССМО, обладающих следующими свойствами:

- отдельные заявки имеют малый «вес» в процессе обслуживания;
- количество заявок, поступающих на входы системы и находящихся в процессе обслуживания, велико;
- количество входов и выходов системы велико;
- потоки заявок неравномерны во времени;
- интенсивность и неравномерность потоков заявок на различных входах системы различны;
- система обслуживания представляет собой сложную сеть с большим количеством разнородных обслуживающих устройств (ОУ) и накопителей;
- маршруты обслуживания заявок в системе разнообразны, сложны и определяются множеством логических условий разного вида.

К системам такого класса относятся:

- железнодорожная сеть по перевозкам грузов и пассажиров;
- системы технического диагностирования и удаленного мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики по обработке диагностических и измерительных сообщений [4–6];
- автоматизированные системы управления организационно-технологического типа в хозяйстве железнодорожной автоматики и телемеханики (АСУ-Ш) по обработке информационных сообщений от линейных предприятий [7].

Следует отметить, что наиболее сложным, практически ценным и подходящим по свойствам для использования МПДМ является исследование работы метрополитена по обслуживанию пассажиропотоков. При этом в качестве обслуживающих устройств рассматриваются входные двери станций, кассы, турникеты, эскалаторы, электропоезда, а в качестве накопителей – вестибюли станций, платформы и пешеходные переходы, которые одновременно являются и обслуживающими устройствами.

Задачами операционных исследований таких систем являются: определение «узких мест» в процессе обслуживания заявок; оценка дефицитов (профицитов) емкостей накопителей и пропускной способности обслуживающих устройств с учетом плановых ремонтов, отказов и восстановлений; определение наличия и оценка характеристик очередей заявок на входах и внутри системы. Кроме того, в отличие от предыдущей версии модели порционного моделирования [3], МПДМ должна позволять, наряду с указанными выше операционными характеристиками, давать оценку затрат времени на обслуживание заявок. Очевидно, что МПДМ должна разрабатываться как сетевая модель ССМО [8], основными узлами которой являются модели ОУ (МОУ).

Целью разработки МПДМ является сокращение в десятки раз затрат машинного времени на проведение серий имитационных экспериментов для операционных исследований систем данного класса (в зависимости от разме-

ра порций заявок и свойств исследуемой системы) по сравнению с классической формализацией имитационных моделей ССМО на основе представления заявок как единичных объектов (ЕО).

## 1. Основные положения

Заявка-порция – это совокупность заявок (ЕО), поступающих в систему за заданный интервал времени  $\Delta T_i$  и рассматриваемая как единый элемент  $P_i$ ;  $i = 1, I$  потока, где  $i$  – индекс порции по расположению на оси времени от начала моделируемого периода, причем  $P_i = \sum p_{i,j}$ ;  $j = \overline{1, J}$ , где  $p_{i,j}$  – порция заявок, поступивших за  $i$ -й интервал на  $j$ -й вход, а  $J$  – количество входов в ССМО.

Разработка МОУ предполагает использование следующих параметров:

–  $\lambda_{i,j}^c$  – средняя интенсивность потока заявок за  $i$ -й интервал по  $j$ -му входу (среднее количество заявок (ЕО) в единицу времени поступающих на  $j$ -й вход системы в течение  $i$ -го интервала);

–  $\lambda_m = \sum \lambda_{i,j}^c$  – суммарная интенсивность потока заявок (ЕО) на входе  $m$ -го устройства;

–  $\Pi_m$  – производительность  $m$ -го устройства (количество заявок (ЕО), обслуживаемых устройством в единицу времени).

В традиционных имитационных моделях ССМО заявками являются ЕО, например, пассажир метрополитена, комплект технических документов и т. п. При этом одноканальное ОУ может быть занято только одной заявкой, а момент его освобождения определяется только временем выполнения операции данным  $u_m$ . Концепция МПМД предусматривает представление в качестве заявок порций ЕО, поступивших в ССМО за заданный интервал времени  $\Delta T_i$ , что определяет ряд специфических требований к моделям ОУ –  $u_m$  (символ  $u_m$  обозначает обслуживающее устройство с индексом  $m$ ).

1. В многофазных ветвях сетевых моделей ССМО одна заявка-порция может одновременно занимать несколько ОУ, последовательно занимая и освобождая их в зависимости от времени выполнения операций каждым ОУ.

2. Момент освобождения  $u_m$  в многофазной ветви определяется соотношением времени выполнения операций данным и предыдущим ОУ. Так, например, если время выполнения операции по обслуживанию  $p_{i,j}$  предыдущим ОУ больше, чем данным, то момент освобождения данного ОУ этой порцией не может наступить раньше освобождения предыдущего  $u_m$ .

3. Одноканальное ОУ могут одновременно занимать более одной  $p_{i,j}$  в зависимости от соотношения суммарной интенсивности  $\lambda_m$  заявок-порций поступающих на вход  $u_m$  и его производительности  $\Pi_m$ . Одновременность по-

нимается в смысле частичного совпадения времени обслуживания нескольких  $p_{i,j}$ , но не времени их входа в ОУ.

4. При одновременном обслуживании нескольких  $p_{i,j}$  необходимо выполнить перерасчет времени их совместного пребывания в ОУ для каждой заявки-порции.

5. В ССМО с приведенными выше свойствами перед ОУ, как правило, имеются накопители  $h_z$ .

6. После выполнения операции каким-либо ОУ маршрут  $p_{i,j}$  в сетевой модели ССМО определяется значениями ждущих  $\alpha$ , логических  $q$  и вероятностных  $g$  логических условий, а также специфического только для порционной формализации вероятностного условия  $\beta$ . Условия  $\alpha$ ,  $q$ ,  $g$  являются классическими [3, 9] и в данной работе не рассматриваются. Условие  $\beta$  приводит к делению заявки-порции  $p_{i,j}$  и его модель подлежит разработке.

В качестве инструментального средства для синтеза МПМД в [3, 10] обоснован выбор универсальной моделирующей системы GPSS World [11]. Сформулированные требования (1–6) позволяют выбрать необходимые средства для синтеза GPSS-МОУ.

Заявка-порция  $p_{i,j}$  имитируется динамическим объектом – транзактом ( $Z_{i,j}$ ), в параметры которого записывается следующая информация:

- $p1$ -индекс  $j$  входа ССМО, на который поступила порция  $p_{i,j}$ ;
- $p2$ -метка времени  $t_i$  поступления  $p_{i,j}$  в ССМО;
- $p3$ -величина интервала  $\Delta T_i$ ;
- $p4$ -величина  $\lambda_{i,j}^c$ ;
- $p5$ -величина  $K_{i,j}$  порции заявок по  $j$ -му входу для  $i$ -го интервала;
- $p10$  – время задержки на обслуживание.

## 2 GPSS-МОУ

МОУ в среде GPSS могут разрабатываться на основе объектов аппаратной категории: одноканальное – «устройство», многоканальное – «память», двухпозиционное – «логический ключ». Использование «устройства» для синтеза МОУ невозможно, так как оно является одноканальным и может занимать только одним транзактом, имитирующим ЕО, что противоречит требованию 3 к МОУ в МПМД. Целесообразно проанализировать возможность синтеза МОУ, отвечающей требованиям 1–6, с использованием многоканального объекта «память». Требования 1, 2, 5, 6 определяют правила поведения МОУ как элемента сетевой модели ССМО, поэтому на первом этапе синтеза модели необходимо выполнить требования 3 и 4. Требование 3 предполагает реализацию одновременного обслуживания в МОУ нескольких транзактов-порций  $Z_{i,j}$ , возможное количество которых зависит от соотношения производительности ОУ –  $\Pi_m$  и суммарной интенсивности порций

заявок на его входе –  $\lambda_m$ . Существенно, что  $\lambda_m$  определяется интенсивностью ЕО на интервале  $p_{i,j}$  и количеством  $p_{i,j}$  на входе ОУ. Такое представление потока заявок позволяет предложить следующий искусственный прием к использованию объекта «память» для синтеза МОУ:

– емкость памяти задается командой (здесь обозначение mou2 определено как имя памяти):

mou2 storage  $\Pi_m * K^1$ ;

– занятие памяти с именем mou2 транзактом  $Z_{i,j}$  выполняется оператором

enter mou2, ( $p4 * K$ ).

Возможность занятия МОУ транзактом  $Z_{i,j}$  проверяется оператором

test ge r\$mou2, ( $p4 * K$ ), nucopit2.

Это означает, что при выполнении условия достаточности текущего количества элементов r\$mou2 транзакт займет память mou2, а в противном случае будет направлен в накопитель с именем nucopit2.

Таким образом, общее количество элементов памяти определяется производительностью ОУ, а количество занимаемых элементов при входе  $Z_{i,j}$  – интенсивностью ЕО (параметр  $p4$  транзакта), на интервале которого задана  $p_{i,j}$ . Коэффициент  $K$  масштабирует значения  $\Pi_m$  и  $\lambda_{i,j}^c$  до целых значений с требуемой точностью, так как выполнение процедур с «памятью» возможно только с целочисленными значениями количества элементов. Значение коэффициента  $K$  должно быть одним и тем же для всех МОУ, входящих в МПМД конкретной системы. Предложенный подход обеспечивает выполнение требования 3 следующим образом. Вошедший в оператор enter транзакт  $Z_{i,j}$  занимает  $p4 * K$  элементов памяти mou1. Значение  $\Pi_m$  заносится в ячейку памяти x1 оператором (своя ячейка для каждой МОУ)

savevalue 1,  $\Pi_m$ .

Выражение для задания времени обслуживания  $Z_{i,j}$  заносится в p10 оператором

Assign 10, ( $p5/x1$ ),

а затем значение p10 используется как операнд оператора задержки

<sup>1</sup> Символ «\*» в системе GPSS обозначает знак умножения.

advance p10.

$Z_{i,j}$ , вошедший в оператор advance, помещается на время задержки в список будущих событий, чем имитируется процесс обслуживания  $p_{i,j}$  ОУ.

Возможны следующие ситуации:

1. Процесс обслуживания полностью выполняется.  $Z_{i,j}$  переводится из списка будущих в список текущих событий и продвигается далее в соответствии с сетевой моделью исследуемой системы.

2. Во время задержки  $Z_{i,j}$  на вход МОУ поступает транзакт  $Z_{i+1,j}$ , для которого  $p4_{i+1,j} * K > \Pi_m * K - p4_{i,j} * K$ , т.е. соотношение  $\lambda < \Pi_m$  не выполняется и, следовательно, одновременное обслуживание  $Z_{i,j}$ ,  $Z_{i+1,j}$  невозможно.

3. Во время задержки данного  $Z_{i,j}$  на вход МОУ поступает транзакт  $Z_{i+1,j}$ , для которого выполняется условие  $p4_{i+1,j} * K \leq \Pi_m * K - p4_{i,j} * K$ , т.е. оставшееся после занятия памяти mou2 транзактом  $Z_{i,j}$  количество элементов достаточно для разрешения на вход модели  $u_m$  транзакта  $Z_{i+1,j}$  по соотношению  $\lambda_m \leq \Pi_m$ .

Первая ситуация наиболее проста и на ее примере целесообразно рассмотреть выполнение процедур с транзактами для трех последовательно занимаемых и освобождаемых МОУ, имеющих имена mou1, mou2, mou3, с учетом возможных связей в сетевой модели ССМО. По входу транзакта в МОУ надо учесть, что одна заявка-порция  $p_{i,j}$  содержит  $K_{i,j}$  заявок-ЕО. Это означает, что при занятии данного ОУ первый ЕО будет обслужен за время  $1/\Pi_m$  ( $1/x1$ ), и, следовательно, занимая данное устройство,  $p_{i,j}$  должна занять и следующее и так далее в зависимости от соотношения  $\Pi_m$  устройств в многофазной ветви. Однако, представление  $p_{i,j}$  транзактом  $Z_{i,j}$  не позволяет напрямую решить поставленную задачу, так как динамический объект GPSS – транзакт не может одновременно обрабатываться двумя и более операторами. Решением является расщепление основного транзакта  $Z_{i,j}$  оператором split, т.е. создание его копий. Следует отметить, что основной транзакт для всех МОУ, кроме непосредственно связанных со входами, является копией полученной в результате расщепления оператором split для модели предыдущего  $u_m$ . Основной транзакт  $Z_{i,j}^o$  для модели ССМО в целом создается только оператором generate для каждого  $j$ -го входа ССМО и образует одно семейство:  $Z_{i,j}^o$ ,  $Z_{i,j}^{k+1}$ , ...,  $Z_{i,j}^{k+n}$ . Операторами assign в параметры p1-p5  $Z_{i,j}^o$  заносятся соответствующие данные, которые сохраняются без изменений для всех копий. Далее в сетевой модели, в соответствии с приведенными выше правилами занятия МОУ в GPSS-модели, обрабатываются копии и копии копий основных транзактов.

Перед выполнением процедуры расщепления необходимо, как было указано выше, выполнить проверку достаточности текущего объема памяти mou2 оператором tetst. Оператор split модели mou1 создает копию транзакта  $Z_{i,j}^{k+1} - Z_{i,j}^{k+2}$ , которая направляется на оператор split следующей модели mou2 с задержкой оператором advance ( $1/x1$ ).

Основной транзакт  $Z_{i,j}^{k+1}$  без задержки входит в оператор [enter mou1, (p4\*K)], тем самым занимается модель с именем mou1.

В модели mou2 свой оператор split создает копию  $Z_{i,j}^{k+2} - Z_{i,j}^{k+3}$ . Далее  $Z_{i,j}^{k+2}$  занимает mou2, а  $Z_{i,j}^{k+3}$  с требуемой задержкой  $1/\Pi_m$  и проверкой возможности занятия mou3 передается оператору split модели mou3 и т. д. Таким образом реализуется процесс занятия МОУ в сетевой модели ССМО основным транзактом  $Z_{i,j}^0$ , поступившим на  $j$ -й вход системы.

Организация освобождения МОУ с именем mou2 рассматривается для той же цепочки из трех последовательно обслуживающих транзакты МОУ с именами mou1, mou2, mou3.

Освобождение mou2 выполняется с учетом расщепления  $Z_{i,j}$  при соблюдении двух условий:

- транзакт  $Z_{i,j}^{k+2}$ , занимающий память mou2, выводится оператором advance, по окончании времени обслуживания из списка будущих событий;
- транзакт  $Z_{i,j}^{k+1}$ , занимающий память mou1, выведен оператором advance по окончании времени обслуживания из списка будущих событий и освободил  $p4*K$  элементов «памяти» оператором

leave mou1, (p4\*K).

Транзакты  $Z_{i,j}^{k+2}$  и  $Z_{i,j}^{k+1}$  при выполнении указанных условий передаются оператору

assemble 2.

Этот оператор объединяет транзакты  $Z_{i,j}^{k+2}, Z_{i,j}^{k+1}$ , принадлежащие одному семейству в один  $Z_{i,j}^{k+2}$ . Далее  $Z_{i,j}^{k+2}$  как основной передается оператору

leave mou2, (p4\*K).

Данный оператор освобождает  $p4*K$  элементов памяти mou2, и, следовательно,  $Z_{i,j}^{k+2}$  освобождает МОУ с тем же именем. Далее транзакт  $Z_{i,j}^{k+2}$  передается оператору assemble модели mou3 и процедуры освобождения повторяются для этой модели.

Вторая ситуация предполагает, что проверка выполняемая оператором

est2 test ge r\$mou2, (p4\*K), nucopit2,

не удовлетворяет заданному условию, т. е. текущее количество свободных элементов «памяти» mou2 недостаточно для разрешения на вход транзакта  $Z_{i,j}^{k+2}$ . В этом случае  $Z_{i,j}^{k+2}$  направляется в накопитель  $h_m$  по метке nucopit2, в качестве которого естественно использовать один из объектов GPSS – список пользователя с именем nuc2, обеспечивающий группирование транзак-

тов по признаку образования очереди на обслуживание МОУ с именем  $моу_2$  (каждой МОУ в модели ССМО может соответствовать накопитель со своим именем). Эта процедура выполняется оператором

nucopit2 link nuc2, fifo.

Вывод  $Z_{i,j}^{k+2}$  из списка nuc2 осуществляется оператором

unlink nuc2, est2,1.

При входе в этот оператор транзакта, ранее занимавшего  $моу_2$ , после выполнения процедуры ее освобождения [leave  $моу_2$ , ( $p4 * K$ )], из списка пользователя nuc2 выводится  $Z_{i,j}^{k+2}$  и направляется по метке est2 в оператор test, т. е. снова на вход модели  $моу_2$ . Процедуры занятия и освобождения МОУ транзактами выполняются по первой ситуации.

Третья ситуация возникает в случае поступления транзакта  $Z_{i+1,j}$  на вход МОУ ранее занятой  $Z_{i,j}$ , причем выполняется условие  $p4_{i+1,j} * K \leq \Pi_m * K - p4_{i,j} * K$ , и, следовательно  $Z_{i+1,j}$  может занять МОУ одновременно с  $Z_{i,j}$ . Это означает необходимость перерасчета времени задержки. Транзакт  $Z_{i,j}$  находится в списке будущих событий, неактивен и напрямую недоступен для изменения параметров, в том числе времени задержки, заданном в поле А оператора advance. Для решения задачи необходимо:

- а) вывести  $Z_{i,j}$  из списка будущих событий;
  - б) определить оставшееся время задержки с момента входа  $Z_{i+1,j}$ ;
  - в) рассчитать изменяемое время совместной задержки  $Z_{i,j}$  и  $Z_{i+1,j}$ ;
  - г) определить оставшееся время задержки  $Z_{i+1,j}$ .
- Подзадачи а, б решаются с помощью оператора

displace x\$nom2, vremi,10.

Предварительно при входе транзакта  $Z_{i,j}$  в МОУ оператором

savevalue nom2, xn1

в ячейку x\$nom2 записывается номер транзакта  $Z_{i,j}$  (xn1). Оператор displace при входе в него  $Z_{i+1,j}$  извлекает из списка будущих событий  $Z_{i,j}$ , в параметр p10 записывается оставшееся время задержки  $\Delta t_o$ , а  $Z_{i,j}$  направляется по метке vremi для перерасчета оставшегося времени с учетом одновременности обслуживания обоих транзактов. Оператором

savevalue zam, p10

сохраняется значение оставшейся задержки  $Z_{i,j}$  для перерасчета времени обслуживания  $Z_{i+1,j}$ .

Для упрощения описания и с небольшой потерей точности пусть переопределенное время  $\Delta t_r = 2 * \Delta t_o$ , тогда значение параметра  $p10$  переопределяется оператором

assign 10, (p10\*2).

После этого транзакт  $Z_{i,j}$  передается оператору advance, который возвращает его в список будущих событий с задержкой  $\Delta t_r$ .

Перерасчет времени задержки для транзакта  $Z_{i+1,j}$  выполняется на основе аналогичных рассуждений при его входе в оператор

assign 10, ((p10-x\$zam)+2\*x\$zam).

В результате выполнения данного оператора транзакт  $Z_{i+1,j}$  входит в МОУ с переопределенным временем задержки. Последовательность процедур занятия и освобождения МОУ выполняется аналогично первой ситуации.

Следует отметить, что на основе приведенных положений МОУ могут настраиваться на любое количество одновременно обслуживаемых заявок-порций при любом их взаиморасположении на оси времени.

В результате выполненной работы получена МОУ, удовлетворяющая требованиям 1–5.

Реализация требования 6 обеспечивает организацию взаимодействия МОУ в сетевой модели ССМО. Переход транзактов в сети может быть безусловным или выполняться в зависимости от значений логических условий  $\alpha, q, g, \beta$ .

Условия  $\alpha, q, g$  выполняются логическими операторами GPSS: gate, test, transfer, в операндах которых записываются логические функции  $f(x)$  и идентификаторы операторов к которым переходит транзакт при различных значениях  $f(x)$  в соответствии с маршрутом транзакта в сетевой модели ССМО. Особенностью вероятностного условия  $\beta$  является разделение входящего транзакта на два с записью операторами assign в  $p5$  основного транзакта значения  $Kp_{i,j} * \theta$ , а транзакта-копии  $Kp_{i,j} - Kp_{i,j} * \theta$ , где  $\theta$  – вероятность дробления  $Kp_{i,j}$ . Разделение транзактов осуществляется оператором split, в операндах которого указывается количество создаваемых копий (в данном случае 1), и идентификатор оператора, к которому переходит транзакт-копия, а именно к следующей по маршруту транзакта МОУ.

## Заключение

Предложенная в данной работе МОУ на основе порционной формализации потоков заявок позволяет решить задачу синтеза сетевой модели как

модели порционного динамического моделирования ССМО при сокращении в десятки раз затрат машинного времени на выполнение серий имитационных экспериментов. Сокращение затрат машинного времени очевидно и достигается за счет уменьшения количества событий в GPSS-модели пропорционально количеству единичных объектов  $K_{i,j}$ , включенных в одну заявку-порцию. Синтез сетевой модели на основе МОУ обеспечивается возможностью их сопряжения различного вида условными и безусловными связями.

В процессе работы получены следующие результаты:

- сформулированы требования к МОУ заявок-порций;
  - предложено в качестве основы МОУ использовать объект оборудования языка GPSS – память;
  - предложено соотносить производительность ОУ и интенсивность единичных объектов потоков заявок с объемами памяти;
  - на основе использования памяти предложены решения по выполнению одновременного обслуживания нескольких заявок-порций МОУ и перерасчету времени их обслуживания, одновременному занятию нескольких МОУ одной заявкой-порцией с организацией их последовательного освобождения по соотношению производительности обслуживающих устройств;
  - определены средства GPSS для моделей логических устройств различного вида, обеспечивающих взаимодействие МОУ в сетевых моделях ССМО.
- Перспективные направления работ:
- развитие МОУ для обеспечения их адекватности различным реальным обслуживающим устройствам, например эскалаторам метрополитена;
  - разработка библиотек МОУ для синтеза МПДМ на основе матричной формализации имитационных моделей ССМО;
  - разработка имитационной модели пересадочного узла метрополитена как МПДМ на основе МОУ;
  - выполнение операционных исследований пересадочных узлов метрополитена на МПМД в целях оценки адекватности модели и выработки практических рекомендаций по организации работы устройств пересадочных узлов.

## Библиографический список

1. Василенко М. Н. Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, К. Г. Сорокин // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем ж.-д. автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. ПГУПС. – СПб., 2003. – С. 17–25.
2. Марков Д. С. Определение загрузки станций и узлов Петербургского метрополитена в экспертной системе / Д. С. Марков, В. А. Яковлев, В. Б. Соколов //

- Сборник научных трудов «Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация». – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – С. 45–50.
3. Марков Д. С. Метод порционного моделирования транспортных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, В. Б. Соколов // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. тр. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2014. – С. 43–47.
  4. Лыков А. А. Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ / А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, С. В. Власенко // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 5. – С. 67–72.
  5. Ефанов Д. В. Некоторые аспекты развития систем функционального контроля устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Транспорт Урала. – 2015. – № 1. – С. 35–40.
  6. Ефанов Д. В. Становление и перспективы развития систем функционального контроля и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 124–148.
  7. Нестеров В. В. Развитие систем СТДМ, АСУ-Ш-2 и АОС-ШЧ / В. В. Нестеров // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 12. – С. 45–46.
  8. Советов Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высшая школа, 2001. – 343 с.
  9. Лазарев В. Г. Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
  10. Марков Д. С. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Д. С. Марков, А. А. Лыков // Известия ПГУПС. – 2012. – № 1. – С. 23–28.
  11. GPSS WORLD. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 317 с.

*Petr E. Bulavsky,  
Dmitry S. Markov,  
Vadim B. Sokolov,  
Valery A. Sokolov*

«Automation and remote control on railways» department  
Petersburg state transport university

### **Synthesis of GPSS-model of service devices of complex queuing systems, based on the batchwise formalization**

The article proposes a GPSS model of servers (MOU) of complex queuing systems (SSMO) based on the batchwise formalization of application arrivals.

MOU is a development of the batch dynamic simulation method (MPDM) in order to provide the possibility of assessment not only the boot options of SSMO and its devices, but also the timing characteristics of application service process. The requirement of timing characteristics assessment for applications service process defines the necessity of taking into account the following states of MOU: the occupation of one application-batch of several device models in multi-phase branch at the same time; the occupation of one MOU by several applications-batches at the same time; the direction of application-batch to the drive when it is impossible to take MOU by the ration of server performance and the intensity of the input stream. To simulate these states in GPSS framework the article proposes to use multi-channel “memory” hardware object, on the basis of which the application-batch service MOU is synthesized. MPDM, based on MOU library enables to operational research to evaluate the full range of SSMO performance characteristics while reducing computing time costs by tens of times. The article shows that a promising object of research for the purpose of verification of MPDM adequacy and for obtaining practical advice for the organization of operation modes of servers are the service processes of passenger traffic in subway interchange hubs.

complex queuing systems, batch of application, batch dynamic simulation method, model of service devices, network SSMO model

### References

1. Vasilenko M. N., Markov D. S., Sokolov V. B., Sorokin K. G. (2003). Simulation model of passenger handling for subway [Imitatsionnaya model' obsluzhivaniya passazhiropotokov na metropolitene], Engineering, certification and technical operation of railway automation and remote control devices and systems, collection of scientific papers of PTSU (Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustroystv i sistem zh. d. avtomatiki i telemekhaniki: sbornik nauchnykh trudov PGUPS), St. Petersburg, pp. 17–25.
2. Markov D. S., Yakovlev V. A., Sokolov V. B. (2009). Density of load determination for station and hubs of Petersburg subway by using consulting program [Opredele-niye zagruzki stantsiy i uzlov Peterburgskogo metropolitena v ekspertnoy sisteme]. Collection of scientific papers «Automation and remote control of Russian railways. Engineering, technology, certification». (Sbornik nauchnykh trudov «Avtomatika i telemekhanika zheleznnykh dorog Rossii. Tekhnika, tekhnologiya, sertifikatsiya.») PSTU (PGUPS), pp. 45–50.
3. Markov D. S., Sokolov V. B. (2014). Method of batchwise simulation of queuing transportation systems [Metod portsiionnogo modelirovaniya transportnykh sistem massovogo obsluzhivaniya], Development of element base and improvement of methods for building the railway automation and remote control. Collection of scientific papers (Razvitiye elementnoy bazy i sovershenstvovaniye metodov postroyeniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki. Sbornik nauchnykh trudov), pp. 43–47.

4. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. (2012). Technical diagnosis and monitoring of ZhAT devices state [Tekhnicheskoye diagnostirovaniye i monitoring sostoyaniya ustroystv ZhAT], Transport of the Russian Federation (Transport Rossiyskoy Federatsii), issue 5 (42), pp. 67–72.
5. Efanov D. V. (2015). Some aspects of developing of concurrent error detection systems of railway automation and remote control devices [Nekotoryye aspekty razvitiya sistem funktsional'nogo kontrolya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki], Ural Trasport (Transport Urala), issue 1, pp. 35–40.
6. Efanov D. V. (2016). Formation and future of development of concurrent error detection and monitoring systems of railway automation and remote control devices [Stanovleniye i perspektivy razvitiya sistem funktsional'nogo kontrolya i monitoringa ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki], Transport automation (Avtomatika na transporte), vol. 2, issue 1, pp. 124–148.
7. Nesterov V. V. (2012). Development of STD, ASU-Sh-2 and AOS-ShCh systems [Razvitiye sistem STD, ASU-Sh-2 i AOS-ShCh], Automation, communication, information science (Avtomatika, svyaz', informatika), issue 12, pp. 45–46.
8. Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A. (2001). System simulation [Modelirovaniye sistem], Moscow, Higher education institutions (Vysshaya shkola), 343 p.
9. Lazarev V. G., Piyl' E. I. (1984). Synthesis of control automata [Sintez upravlyayushchikh avtomatov], Energoatomizdat, 328 p.
10. Markov D. S., Lykov A. A. (2012). Method for formalization of simulation models of technological processes within railway transport automation and remote control facilities [Metod formalizatsii imitatsionnykh modeley tekhnologicheskikh protsessov v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte], Proceedings of PSTU (Izvestiya PGUPS, issue 1, pp. 23–28.
11. Kudryavtsev E. M. (2004). GPSS WORLD. Fundamentals of simulation modelling of different systems [Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem], Moscow, DMK Press, 317 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским  
Поступила 16.05.2016, принята к публикации 17.06.2016*

*БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.  
e-mail: pbulavsky@gmail.com

*МАРКОВ Дмитрий Спиридонович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.  
e-mail: MDS1945@yandex.ru

*СОКОЛОВ Вадим Борисович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.  
e-mail: SVB9@yandex.ru

*СОКОЛОВ Валерий Александрович* – старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.  
e-mail: valerasok@bk.ru

© Булавский П. Е., Марков Д. С., 2016

© Соколов В. Б., Соколов В. А., 2016