

УДК 656.25

П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. СоколовПетербургский государственный университет путей сообщения
императора Александра I**МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО ПОРЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СЛОЖНЫХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Описан метод динамического порционного моделирования (МПМД) в области технологических процессов обеспечения движения поездов. Разработана обобщенная формализованная схема (ОФС) описания ССМО, формализуемых с помощью МПМД для систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Приведены характеристики потока порций заявок, структурно-алгоритмическое и параметрическое отображение ССМО для МПМД. Предложена методика описания процессов обслуживания заявок в ОФС с использованием параллельных логических схем алгоритмов. Предложены концепция и средства построения МПМД-G в среде GPSS World.

Сложные системы массового обслуживания, порционное динамическое моделирование, обобщенная формализованная схема, параллельные логические схемы алгоритмов.

Математическая схема массового обслуживания является самым распространенным подходом к исследованию сложных дискретных процессов со случайными переменными методом имитационного моделирования (ИМ). Именно такой подход широко распространен в исследованиях перевозочного и технологических процессов обеспечения движения поездов на железнодорожном транспорте и метрополитене [4, 7]. Имитационное моделирование сложных систем массового обслуживания (ССМО) в области железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) выполнили сотрудники кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» ПГУПС [1, 3].

В качестве заявок в ИМ рассматриваются единичные объекты, например, подвижные единицы, технические документы, информационные сообщения, электрические сигналы и т. п. Это позволяет получить оценки всего спектра операционных показателей ССМО, включая временные характеристики обслуживания заявок. Однако такой подход предполагает разработку сложных программных комплексов даже при использовании специализированных систем моделирования, таких

как GPSS World, и требует больших затрат машинного времени на имитационные исследования. В то же время множество ССМО имеют следующие свойства: отдельные заявки имеют малый вес в процессе обслуживания; количество заявок, поступающих на входы системы и находящихся в процессе обслуживания, велико и распределено неравномерно во времени; система обслуживания представляет собой сложную сеть с большим количеством разнородных обслуживающих устройств и накопителей; маршруты обслуживания заявок разнообразны и сложны. К системам такого класса относятся: железнодорожная сеть по перевозкам грузов и пассажиров; метрополитены по обслуживанию пассажиропотоков; системы технической диагностики и удаленного мониторинга устройств СЖАТ по обработке диагностических и измерительных сообщений; автоматизированные системы управления организационно-технологического типа в хозяйстве железнодорожной автоматики и телемеханики (АСУ-Ш) по обработке информационных сообщений от линейных предприятий и т. п. Важнейшие задачи операционных исследований таких систем: определение

узких мест в процессе обслуживания заявок, оценка дефицита (профицита) емкостей накопителей и пропускной способности обслуживающих устройств с учетом плановых ремонтов и отказов, определение наличия и оценка характеристик очередей заявок. Решить эти задачи можно более эффективными методами формализации имитационных моделей, исключая необходимость в программных средствах организации и ведения различных списков состояний заявок.

Основные положения

Авторы предлагают метод имитационного моделирования указанного класса систем, основанный на понятии «порция» заявок – метод порционного моделирования (МПМ) ССМО [6].

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

В [6] предложена версия МПМ, основанная на расчете операционных характеристик ССМО по пропускным способностям устройств, действовавших в обслуживании заявок. Эта версия имеет следующие недостатки:

- не учитывает влияние результатов обслуживания порций P_i на процесс обслуживания порций P_{i+1} ;
- невозможно оценить временные характеристики процессов обслуживания заявок в ССМО.

Первый недостаток означает невозможность анализа операционных характеристик загрузки ССМО в динамике, так как для каждого периода ΔT_i процесс рассматривается как законченный и, следовательно, нет привязки к текущему времени t , что особенно важно при изучении систем с неравномерной во времени нагрузкой $\lambda_t = f(t)$.

Второй недостаток является скорее не недостатком, а свойством МПМ. Однако попытка учесть временные параметры обслуживания заявок на уровне порций $\tau_{i,j}^0$ представляется целесообразной, поскольку позволяет оценить не только операционные характеристики загрузки ССМО, но и – в какой-то степени – временные затраты на обслуживание заявок.

Следует отметить, что сформулированные задачи можно решить в рамках парадигмы МПМ, но с организацией ведения времени обслуживания порций $p_{i,j}$, что предполагает разработку динамической модели – МПМД.

Формализованная схема МПМД

Содержательное описание ССМО в [2] предложено выполнять на основе обобщенной формализованной схемы (ОФС), которая строго определяет состав и форму представления информации для синтеза ИМ конкретных систем. ОФС с учетом последействия порций включает: описание внешней среды в виде потока порций заявок P_i ; $i = \overline{1, I}$; структурно-алгоритмическое (Sa) и параметрическое (Pr) описания ССМО, в том числе характеристики (расположение в системе и емкость) накопителей. Именно ввод в ОФС накопителей в явном виде позволяет организовать в ИМ учет влияния P_i на обслуживание P_{i+1} (последействие).

Характеристика потока порций заявок P_i

Порция P_i характеризуется размером Kp и временем поступления в систему t_i . Размер порции Kp может принимать значение от единицы $Kp = 1$ до полного количества заявок в потоке за период моделирования T $Kp = Kp_T$. Например, при оценке качества обслуживания пассажиропотоков метрополитеном величина Kp определялась для «особенных» интервалов времени, таких как периоды наибольшей и наименьшей интенсивности входных пассажиропотоков, т. е. $1 < Kp < Kp_T$.

Момент t_i поступления порции P_i не связан с реальным поступлением какой-либо заявки

и означает начало интервала ΔT_i , за который рассчитывается Kp_i . Очевидно, что количество заявок в порции Kp_i определяется величиной интервала $\Delta T_i = t_{i+1} - t_i$ до поступления следующей порции P_{i+1} , средней интенсивностью потока λ^c на интервале ΔT_i , моментом t_i поступления в ССМО, т. е. его положением на оси времени при неравномерном потоке заявок $\lambda_i = f(t)$. Величину ΔT_i пользователь выбирает в соответствии с задачами исследований с учетом вида зависимости $\lambda_i = f(t)$, она может быть неодинакова для разных значений t_i . Кроме того, при выборе величины ΔT_i необходимо учитывать предварительные оценки времени обслуживания заявок в ССМО. Таким образом, входной поток заявок в МПМ аппроксимируется порциями P_i , поступающими в ССМО через заданные интервалы времени по всем входам системы.

Структурно-алгоритмическое и параметрическое отображение ССМО

Структурно-алгоритмическое отображение ССМО включает: формализованное описание множества подсистем, элементов, накопителей и учитываемых в конкретных исследованиях связей между ними; алгоритмическое описание процессов обслуживания P_i . Основой структурно-алгоритмического отображения ССМО в МПМД является алгоритмическое описание процессов обслуживания порций P_i на языке параллельных логических схем алгоритмов (ПЛСА) [5], имеющем средства представления операций и логических условий, достаточные для моделирования различных дискретных процессов на железнодорожном транспорте. Структура моделируемой системы в этом случае задается в МПМД неявно в виде установленных соотношений между множеством выполняемых системой операций по обслуживанию заявок и выполняющих их обслуживающих устройств, в качестве которых рассматриваются элементы и накопители ССМО. Приведенные положения позволяют формализовать Sa в следующем виде:

$$Sa = \{A_n [O, \mathcal{E}, Q, G, R, \&, \Omega]; U, H\},$$

где A_n – n -й алгоритм обслуживания порций $n = \overline{1, N}$, где N – общее количество алгоритмов, рассматриваемых в конкретном исследовании; O – множество выполняемых системой операций o_v ; $v = \overline{1, V}$, где V – общее количество рассматриваемых операций; \mathcal{E} – множество ждущих логических условий α_k ; $k = \overline{1, K}$, где K – общее количество рассматриваемых ждущих логических условий; Q – множество собственно-логических условий q_l ; $l = \overline{1, L}$, где L – общее количество рассматриваемых собственно-логических условий; G – множество вероятностных логических условий g_s ; $s = \overline{1, S}$, где S – общее количество рассматриваемых вероятностных логических условий; $R, \&, \Omega$ – вспомогательные операторы распараллеливания, объединения параллельных ветвей A_n и тождественно-ложные логические условия, соответственно; U – множество обслуживающих устройств u_m ; $m = \overline{1, M}$, где M – общее количество рассматриваемых обслуживающих устройств; H – множество накопителей h_z ; $z = \overline{1, Z}$, где Z – общее количество рассматриваемых накопителей.

Каждому обслуживаемому устройству $u_m \in U$ сопоставляется подмножество выполняемых операций $O_m \in O$. Аналогичным образом каждому накопителю в ПЛСА A_n ; $n = \overline{1, N}$ ставится в соответствие множество операций $O_z \in O$, контролирующее длину очереди в соответствующем h_z ; $z = \overline{1, Z}$. Установление в МПМ указанных соответствий однозначно отображает структуру моделируемой ССМО в отношении цели моделирования.

Параметрическое отображение ССМО в МПМД

Такое отображение включает

$$P_r = \{\lambda_{i,j}^c; \Pi_{v,m}; \lambda_{i,m}^c; \tau_{v,m}^i; W_z; \tau_z^i; \theta_s\},$$

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

$\Pi_{v,m}$ – производительность m -го устройства по выполнению v -й операции (количество заявок, обслуживаемых устройством в единицу времени); $\lambda_{i,m}^c$ – средняя интенсивность потока заявок на входе m -го устройства на i -м интервале; $\tau_{v,m}^i$ – время обслуживания i -й порции m -м устройством по выполнению v -й операции; W_z – емкость z -го накопителя h_z ; $z = \overline{1, Z}$ (максимально допустимое количество заявок в накопителе); τ_z^i – время пребывания i -й порции в z -м накопителе (без учета времени ожидания в очереди); θ_s – вероятности выполнения вероятностных логических условий g_s ; $s = \overline{1, S}$.

Концепция синтеза МПМД

Метод динамического порционного моделирования ССМО формализуется на основе следующих положений:

- время моделирования ССМО разбивается на интервалы, причем величина ΔT_i ; $i = \overline{1, I}$ принимается одной и той же для всего множества входов $j = \overline{1, J}$. Величина ΔT_i для значений i может быть различной в зависимости от задач моделирования и вида зависимости $\lambda_i = f(t)$;

- каждому j -му входу для каждого i -го интервала приписывается порция $p_{i,j}$, время поступления которой в ССМО t_p , а величина $Kp_{i,j} = \lambda_{i,j}^c \cdot \Delta T_i$;

- обработка порций $p_{i,j}$ в МПМД соответствует ПЛСА A_n ; $n = \overline{1, N}$. В частном случае $n = j$, т. е. для каждого входа ССМО, обслуживание $p_{i,j}$ выполняется по своему алгоритму. Для реальных систем, как правило, характерно наличие общих частей различных A_n , поэтому синтез МПМД должен включать этап объединения ПЛСА таких алгоритмов [2]. Последовательность выполнения операций o_v ; $v = \overline{1, V}$ в каждой конкретной реализации A_n определяется значениями логических условий α_k , $k = \overline{1, K}$; q_l , $l = \overline{1, L}$; g_s , $s = \overline{1, S}$.

Ждущие логические условия:

$$\alpha_k = 1 \text{ при } f(x) = 1;$$

собственно-логические условия:

$$q_l = \begin{cases} 1 - \text{при } f(x) = 1 \\ 0 - \text{при } f(x) = 0 \end{cases};$$

вероятностные логические условия:

$$g_s = \begin{cases} 1 - \text{с вероятностью } \theta \\ 0 - \text{с вероятностью } 1 - \theta \end{cases},$$

где $f(x)$ – логическая функция от состояния обслуживающих устройств, загрузки накопителей и т. п. Все указанные логические условия определяют либо задержку обслуживания (α_k), либо изменение последовательности выполнения операций (q_l, g_s) в ПЛСА A_n . Однако для моделирования ССМО на основе порций P_i необходимо ввести в алфавит ПЛСА дополнительные вероятностные логические условия вида $g_s^d(\theta)$. Выполнение логического условия $g_s^d(\theta)$ означает, что $Kp_i \cdot \theta$ заявок порции P_i перейдет к следующей операции ПЛСА, а $Kp_i - Kp_i \cdot \theta$ – к операции по ссылке. Иначе говоря, $g_s^d(\theta)$ делит порцию на две составляющие заявки с Kp_i , пропорционально вероятности θ . Маршрут обслуживания порции может включать множество $g_s^d(\theta)$. В этом случае для каждой составляющей $p_{i,j}$ на выходе ССМО должна определяться соответствующая оценка $\tau_{i,j}^0$;

- время обслуживания заявок $\tau_{i,j}^0$ в МПМД складывается из времени выполнения операторов ПЛСА обслуживающими устройствами и времени ожидания обслуживания. Ожидать обслуживания можно по следующим причинам: из-за очередей на обслуживание устройствами или их группой; отказа и последующего восстановления или замены отказавшего устройства; выполнения регламентных работ по техническому обслуживанию; отсутствия обслуживающего устройства в момент прихода заявки. Первые три причины очевидны и не требуют пояснений. Четвертая характерна для транспортных систем в тех случаях, когда в качестве обслуживающих устройств выступают подвижные единицы, например, поезда на железнодорожном транспорте и в метрополитене;

• операции o_v ; $v = \overline{1, V}$ выполняются обслуживающими устройствами u_m ; $m = \overline{1, M}$. ПЛСА A_n задает последовательность обращений к обслуживающим устройствам по соотношениям $O_m u_m$. Расчет времени выполнения операции o_v по обслуживанию порции $p_{i,j}$ или ее составляющей производится по выражению

$$\tau_{v,m}^i = Kp_{i,j} / \Pi_{v,m},$$

где $v = \overline{1, V}$, $m = \overline{1, M}$;

• время использования накопителя зависит от размера и количества $p_{i,j}$, находящихся в накопителе, и включает время его занятия в отсутствие очереди и время ожидания обслуживания при наличии очереди. В общем случае время использования зависит от пути следования заявки в накопителе и может поглощаться временем ожидания. Очередь в накопителе возникает при перегрузке следующего за ним в соответствии с ПЛСА A_n устройства. Величина $Q_{i,m}$; $m = 1, M$ определяется либо дефицитом $\Pi_{v,m}$ (наличием очереди), либо ее профицитом и рассчитывается по выражению

$$Q_{i,m} = (\lambda_{i,m}^c - \Pi_{v,m}) \cdot \Delta T_i.$$

Положительное значение $Q_{i,m}$ означает наличие очереди и ее величину, а отрицательное – наличие и величину профицита $\Pi_{v,m}$. В процессе моделирования ССМО с использованием МПМД величину $Q_{i,m}$ удобнее рассчитывать по выражению

$$Q_{i,m} = \sum Kp_{i,j,m} - \Pi_{v,m} \cdot \Delta T_i,$$

где $p_{i,j,m}$ – порция заявок, ожидающая освобождения устройства u_m .

Следует отметить, что в одной очереди $Q_{i,m}$ перед одним устройством u_m может находиться множество порций $p_{i,j,m}$ и их составляющих, поступивших на обслуживание в соответствии с ПЛСА A_n с разных входов ССМО и в результате разделения порций логическими условиями $g_s^d(\theta)$.

Принципы реализации концепции синтеза МПМД в среде GPSS World

На основе анализа формализованной схемы ССМО, предложенной концепции синтеза МПМД и возможностей инструментальных средств имитационного моделирования ССМО сформулированы предложения по синтезу МПМД в среде GPSS World (МПМД-G):

1. Порция заявок $p_{i,j}$ представляется динамическим объектом GPSS – транзактом, 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 ΔT_i ;
- P4 – величина $\lambda_{i,j}^c$;
- P5 – величина $Kp_{i,j}$ порции заявок по j -му входу для i -го интервала;

2. Ввод транзактов в МПМД-G выполняется подпрограммами генерации потоков заявок, построенными на основе операторов GENERATE и ASSIGN, в операнды которых заносятся значения ΔT_i (generate) и $j, t_i, \Delta T_i, \lambda_{i,j}^c, Kp_{i,j}$ в параметры P1–P5, соответственно (assign);

3. Обслуживающие устройства ССМО представляются в МПМД-G объектами обслуживания GPSS, одноканальные обслуживающие устройства u_m – «устройствами», а многоканальные – «элементами памяти». Занятие и освобождение объектов «устройство» транзактами выполняют операторы STIZE, RELEASE, в операнды которых записывается идентификатор соответствующего «устройства». Занятие и освобождение объектов «память» выполняют операторы ENTER, LEAVE, в операндах которых указываются идентификаторы «элементов памяти» и количество занимаемых и освобождаемых транзактом каналов многоканального устройства, соответственно. Таким образом, в МПМД-G осуществляется моделирование операций o_v ; $v = \overline{1, V}$;

4. Время занятия «устройств» и «элементов памяти» реализует оператор AVANCE, в операнды которого записывается значение $\tau_{v,m}^i$;

5. Накопители h_z ; $z = \overline{1, Z}$ представляются в МПМД-G объектом «список пользователя», в который транзакты вводятся при занятости соответствующих «устройств» или «элементов памяти» и образуют очередь $Q_{i,m}$. Ввод транзактов в список пользователя выполняется оператором LINK с учетом емкости накопителя W_z , а вывод – оператором UNLINK при освобождении «устройства» или «памяти». В операнды указанных операторов записываются идентификаторы и условия вывода транзактов из «списка пользователя» (link);

6. Логические условия α_k , $k = \overline{1, K}$; q_l , $l = \overline{1, L}$; g_s , g_s^d (θ), $s = \overline{1, S}$ 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 ПЛСА A_n . Особенностью вероятностного условия g_s^d (θ) является разделение входящего транзакта на два с записью в P5 основного транзакта значения $Kp_i \cdot \theta$, а транзакта-копии – $Kp_i - Kp_i \cdot \theta$. Разделение транзактов осуществляет оператор SPLIT, в операндах которого указывается количество создаваемых копий (в данном случае – 1) и идентификатор оператора, к которому переходит транзакт-копия;

7. Вспомогательные операторы R, &, Ω служат для организации записи параллельных процессов (R, &) и строчной записи ПЛСА (Ω). Операторы ПЛСА R, &, Ω выполняют в ПМД-G операторы GPSS: SPLIT, ASSEMBLE и TRANSFER, соответственно, в режиме безусловного перехода;

8. Определение времени пребывания транзактов в МПМД-G (времени обслуживания заявки в ССМО $\tau_{i,j}^0$) осуществляется средствами ведения модельного времени GPSS с использованием значения t_i в параметре P2 транзакта-порции;

9. Синтез МПМД-G как моделирующей программы на языке GPSS может осуществляться непосредственно по ПЛСА, а также с использованием матричной [1] или морфологической формализации имитационных моделей ССМО.

Заключение

Таким образом, в статье:

- поставлена задача развивать метод порционного моделирования до модели порционного динамического моделирования ССМО с оценкой времени обслуживания заявок – МПМД;
- предложены формализованная схема и концепция синтеза МПМД;
- сформулированы основные положения по синтезу МПМД в среде GPSS World – МПМД-G.

Перспективными направлениями развития предложенного метода МПМД являются:

- разработка моделирующего алгоритма МПМД-G;
- разработка и отладка моделирующей программы МПМД-G;
- верификация МПМД-G;
- разработка приложений в областях электронного документооборота технической документации систем железнодорожной автоматики (порция – комплект проектных документов), систем информационного обеспечения технологических процессов технической эксплуатации устройств железнодорожной автоматики (порция – совокупность информационных сообщений за ΔT_i), процессов обслуживания пассажиропотоков на метрополитене (порция – совокупность пассажиров за ΔT_i).

Библиографический список

1. Марков Д. С. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 4. – С. 186–195.
2. Булавский П. Е. Обобщенная формализованная схема ведения заказных спецификаций / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, Д. Х. Баратов // Изв. ПГУПС. – 2010. – Вып. 2. – С. 63–74.
3. Булавский П. Е. Электронный документооборот технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 2. – С. 2–5.

4. Василенко М. Н. Имитационная модель обслуживания пассажиропотоков на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, В. Б. Соколов и др. // Конструирование, сертификация и техническая эксплуатация устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2003. – С. 17–25.

5. Лазарев В. Г. Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. – М. : Энергия, 1984. – 408 с.

6. 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. : ПГУПС, 2014. – С. 43–47.

7. Марков Д. С. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Д. С. Марков, А. А. Лыков // Изв. ПГУПС. – 2012. – Вып. 1. – С. 23–28.

8. Марков Д. С. Определение загрузки станций и узлов Петербургского метрополитена в экспертной системе / Д. С. Марков, В. А. Яковлев, В. Б. Соколов // Автоматика и телемеханика железных дорог России. Техника, технология, сертификация : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2009. – С. 45–50.

УДК 621.39

А. К. Канаев, М. М. Лукичев

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

А. А. Муравцов

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного

СИНТЕЗ ПОТОКОВОЙ СТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривается формирование имитационной модели путем синтеза потоковой структуры и имитационного аппарата систем массового обслуживания на языке GPSS Word, позволяющее определить такие параметры качества транспортной сети, как математическое ожидание задержки пакетов, ее среднеквадратичное отклонение, а также гистограмму распределения задержки предложенной к рассмотрению сети связи. Кроме этого, модель позволяет определить участки сети, которые необходимо модернизировать, чтобы удовлетворить потребность пользователей в качественных показателях сети связи.

Имитационное моделирование, телекоммуникационные сети, пакетная коммутация, GPSS Word.

С увеличением потребности в высокоскоростном доступе к информационной среде в значительной степени увеличилась нагрузка на современные транспортные сети, возникли жесткие требования к показателям качества обслуживания в сети. Однако требуется не только определить текущее (проектируемое) состояние транспортной сети, но и рассмотреть ее

возможность сохранять заданные качественные показатели с увеличением потоков нагрузки.

Сегодня для определения вышеуказанных показателей используют:

- измерения и статический анализ реальной сети (если сеть передачи данных уже построена и находится в процессе развития);
- натуральное моделирование;