
Электронное моделирование

УДК 004.021+656.25

А. А. Лыков, канд. техн. наук

Д.С. Марков, канд. техн. наук

В. Б. Соколов, канд. техн. наук

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I, Санкт-Петербург

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Определена внешняя среда как объект формализации и моделирования в имитационных моделях систем обеспечения жизненного цикла (далее – системы) железнодорожной автоматики и телемеханики. Приведены состав и характеристики физических объектов – заявок на обслуживание системами, которые формализуются на основе различных подходов как сложные системы массового обслуживания. Сформулированы формализованные схемы внешней среды на основе представления различных систем открытыми, замкнутыми схемами массового обслуживания, а также с детерминированными потоками заявок. На этой основе предложена идея конструктора генераторов потоков заявок, включающего множество программных модулей, различные варианты соединения которых позволяют синтезировать генераторы с требуемыми для конкретных исследований свойствами.

В работе множество включает тринадцать модулей, для программирования каждого из которых выбраны объекты инструментального средства GPSS World. С использованием выбранных наборов объектов разработаны GPSS-программы всех тринадцати модулей, включенных в конструктор генераторов потоков заявок систем. Все модули прошли тестирование, а некоторые уже нашли практическое применение в реальных моделях, что позволило подтвердить правильность и эффективность предложенного подхода с точки зрения затрат времени на синтез и обеспечения адекватности моделей внешней среды систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики.

системы обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики, системы массового обслуживания, внешняя среда, заявка, формализованная схема, имитационная модель, конструктор генераторов потока заявок.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-356-374

Введение

Жизненный цикл (ЖЦ) объектов железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) – это совокупность взаимосвязанных, последовательно выполняемых процессов: формулирование исходных требований, разработка концепций, разработка технических и программных решений, доказательство безопасности, сертификация на безопасность или подтверждение соответствия, проектирование, изготовление аппаратных и программных средств, монтаж и пусконаладочные работы, ввод в эксплуатацию, технологическая и техническая эксплуатация, прекращение тиражирования и утилизация на конкретных объектах. Важнейшим и наиболее длительным этапом ЖЦ является технологическая и техническая эксплуатация, включая модернизацию ЖАТ. При этом безопасность и бесперебойность движения поездов определяются не только потребительскими свойствами, показателями безотказности и безопасности ЖАТ как изделия, но и в определяющей степени качеством систем обеспечения жизненного цикла (СОЖЦ) ЖАТ, к которым относятся:

- система технического обслуживания и ремонта систем и устройств ЖАТ;
- системы технической диагностики и удаленного мониторинга технического состояния (СТДМ) ЖАТ;
- системы электронного документооборота технической документации ЖАТ;
- автоматизированные системы управления хозяйством автоматики и телемеханики (АСУ-Ш).

Разработка и модернизация СОЖЦ ЖАТ предполагает выполнение операционных исследований с целью оценки эффективности принимаемых системотехнических решений [1, 2, 4, 5]. В [3, 4] показано, что процессы, выполняемые СОЖЦ, относятся к дискретным в непрерывном времени, а сами системы формализуются как сложные системы массового обслуживания (ССМО), обозначим S . Тогда для оценки СОЖЦ ЖАТ как ССМО применяются методы имитационного моделирования и имитационные модели (ИМ) [3–8]. В качестве инструментального средства реализации ИМ СОЖЦ ЖАТ традиционно используется моделирующая среда GPSS World [11].

1. Основные положения

В [3, 4] предложена обобщенная формализованная схема (ОФС) СОЖЦ ЖАТ как ССМО, включающая:

- модель внешней среды в виде вектора технологической нагрузки – потока заявок на обслуживание;

- структурно-алгоритмическое описание системы и процесса обслуживания заявок;
- параметрическое описание, включающее вероятностно-временные характеристики внешней среды и процесса обслуживания;
- множество операционных характеристик СОЖЦ ЖАТ.

Ранее авторами были предложены методы функционально-алгоритмической [5, 6], морфологической [3] и «порционной» [4, 7] формализации, позволившие существенно упростить и ускорить построение ИМ ССМО в среде GPSS World с одновременным повышением адекватности моделей СОЖЦ. В работах [3–9] представлены методы построения моделей собственно систем массового обслуживания, но недостаточно внимания уделено построению моделей внешней среды [10]. В данной работе модель внешней среды ограничивается генерацией потоков заявок, при этом не рассматриваются условия и характеристики среды функционирования СОЖЦ ЖАТ (климат, механические, электромагнитные воздействия и т. п.), которые влияют на параметры обслуживающих устройств и связей между ними. Данная работа направлена на восполнение указанного пробела и посвящена исследованию проблемы синтеза генераторов потоков заявок (ГПЗ) в имитационных моделях СОЖЦ ЖАТ.

Операционные исследования СОЖЦ подразумевают оценку влияния их свойств на показатели работоспособности и безопасности ЖАТ, например: коэффициенты технического использования и коэффициенты безопасности устройств и систем ЖАТ, которые, в свою очередь, влияют на показатели бесперебойности и безопасности движения поездов. В такой постановке необходимо в зависимости от целей конкретных исследований отображать в ИМ в требуемых сочетаниях следующие процессы:

- 1) движение подвижных единиц;
- 2) отказы технических средств ЖАТ;
- 3) ошибки оперативного персонала;
- 4) восстановление работоспособного состояния ЖАТ;
- 5) регламентное обслуживание устройств ЖАТ;
- 6) формирование, передачу и обработку измерительных, диагностических и информационных сообщений в СТДМ и АСУ-Ш;
- 7) проектирование объектов ЖАТ, их реализацию и техническую эксплуатацию на основе электронного документооборота технической документации (ЭДТД).

Процессу 1 соответствует заявка – подвижная единица на входе станции, сортировочной горки, перегона, участка железной дороги, которые в этом случае представляют собой открытые ССМО.

Процессу 7 соответствуют заявки на проектирование объектов ЖАТ. Это комплекты технических документов, разрабатываемые и обрабатываемые проектными и другими организациями ЭДТД, которые являются открытыми ССМО.

Процессу 6 соответствуют заявки-сообщения в системах СТДМ и АСУ-Ш, также являющихся открытыми ССМО.

Процессы 2 и 4 взаимосвязаны, т. к. возникающие отказы являются заявками на восстановление работоспособности устройств u и систем ЖАТ подразделениями дистанций сигнализации, которые в данном аспекте являются замкнутыми ССМО. В [3] введено понятие формализованной схемы отказа, включающей структурно-алгоритмическое описание поведения управленческого персонала, устройств и (или) систем при отказах элементов и подсистем ЖАТ; структурно-алгоритмическое описание процесса их восстановления, параметрические, т. е. вероятностно-временные характеристики обоих указанных процессов. Одному типу устройств u_m в конкретном исследовании может быть поставлено в соответствие множество отказов различного вида i , соответственно, множество схем отказов $Q_{m,j}$. Тогда заявкой при моделировании процессов 2 и 4 является инициатива на выполнение в ИМ конкретной схемы отказа.

Процессы 3, связанные с ошибочными действиями оперативных работников служб Д и Ш при технологической и технической эксплуатации ЖАТ, сложны, требуют отдельного анализа с точки зрения построения моделей потоков заявок-ошибок, но, предположительно, могут моделироваться по схеме замкнутых ССМО, схожих с моделями потоков заявок-схем отказов процессов 2 и 4. При этом схема «заявки–ошибки» включают только структурно-алгоритмическое и параметрическое описание поведения ЖАТ и управленческого персонала.

Процесс 5 характеризуется заявками-инициативами на выполнение профилактических работ $R_{m,l}$ в соответствии с технологическим процессом обслуживания устройств u_m , т. е. с жесткими временными рамками поступления заявок $R_{m,l}$ в ССМО – систему обслуживания ЖАТ. При этом поток $R_{m,l}$ формализуется как детерминированный. Следует отметить, что профилактические работы $R_{m,l}$ выполняются теми же подразделениями дистанций сигнализации, что и восстановительные после отказов устройств и систем.

Очевидно, что для всех процессов заявками (подвижные единицы, комплекты документации, инициативы на выполнение каких-либо работ, информационные сообщения, электрические сигналы и т. п.) с точки зрения схемы массового обслуживания являются инициативы на выполнение оборудованием ССМО соответствующего набора операций. Заявки могут быть одного (однородный поток) или разных типов (неоднородный поток). Для СОЖЦ ЖАТ характерны неоднородные потоки заявок, например: грузовые и пассажирские поезда; комплекты технических документов проектов электрической централизации, автоблокировки, автоматической переездной сигнализации; работы по техническому обслуживанию множества устройств ЖАТ и т. п. Понятие типа заявок при использовании схемы массового обслуживания имеет смысл только относительно различий процессов их обслуживания, а именно алгоритмов и (или) вероятностно-временных параметров выполнения операций аппаратными средствами ССМО. Кроме того, заявки различного типа могут по-разному вести себя при постановке и выборе из очереди на обслуживание, что в значительной мере определяется их приоритетами. В общем случае заявки в СО ЖЦ характеризуются типом, приоритетом и множеством свойств. Свойствами заявок различного вида могут являться, например, вес и длина поезда; вид, количество и объем документов в комплекте технической документации; структура и объем диагностических сообщений и т. п. Свойства заявок, как правило, определяют алгоритмические и (или) вероятностно-временные особенности обслуживания конкретных заявок данного типа.

2. Формализация модели внешней среды

Проведенный анализ позволяет формализовать схему внешней среды для СОЖЦ ЖАТ как открытых ССМО (процессы 1, 6, 7) в виде вектора технологической нагрузки:

$$V_T = [N; z_d^i; F(\tau); \lambda(t); P_{hi}(t); C_i^{BX}], \quad (1)$$

где N – множество заявок различного типа h_i , $I = \overline{1, I}$, обслуживаемых системой S (i – идентификатор типа заявки);

z_d^i – множество свойств $d = \overline{1, D}$ заявки i -го типа;

$F(\tau)$ – вероятностно-временная характеристика процесса поступления заявок множества N в систему S (ССМО);

$\lambda(t)$ – зависимость интенсивности потока заявок N от текущего времени;

$P_{hi}(t)$ – вероятность поступления в систему заявки i -го типа в зависимости от текущего времени;

C_i^{BX} – идентификаторы устройств S , начинающих обслуживание заявок i -го типа.

Формализованная схема потоков заявок V_z СОЖЦ, формализуемых как замкнутые ССМО, в данном случае обслуживающие системы ЖАТ (процессы 2, 3, 4), формулируется следующим образом:

$$V_z = [S(U_{m,g}); Q_{m,j}; F(\tau_m); P_{Q_{m,j}}; F(\tau_{m,j}^B)], \quad (2)$$

где $S(U_{m,g})$ – обслуживаемая система, включающая $1 = \overline{1, M}$ типов и $g = \overline{1, G}$ элементов каждого типа $U_{m,g}$;

$Q_{m,j}$ – схемы отказов ($j = \overline{1, J}$) элементов m -го типа;

$F(\tau_m)$ – обобщенная вероятностно-временная характеристика потока отказов для элементов m -го типа Q_m по всем $j = \overline{1, J}$ схемам его отказов;

$P_{Q_{m,j}}$ – вероятность возникновения j -й схемы отказа m -го элемента;

$F(\tau_{m,j}^B)$ – вероятностно-временная характеристика восстановления работоспособного состояния m -го элемента по схеме отказа j -го типа.

Формализованная схема детерминированных потоков заявок СОЖЦ ЖАТ (процесс 5) формулируется следующим образом:

$$V_r = [S(U_k); R_{k,l}; t_{k,l}], \quad (3)$$

где $S(U_k)$ – обслуживаемая система, включающая $k = \overline{1, K}$ элементов на профилактическом обслуживании, причем $K \leq M$;

$R_{k,l}$, $l = \overline{1, L_k}$, – профилактические работы, выполняемые обслуживающей ССМО для k -го элемента системы $S(U_k)$;

$t_{k,l}$ – момент времени начала выполнения l -й работы для k -го элемента $R_{k,l}$.

Особым случаем описания потока заявок является его порционная формализация [4]. Заявка-порция $p_{i,v}$, $v = \overline{1, V}$, – это совокупность заявок единичных объектов (ЕО) $z_{i,v}$, поступивших за i -й интервал ΔT_i , на v -й вход, где i – индекс порции по расположению на оси времени t_i от начала моделируемого периода; V – количество входов в ССМО. Таким образом, поток заявок ЕО аппроксимируется потоком заявок-порций $p_{i,v}$, а случайным объектом является $z_{i,v}$ – количество ЕО в порции. Тогда поток заявок-порций формализуется следующим образом:

$$V_P = [p_{i,v}; t_i; \Delta T_i; z_{i,v}; V]. \quad (4)$$

3. Реализация модели внешней среды в GPSS WORLD

Предложенная формализация потоков заявок позволяет реализовать идею конструктора ГПЗ СОЖЦ ЖАТ, т. к. определяет состав программных модулей (M_n) и выбор средств их реализации в среде GPSS WORLD. При этом идея конструктора ГПЗ заключается в возможности сборки различных ГПЗ из M_n , $n=\overline{1, N}$, по требованиям конкретных исследований. Множество $\{M_n\}$ в соответствии с выражениями (1)–(4) включает следующие модули:

- $M_1 (F(\tau))$ – модуль генерации однородного потока заявок с заданной функцией распределения интервалов времени ($F(\tau)$);
- $M_2 (\lambda(t))$ – модуль представления зависимости $\lambda(t)$ в виде табличной функции или арифметического выражения;
- $M_3 (\Phi(t))$ – модуль определения типа заявки по схеме полной группы событий с изменяющимися во времени соотношениями;
- $M_4 (z_d^i)$ – модуль задания свойств заявок на основе процедур вероятностного розыгрыша или детерминированного подхода с использованием табличных функций или арифметических выражений;
- $M_5 (C_i^{BX})$ – модуль задания идентификатора обслуживающего устройства, начинающего обслуживание заявки i -го типа в моделируемой ССМО;
- $M_6 (U_{m,g})$ – модуль генерации заявок по количеству M типов устройств и количеству G устройств каждого типа;
- $M_7 F(\tau_m)$ – модуль задания вероятностно-временных характеристик интервалов времени между отказами для каждого типа ($m=1, M$) устройств;
- $M_8 (P_{Q_{m,j}})$ – модуль идентификации j -й заявки – схемы отказа устройства m -го типа $Q_{m,j}$;
- $M_9 F(\tau_{m,j}^B)$ – модуль, задающий время обработки заявки $Q_{m,j}$ и определяющий переход к заданию времени появления следующего отказа m -го устройства (M_7). Следует отметить, что такой алгоритм практически не вносит искажений в процесс генерации потока отказов, т. к. $\tau_m \gg \tau_{m,j}^B$;
- $M_{10} (K)$ – модуль генерации множества транзактов, представляющих обслуживаемые устройства u_k , $k=\overline{1, K}$;
- $M_{11} (R_{k,l}; t_{k,l})$ – модуль генерации детерминированного потока заявок – регламентных работ $R_{k,l}$ – по заданным в табличном виде значениям $t_{k,l}$ и индексам работ l_k по каждому устройству;

- $M_{12}(V)$ – модуль генерации транзактов по количеству V входов ССМО;
- $M_{13}(t_i; \Delta T_i; z_{i,v}; p_{i,v})$ – модуль генерации заявок-порций $p_{i,v}$ на V входов ССМО по заданным в табличном виде значениям $t_i, \Delta T_i, z_{i,v}$.

Рассмотрим средства реализации модулей M_1 – M_{13} в среде GPSS World.

Модуль M_1 – оператор `generate`, в операндах A и B которого задаются вид и параметры функции распределения интервалов времени $F(\tau)$ между моментами появления заявок в генерируемом потоке. Инструментальное средство GPSS World содержит встроенные генераторы случайных величин с 24 различными, наиболее часто встречающимися на практике функциями распределения, что вполне достаточно для синтеза моделей 1–4 внешней среды СОЖЦ ЖАТ.

Модуль M_2 – выражение встроенного языка PLUS, арифметическая переменная `variable`, непрерывная функция `C`, описывающие зависимость $\lambda(t)$, аргументом которых является текущее время t (например, значения соответствующих ячеек памяти программы `timer` [10]). Имя полученного описания с учетом выбранного для этого средства GPSS указывается в операнде A оператора `generate`.

Модуль M_3^1 – дискретные функции `D` и оператор `assign`. Если вероятности появления заявок в неоднородном потоке не зависят от текущего времени и поток является ординарным, то для розыгрыша типа заявки i по схеме полной группы несовместных событий достаточно использовать одну дискретную функцию `D` (например, с именем `typ`), аргументом которой является случайное равномерно распределенное на интервале $[0-1]$ число, а функцией – идентификаторы (например, номера) типов заявок. Тогда для присвоения транзакту типа заявки i достаточно в какой-либо его параметр (как правило, $P1$) записать оператором `assign 1,fn$typ` значение функции `typ`.

Модуль M_3^2 – на практике вероятность появления заявок различного типа на транспорте, как правило, зависит от времени суток, сезона и т. п. В соответствии с этим свойства полной группы событий также зависят от текущего времени. Для описания этой ситуации предлагается использовать I дискретных функций по количеству типов заявок (идентификаторы функций – номера заявок). Выделить статистически стационарные фрагменты потока по всем типам заявок в текущем времени. Аргумент всех $F_i, i=\overline{1, I}$, функций – значение текущего времени для заданного периода (для систем

реального времени это смена, сутки), а функция – значение вероятности появления заявки i -го типа. Таким образом, вероятностная характеристика полной группы несовместных событий в зависимости от текущего времени описывается значениями I дискретных D -функций по всем стационарным фрагментам неоднородного потока заявок.

	savevalue	l1,m10;	(1)
	assign	l,1;	(2)
ndfunct	test le	xl1,fn*1,sign1;	(3)
	transfer	,identVH;	(4)
sign1	assign	l+,1;	(5)
	transfer	,ndfunct;	(6)

Операторы 3, 5, 6 организуют цикл сравнения значений D -функций со случайным числом в ячейке $l1$ (оператор 1). В результате сравнения (оператор 3) в параметре l транзакта сохраняется номер последней сравниваемой D -функции, т. е. индекс типа заявки i (оператор 5). Транзакт с присвоенным типом заявки направляется оператором 4 на вход ССМО в соответствии с идентификаторами входов C_i^{BX} .

Модуль M_4 – параметры транзакта, операторы assign, записывающие значения свойств заявки в параметры транзакта, количество которых не ограничено.

Модуль M_5 – множество операторов test и transfer, количество которых определяется количеством типов заявок I .

tip1	test e	p1,1,tip2;	(1)
	transfer	,ustr1;	(2)
tip2	test e	p1,2,typ3;	(3)
	transfer	,ustr2;	(4)

Операторы 1, 3 определяют тип заявки i по параметру $P1$ вошедшего транзакта, причем оператором 2 либо отправляется на соответствующий типу заявки вход ССМО, либо передается следующему оператору test (3). Указанные процедуры повторяются до отправки каждого вошедшего транзакта на соответствующий вход ССМО.

Модуль M_6 – операторы split, savevalue, assign, матрица ячеек памяти mxkvou$.

	generate	1,,1;	(1)
	split	x100,rrr;	(2)
	terminate;		(3)
rrr	savevalue	1+,1;	(4)
	assign	1,x1;	(5)
	split	mx\$kvou(p1,1),tmo	(6)
	terminate;		(7)

Оператор 1 вводит в модель один основной транзакт, который копируется оператором 2. Количество создаваемых копий задано в ячейке памяти X100 и равно количеству типов устройств M , входящих в ССМО. Операторы 4, 5 присваивают параметру P1 копий индексы $m=\overline{1, M}$. Оператор 6 создает для каждого транзакта с индексом m количество копий, равное количеству устройств данного типа G в ССМО, заданное в матрице mxkvou$.

Модуль M_7 – операторы assign, advance, матрица ячеек памяти totk.

tmo	assign	5,mx\$totk(p1,1);	(1)
	assign	6,mx\$totk(p1,2);	(2)
	advance	p5,p6;	(3)

Оператор 1 записывает в параметр P5 из матрицы totk среднее время между отказами m -го устройства по его индексу m , записанному в P1 транзакта. Аналогично в параметр P6 из mxtotk$ оператором (2) записывается модификатор. Оператор (3) задерживает транзакт на время τ_m в соответствии с функцией $F(\tau_m)$, заданной в его параметрах P5, P6.

Модуль M_8 – дискретные функции $D\ shotk(1..M)$, аргументом которых являются случайные равномерно-распределенные числа на интервале $[0,1]$ (генераторы $rn1..rnM$), а значениями функций – индексы схем отказов j_m для m -го устройства $Q_{m,j}$; операторы assign, test, transfer.

	test e	p1,1,ustr2;	(1)
	assign	2,fn\$shotku1;	(2)
	test e	p2,1,sh12;	(3)
	transfer	,shotk11;	(4)
sh12	test e	p2,2,sh13;	(5)
	transfer	,shotk12;	(6)
sh13	test e	p2,3,sh14;	(7)
	transfer	,shotk13;	(8)

Оператор 1 по значению параметра P1 определяет принадлежность транзакта устройству с индексом $m=1$. Если $P1>1$, то выполняется переход к аналогичному оператору для проверки $P1>2$ и т. д. до выполнения условия $P1=m$, т. е. до определения принадлежности транзакта устройству с индексом m . Например, если $P1=1$, то оператор 2 присваивает параметру P2 значение j_1 дискретной функции $shotku_1$, которое является индексом схемы отказа $Q_{1,j}$ устройства u_1 в текущей реализации модели. Далее операторами 3, 5, 7, ... по значению параметра P2 определяется принадлежность транзакта j_1 -й схеме отказа устройства с индексом 1. Операторы 4, 6, 8 ... передают транзакт модели j_1 -й схеме отказа. Количество пар операторов *test*, *transfer* для данного устройства равно (J_1-1) . Общий объем программы модуля M_8 определяется количеством типов устройств M и количеством схем отказов $\sum I_m$, учитываемых в модели. Следует отметить, что для различных устройств одного типа выполняются одни и те же операторы модуля M_8 .

Модуль M_9 – операторы *assign*, *advance*, *transfer*, матрицы ячеек памяти $m \times m$ ($m \times 1 \dots m \times M$). Матрицы имеют индекс устройств m (параметр P1), а их строки – индекс схемы отказа j_m (параметр P2). В первом столбце $m \times m$ записано среднее время $\tau_{m,j}^B$, во втором – его модификатор.

<i>assign</i>	$10, m \times 1(p2,1);$	(1)
<i>assign</i>	$11, m \times 1(p2,2);$	(2)
<i>advance</i>	$p10, p11;$	(3)
<i>transfer</i>	$, tmo;$	(4)

Оператор 1 по значению первого параметра *1 обращается к m -й матрице, по параметру P2 – к ее j -й строке и первому столбцу. Тем самым в параметр P10 записывается среднее время $\tau_{m,j}^B$. Аналогично оператор 2 записывает в параметр P11 из второго столбца значение модификатора. Оператор 3 по значениям параметров P10, P11 выполняет задержку транзакта на время обработки схемы отказа $Q_{m,j}$ в текущей реализации модели. По окончании задержки оператором 4 транзакт отправляется на генерацию следующего отказа m -го устройства (модуль M_7).

Модуль M_{10} – операторы *generate*, *split*, *assign*, *savevalue*, *transfer*, *terminate*.

<i>generate</i>	$1,,1;$	(1)
<i>split</i>	$x2, ggg;$	(2)
<i>terminate</i> ;		(3)
<i>ggg savevalue</i>	$1+,1;$	(4)

	assign	1,x1;	(5)
gis1	assign	2,1;	(6)
	assign	12,1;	(7)
	assign	10,1;	(8)
	split	1,rrr;	(9)
	transfer	,rab;	(10)

Операторы 1, 2 вводят в модель K транзактов, каждый из которых представляет устройство, находящееся на регламентном обслуживании. Количество таких устройств K записывается в ячейку памяти $x2$ командой `initial` до начала моделирования. Операторы 4, 5 присваивают транзактам (параметр $p1$) индекс устройства k . Оператор 6 иницирует параметр $p2$ для последующей обработки матриц регламентных работ. Операторы 7 и 8 присваивают параметрам $p10$, $p12$ начальное время и индекс первой регламентной работы соответственно. Операторы 9, 10 отправляют основной транзакт на выполнение модели первой регламентной работы $R_{k,1}$, а копию – на обработку матриц регламентных работ.

Модуль M_{11} – операторы `split`, `assign`, `savevalue`, `transfer`, `test`; матрицы регламентных работ $mx1 \dots mxK$. Матрицы имеют индекс устройств на регламентном обслуживании k , при этом количество строк L_k k -й матрицы равно количеству работ, выполняемых для данного устройства. В первом столбце строки $mx(k)$ записано время начала выполнения работы $t_{k,1}$, во втором – индекс работы $1 \dots L_k$. В первом столбце последней строки $mx(k)$ записано любое отрицательное число как знак окончания цикла работ по k -й матрице.

	rrr	assign 2+,1;	(1)
	test g	$mx*1(p2,1),0,rmi1$;	(2)
	assign	$12,mx*1(p2,1)$;	(3)
	assign	$11,(mx*1(p2,2)-p10)$;	(4)
	assign	$10,mx*1(p2,2)$;	(5)
	advance	$p11$;	(6)
	split	$1,rab$;	(7)
	transfer	$,rrr$;	(8)
rmi1	savevalue	$10+,1$;	(9)
	transfer	$,gis1$;	(10)

Оператор 1 присваивает параметру $p2$ индекс текущей строки $mx(k)$. Оператор 2 определяет завершение цикла обработки по каждой $mx(k)$. Если элемент матрицы $mx(k)(p2,1)$ – отрицательное число, то транзакт передается

оператору 9 – счетчику количества завершений, а затем оператору 10 для выполнения следующего цикла. В противном случае выполняются операторы 3, 4, 5: в параметр p12 записывается индекс следующей работы, p10 – время начала предыдущей работы, p11 – интервал времени между моментами начала предыдущей и следующей работы. Оператор 6 выполняет задержку транзакта до момента начала следующей работы. Операторы 7, 8 отправляют основной транзакт на начало цикла обработки $mx(k)$ – оператор 1, а транзакт-копию по метке gab на выполнение модели регламентной работы по индексу в параметре p12.

Модуль M_{12} – операторы generate, split, assign; ячейка памяти x2, в которую записано количество V входов ССМО.

	generate	1,,1;	(1)
	split	x2,ggg;	(2)
	terminate;		(3)
ggg	savevalue	1+,1;	(4)
	assign	1,x1;	(5)
gis1	assign	2,0;	(6)

Операторы 1, 2 вводят в модель (ячейка x2) V транзактов по количеству входов ССМО. Операторы 4, 5 присваивают первому параметру индекс входа v . Оператор 6 иницирует параметр p2 для дальнейшей обработки матриц входов.

Модуль M_{13} – операторы: assign, test, split, advance, savevalue; матрицы входов $mx1 \dots mxV$, количество строк которых равно количеству моментов времени t_i передачи транзактов, представляющих заявки-порции $p_{i,v}$ на входы ССМО. В первый столбец матриц записывается количество $z_{i,v}$ единичных объектов потока заявок ЕО по v -му входу для интервала $\Delta T_i = t_{i+1} - t_i$, а во второй – значение t_i . Заполнение матриц $mx(v)$ данными $z_{i,v}$, t_i может выполняться как до начала, так и в процессе моделирования.

rrr	assign	2+,1;	(1)
	assign	3,(p2+1);	(2)
	test g	$mx*1(p3,1),0,rml$;	(3)
	assign	12, $mx*1(p2,1)$;	(4)
	assign	10, $mx*1(p2,2)$;	(5)
	assign	11, $mx*1(p3,2)$;	(6)
	assign	14,(p11-p10);	(7)
	split	1,vhod;	(8)

	advance	p14;	(9)
	transfer	,rrr;	(10)
rmi1	savevalue	10+,1;	(11)
	transfer	,gis1;	(12)

Следует отметить, что программа модуля M_{13} разработана на основе программы модуля M_{11} . Операторы 1, 2 присваивают параметрам p_2 и p_3 текущие значения индексов i строк матриц $mx_1 \dots mx_V$. Оператор 2 определяет завершение цикла обработки по каждой $mx(v)$. Если элемент матрицы $mx(v)(p_2,1)$ – отрицательное число, то транзакт передается оператору 11 – счетчику циклов, а затем оператору 12 для выполнения следующего цикла. В противном случае выполняются операторы 4, 5, 6, 7: в параметр p_{10} записывается время начала текущего интервала $\Delta T_i - t_i$, в параметр p_{11} – время окончания интервала $\Delta T_i - t_{i+1}$, в параметр p_{12} – значение $z_{i,v}$ для интервала $\Delta T_i = t_{i+1} - t_i$, в параметр p_{14} – значение интервала ΔT_i . Оператор 8 отправляет основной транзакт на задержку на время ΔT_i , а транзакт-копию на v -й вход ССМО с информацией в параметрах $p_1, p_{10}, p_{11}, p_{12}, p_{14}$, достаточной для выполнения моделей обслуживающих устройств [7]. По окончании задержки оператором 9 основной транзакт оператором 10 передается на начало цикла обработки матриц $mx(v)$.

Заключение

Предложенный набор модулей M_1 – M_{13} и их программная реализация в среде GPSS World решает поставленную в работе задачу разработки конструктора генераторов потоков заявок с различными свойствами. Для синтеза ГПЗ достаточно в требуемом порядке соединить нужные для решения конкретной задачи модули из множества M_1 – M_{13} . Для примера ГПЗ в соответствии с формализованными схемами (1), (2), (3), (4) в алфавите модулей реализуются следующим образом:

$$(1) \text{ ГПЗ}(V_T) = M_1 \& M_2 \& (M_3^1 \text{ или } M_3^2) \& M_4 \& M_5;$$

$$(2) \text{ ГПЗ}(V_z) = M_6 \& M_7 \& M_8 \& M_9;$$

$$(3) \text{ ГПЗ}(V_r) = M_{10} \& M_{11};$$

$$(4) \text{ ГПЗ}(V_p) = M_{12} \& M_{13}.$$

Настройка модулей выполняется на уровне исходных данных заполнением соответствующих матриц, ячеек памяти, табличных функций, заданием

параметров стандартных функций GPSS без изменения текстов программ модулей. Отдельные модули M_1 , M_3^2 , M_6 , M_8 , M_{13} применялись авторами в моделях: электронного документооборота технической документации ЖАТ, системы технической диагностики и удаленного мониторинга устройств ЖАТ, обслуживания пассажиропотоков на метрополитене, а также в моделях автоматизированных технологических комплексов на станциях и перегонах, что и явилось предпосылкой выполнения данной работы.

Полученные результаты:

- определено понятие внешней среды СОЖЦ ЖАТ как ССМО;
- определен состав заявок для всех рассматриваемых СОЖЦ ЖАТ;
- сформулирована идея конструктора генераторов потоков заявок СОЖЦ ЖАТ как сложных ССМО;
- предложены формализованные схемы внешней среды систем обеспечения жизненного цикла ЖАТ;
- на основе анализа формализованных схем определены состав и задачи функциональных модулей M_1 – M_{13} , включенных в конструктор;
- определены средства GPSS World для разработки программ модулей M_1 – M_{13} ;
- представлены GPSS-программы модулей M_1 – M_{13} .

Перспективы:

- расширение и детализация формализованных схем и набора модулей для моделирования СОЖЦ ЖАТ;
- автоматизация процедур синтеза ГПЗ из предложенного набора модулей;
- доработка программ модулей с целью управления процессами генерации потоков заявок во время моделирования в соответствии с планом проведения серий имитационных экспериментов;
- выполнение практических исследований операционных характеристик СОЖЦ ЖАТ с использованием конструктора ГПЗ и программных средств алгоритмической, морфологической или порционной формализации имитационных моделей.

Библиографический список

1. 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.

2. Лыков А. А. Методика комплексной оценки показателей эффективности систем технического диагностирования и мониторинга / А. А. Лыков, Д. С. Марков, С. В. Бочкарев // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 14–23.
3. Марков Д. С. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / Д. С. Марков, А. А. Лыков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 1. – С. 23–28.
4. 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.
5. Марков Д. С. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 4. – С. 63–74.
6. Марков Д. С. Иерархическая многоматричная формализация имитационной модели электронного документооборота технической документации / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. – СПб. : ПГУПС, 2013. – С. 52–60.
7. Марков Д. С. Синтез GPSS-модели обслуживающих устройств сложных систем массового обслуживания на основе порционной формализации / Д. С. Марков, В. Б. Соколов, В. А. Соколов // Автоматика на транспорте. – 2016. – Том 2. – № 3. – С. 442–455.
8. 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. – СПб. : ПГУПС, 2003. – С. 17–25.
9. Марков Д. С. Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / П. Е. Булавский, Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. – 2015. – Том 1. – № 4. – С. 418–433.
10. Марков Д. С. Моделирование потока заявок сложных систем на языке GPSS / Д. С. Марков, М. Н. Василенко, А. В. Гриненко // Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте : сб. ЦНИИ ТЭИ МПС. – 1981. – № ДР1252. – С. 57–65.
11. Кудрявцев Е. М. GPSS WORLD. Основы имитационного моделирования различных систем / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 317 с.

*Andrey A. Lykov,
Dmitry S. Markov,
Vadim B. Sokolov*

«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

FORMALIZATION OF ENVIRONMENTAL MODELS IN SIMULATION MODELS OF RAILWAY AUTOMATION LIFE CYCLE SUPPORT SYSTEMS

The external environment is defined as an object of formalization and modeling in simulation models of life cycle support systems (hereinafter systems) of railway automation and remote control. The composition and characteristics of physical objects - service requests by systems, which are formalized on the basis of different approaches as complex queuing systems, are given. Formalized schemes of the external environment are formulated on the basis of representation of various systems by open, enclosed queuing schemes, and also with deterministic flows of applications. On this basis, the idea of the request flow generator designer is proposed, which includes a set of software modules with various connection options that allow to synthesize generators with the properties required for specific studies. In this work, the set includes thirteen modules, for programming each of which objects of the tool GPSS World are selected. Using the selected sets of objects, the GPSS programs of all thirteen modules included in the system request flow generator designer have been developed. All modules have been tested, and some have already found practical application in real models, which allowed to confirm the correctness and effectiveness of the proposed approach in terms of time spent on the synthesis and ensuring the adequacy of the models of the external environment of the life cycle of railway automation and remote control systems.

life cycle support systems for railway automatics and telemechanics, Queuing systems, external environment, application, formalized scheme, simulation model, request flow generator designer.

References

1. Lykov A. A., Efanov D. V., Vlasenko S. V. (2012) Technical diagnostics and monitoring of railway automation and remote control [Tekhnicheskodiagnostirovaniei monitoring sostoyaniyaustrojstv ZHAT], Transport of the Russian Federation [Transport Rossijskoj Federatsii], 2012, issue 5. – Pp. 67–72.
2. Lykov A. A., Markov D. S., Bochkarev S. V. (2014) Methodology for a comprehensive assessment of the performance indicators of technical diagnostic systems and monitoring [Metodika kompleksnoj otsenki pokazatelej effektivnosti sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya i monitoringa], Component base development and railway automation and remote control devices design methods improvement. St. Petersburg, Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2014. – Pp. 14–23.
3. 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 modelej tekhnologicheskikh protsessov v khozyajstve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte], Proceedings St.

- Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], issue 1. – Pp. 23–28.
4. Markov D. S., Sokolov V. B. (2014) The method of portion modeling of transport queuing systems. Component base development and railway automation and remote control devices design methods improvement [Metod portsiionnogo modelirovaniya transportnykh sistem massovogo obsluzhivaniya. Razvitie elementnoj bazy i sovershenstvovanie metodov postroeniya ustrojstv zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Edition VI. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2014. – Pp. 43–47.
 5. Bulavsky P. E., Markov D. S. (2010) The matrix method of complex queuing system simulation models formalization [Matrichnyj metod formalizatsii imitatsionnykh modelej slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya], Proceedings St. Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya], 2010, issue 4. – Pp. 186–195.
 6. Markov D. S., Bulavskij P. E. (2013) Hierarchical multi-matrix formalization of a simulation model of electronic document management of technical documentation [Ier-arhicheskaya mnogomatrichnaya formalizatsiya imitatsionnoj modeli elektronnoho dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii], Actual issues of the development of railway automation and telemechanics systems, St. Petersburg, Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS], 2013. – Pp. 63–74.
 7. Bulavsky P. E., Markov D. S., Sokolov V. B., Sokolov V. A. (2016) Synthesis of GPSS-model of service devices of complex queuing systems, based on the batchwise formalization [Sintez GPSS-modeli obsluzhivayushchikh ustrojstv slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya na osnove portsiionnoj formalizatsii], Automation on transport [Avtomatika na transporte], 2016, vol. 2, issue 3. – Pp. 442–455.
 8. Vasilenko M. N., Markov D. S., Sokolov V. B., Sorokin K. G. (2003) Simulation model of passenger handling for subway, Engineering, certification and technical operation of railway automation and remote control devices and systems [Imitatsionnaya model' obsluzhivaniya passazhiropotokov na metropolitene. Konstruirovaniye, sertifikatsiya i tekhnicheskaya ekspluatatsiya ustrojstv i sistem zhd. Avtomatiki i telemekhaniki], Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS], St. Petersburg. – Pp. 17–25.
 9. Bulavsky P. E., Markov D. S., Sokolov V. B., Konstantinova T. Yu. (2015) Formalization of algorithmic description of systems of railway automation and remote control life cycle provision [Formalizatsiya algoritmicheskogo opisaniya sistem obespecheniya zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki], Automation on transport [Avtomatika na transporte]. Proceedings St. Petersburg state transport university, 2015, vol 1, issue 4. – Pp. 418–433.
 10. Markov D. S., Vasilenko M. N., Grinenko A. V. (1981) Modeling the application flow for complex systems in the GPSS language [Modelirovaniye potoka zayavok slozhnykh sistem na yazyke GPSS], Automatics and telemechanics at the railway transport [Avtomatika i telemekhanika na zheleznodorozhnom transporte]. CNII TEI MPS. – 1981. – issue DR1252. – Pp. 57–65.
 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 М.Н. Василенко.

Поступила в редакцию 07.02.2019, принята к публикации 13.05.2019.

ЛЫКОВ Андрей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I
e-mail: bastdrew@mail.ru

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

© Лыков А. А., Марков Д. С., Соколов В. Б., 2019