

УДК 519.876.5

# ЛОГИКО-ВРЕМЕННАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

**БЕЛИШКИНА Татьяна Алексеевна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: belishkina@mail.ru  
**КОНСТАНТИНОВА Татьяна Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры; e-mail: at-tanya@mail.ru  
**ЛЫКОВ Андрей Александрович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: bastdrew@mail.ru  
**МАРКОВ Дмитрий Спиридонович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: MDS1945@yandex.ru  
**МИКАДО Елена Николаевна**, заведующий лабораторией кафедры; e-mail: mikadowork@yandex.ru  
**СОКОЛОВ Вадим Борисович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: SVB9@yandex.ru

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Кафедра «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», Санкт-Петербург

Целью статьи является изложение результатов разработки метода формализации имитационных моделей систем железнодорожной автоматики и телемеханики как систем массового обслуживания с жестко регламентированной последовательностью использования обслуживаемых устройств в процессе обработки потоков заявок различных типов. Для программной реализации имитационных моделей с такими свойствами традиционно используется инструментальное средство GPSS World. Предложена логико-временная формализация, и сформулирована концепция предложенной формализации имитационных моделей, основными положениями которой являются: тип заявки определяется только составом и последовательностью занятия и освобождения обслуживаемых устройств; использование параметров транзактов для организации их многофазной обработки по каждому типу заявки; проверка значения булевых функций по каждому процессу обработки заявки каждого типа; регламентное время в процессе обработки заявок рассматривается как одно из множества логических условий булевых функций; логическое и параметрическое описание моделируемой системы должно выполняться на уровне исходных данных без изменения текста моделирующей программы. Определены объекты GPSS World, достаточные для реализации данной концепции. С использованием выбранных объектов составлен алфавит, и в полученном алфавите разработаны логические схемы моделирующих алгоритмов в качестве демонстрации применения логико-временной концепции формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания. Разработана GPSS-программа, позволившая подтвердить возможность и целесообразность использования предложенного метода формализации имитационных моделей систем железнодорожной автоматики с жесткой структурой.

**Ключевые слова:** системы железнодорожной автоматики и телемеханики; системы массового обслуживания с жесткой структурой; имитационная модель; булевы функции; формализация моделей; логические схемы алгоритмов.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-368-376

## ▼ Введение

Железнодорожная автоматика и телемеханика (ЖАТ) включает широкий спектр разнообразных по назначению и технической реализации устройств и систем. По сфере применения целесообразно выделить два класса систем:

- 1) собственно системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ), которые по ГОСТ Р 53431—2009<sup>1</sup> определяются следующим образом: совокупность

технических средств, обеспечивающая контроль и управление с установленным уровнем безопасности движения стационарными путевыми и подвижными объектами железнодорожного транспорта;

- 2) системы обеспечения жизненного цикла (СОЖЦ) СЖАТ.

В ГОСТ Р 53431—2009 приведены определения и фактически довольно полная классификация устройств и систем железнодорожной автоматики.

В то же время терминология по СОЖЦ СЖАТ в системном виде, как составляющей

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53431—2009. Автоматика и телемеханика железнодорожная. Термины и определения.

ЖАТ, пока не сформулирована в нормативных документах. К СОЖЦ СЖАТ относятся: система доказательств безопасности и сертификации СЖАТ на безопасность; системы автоматизированного проектирования и электронного документооборота технической документации; системы диспетчерского контроля и на их основе технической диагностики и удаленного мониторинга технического состояния устройств ЖАТ; системы автоматизированного управления службой сигнализации, централизации и блокировки (АСУ-Ш-2); системы технической эксплуатации СЖАТ. Далее СЖАТ и СОЖЦ, если нет необходимости указывать различия, определяются как СЖАТ.

Приведенные положения в данной работе не направлены на постановку задач разработки понятийного аппарата по СОЖЦ СЖАТ, но позволяют очертить предметную область СЖАТ как объектов моделирования. Авторами в более ранних работах [1–4] и в данной статье рассматриваются методы формализации имитационных моделей (ИМ) системного уровня.

В [1, 5, 6] относительно СЖАТ как объектов моделирования для поддержки принятия системотехнических решений сформулированы следующие основные положения:

- 1) системное моделирование СЖАТ необходимо выполнять на основе процессного дискретно-событийного подхода;
- 2) дискретно-событийный подход реализуется по математической схеме массового обслуживания, причем СЖАТ рассматриваются как сложные системы массового обслуживания (ССМО) [1, 7];
- 3) формализация ИМ и всего процесса имитационного моделирования от постановки задач до формулирования рекомендаций по системотехническим решениям имеет определяющее значение в преодолении самых существенных недостатков методологии имитационного моделирования, а именно субъективности результатов и высоких затрат времени на разработку ИМ и проведение серий имитационных экспериментов (СИЭ);
- 4) повышение за счет формализации процедур синтеза ИМ объективности,

семантической и статистической достоверности, полноты и своевременности получаемой в результате имитационных исследований информации;

- 5) формализация синтеза ИМ СЖАТ, в зависимости от свойств системы, выполняется либо по функционально-алгоритмическому, либо по структурному описанию СЖАТ.

Формализацию по функционально-алгоритмическому описанию системы [2, 4, 8] целесообразно выполнять для систем организационно-технологического типа, например АСУ-Ш-2. В таких системах при изменениях организационной структуры более устойчивыми к изменениям являются совокупность и порядок выполнения функций.

Формализация синтеза ИМ СЖАТ на основе структурного или морфологического подхода целесообразна для систем с жесткой структурой, в которых определяющей является аппаратно-программная составляющая, например, системы микропроцессорной электрической и диспетчерской централизаций. При этом под жесткой структурой СЖАТ как ССМО понимается однозначная привязка функциональных модулей, устройств и подсистем как обслуживаемых устройств (ОУ) к соответствующим подмножествам выполняемых операций по обработке поступающих в систему заявок, например команд от операторов, сигналов от напольного оборудования и смежных систем и т. п.

В [3, 9] предложен морфологический подход для формализации ИМ, основанный на системе паспортов ОУ, в каждый из которых записывается на уровне исходных данных информация о выполняемых данным элементом операциях по типам заявок и жестких или условных связях с другими элементами системы или ее входами. Такой подход является универсальным по отношению к составу устройств, подмножеству выполняемых каждым устройством операций, количеству и разнообразию видов связей между элементами и входами системы. Однако достигнутая универсальность естественным образом влечет за собой избыточность используемых средств моделирования (паспортов) и затрат времени

на разработку ИМ СЖАТ при достаточности по структуре системы и решаемым задачам более простых средств моделирования.

### 1. Логико-временная формализация ИМ СЖАТ

В данной работе рассмотрен менее универсальный, но и менее затратный морфологический подход, а именно логико-временная формализация (ЛВФ) ИМ ССМО с жесткой структурой при неизменной (в процессе обработки заявок) последовательности занятия и освобождения ОУ с логическим контролем доступности процесса обслуживания в целом и отдельных устройств. Например, заявка на установку и использование маршрута в системе электрической централизации. Формализация выполняется на основе предложенной в [1] обобщенной формализованной схемы (ОФС) СЖАТ как ССМО, включающей:

- модель внешней среды в виде потока заявок различного типа на обслуживание в ССМО;
- структурно-алгоритмическое описание системы и процесса обслуживания заявок;
- параметрическое описание, включающее вероятностно-временные характеристики потоков заявок и процесса обслуживания заявок.

ОФС для систем с жесткой структурой и заданной последовательностью использования ОУ адаптируется как ЛВФ следующим образом.

Формализованная схема внешней среды представляется моделью потоков заявок  $V_T$  различного типа в систему  $S$ :

$$V_T = [H; F(\tau); Ph_j(t); C_j^{bx}],$$

где  $H$  — множество заявок различного типа  $hj$ ;  $j = \overline{1, J}$ , обслуживаемых системой  $S$ ;

$F(\tau_0)$  — характеристика времени поступления заявок множества  $H$  в систему  $S$ ;

$Ph_j$  — вероятность поступления в систему заявки  $j$ -го типа;

$C_j^{bx}$  — идентификаторы устройств  $S$ , начинающих обслуживание заявок  $j$ -го типа.

Морфологическая формализация исследуемой системы как ССМО:

$$S = \{E; E_j; BV_j; F(\tau)e_n\},$$

где  $E$  — множество элементов  $e_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ , рассматриваемых в конкретном исследовании;  $E_j$  — подмножество устройств, используемых в заданной последовательности при обработке заявки  $j$ -го типа;  $BV_j$  — булева функция оценки доступности процесса обработки заявки  $j$ -го типа;  $F(\tau)e_n$  — характеристика времени обработки заявки  $j$ -го типа  $n$ -ым устройством.

### 2. Концепция синтеза ИМ СЖАТ по ЛВФ

Приведенные во введении положения и сформулированная выше ЛВФ позволяют предложить следующую концепцию синтеза ИМ СЖАТ.

1. Настройка ИМ на конкретную систему должна выполняться в соответствии с ЛВФ на уровне исходных данных вводом следующей информации:  $Ej$  с указанием последовательности использования ОУ  $e_n$ , вероятностно-временных характеристик потока заявок  $F(\tau_0)$ ,  $Ph_j$  и процесса их обработки  $F(\tau)e_n$ , булевых функций  $BV_j$ .
2. Тип заявки  $hj$  определяется только подмножеством  $Ej$  и последовательностью устройств  $e_n$ , используемых в процессе обработки заявки, что в совокупности  $J$  заявок полностью отображает структуру моделируемой системы.
3. Модели двух и многопозиционных элементов (например, стрелки, светофоры, шлагбаумы)  $e_n$  должны приводиться в исходное состояние до начала моделирования и управляться в соответствии с планом в процессе выполнения ИЭ.
4. Доступность процесса обработки заявок должна оцениваться не только по состоянию «свободно/занято» ОУ, но и по значениям подмножеств логических условий, в том числе и с учетом состояний двух и многопозиционных объектов, сопоставленных заявкам каждого типа.
5. Изменение состава или последовательности использования ОУ возможно только при моделировании отказов элементов системы, включая изменение состояния двух или многопозиционных объектов.

Такой подход приводит к построению логической, асинхронной, событийной модели. Традиционно [1–3] для системного моделирования СЖАТ используется транзактная, процессная, дискретно-событийная инструментальная среда GPSS World [10–12]. Для реализации предложенной концепции синтеза ЛВФ ИМ используются следующие объекты GPSS World [13]:

- транзакты  $Tr_j$ , отображающие объекты-заявки  $hj$  различного типа  $j = \overline{1, J}$ , образующие потоки с интенсивностями  $\lambda_j$ , обрабатываемые в СЖАТ;
- матрица  $MX\$VHVREM$  вероятностно-временных параметров  $F(\tau_0)$  обобщенного

$$\text{отока заявок } h_0 \text{ с интенсивностью } \lambda_0 = \sum_{i=1}^I \lambda_i;$$

- аппаратные средства: логические ключи, одноканальные устройства памяти используются для моделирования различных элементов  $e_n, n = 1, N$  системы;
- непрерывная функция  $FN\$INTO$  распределения интервалов времени  $\tau_0$  обобщенного потока  $h_0$  с интенсивностью  $\lambda_0$ ;
- дискретная функция  $FN\$TYP1$  розыгрыша типа заявки  $j$  по схеме полной группы независимых событий в соответствии со значениями  $Ph_j$ ;
- матрица  $MX\$HUSTR$  записанных по строкам (номер строки соответствует типу заявки  $j$ ) идентификаторов ОУ (элементы  $e_n$ ), обеспечивающих многофазную обработку заявок по типу  $j$ ;
- матрица  $MX\$VREMOU$  вероятностно-временных параметров выполнения операции  $j$ -ой заявки  $n$ -ым ОУ;
- непрерывная функция  $FX\$VREMOU$  распределения времени выполнения операции  $j$ -ой заявки  $n$ -ым ОУ  $F(\tau)e_n$ ;
- булевы переменные  $BVj$  (функции), аргументами которых являются состояния двух и многопозиционных объектов, ОУ, временных ограничений, обеспечивающих оценку возможности выполнения операций по обработке заявок в СЖАТ;
- список пользователя  $GPZ$  в качестве накопителя подмножеств заявок  $hj$  каждого типа, обеспечивающий организацию генератора потока заявок

в ЛВФ ИМ при сокращении затрат машинного времени на выполнение ИЭ.

ЛВФ, предложенная концепция и выбранные для синтеза ИМ объекты GPSS World позволили использовать для моделирования СЖАТ по морфологическому описанию параметры транзактов. Следует отметить, что непосредственно запись информации в параметры транзактов без запуска объекта GPSS «Процесс моделирования» на выполнение не допускается. В соответствии с этим предложена следующая технология построения генератора потоков заявок (ГПЗ) с одновременной записью информации о структуре системы в параметры  $T_{pj}$ :

- 1) информация о последовательности занимаемых ОУ транзактом  $J$ -го типа вводится в объект GPSS-модель в элементы матрицы  $MX\$HUSTR$  последовательно по строке  $J$  командами INITIAL на этапе создания объекта GPSS-модель, т. е. на уровне исходных данных;
- 2) при запуске объекта «Процесс моделирования» информация из элементов матрицы  $MX\$HUSTR$  операторами ASSIGN по строкам  $J$  записывается последовательно в параметры  $T_{pj}$ , начиная с  $P2$ , так как параметр  $P1$  занят под идентификатор типа заявки  $j$ ;
- 3) ввод в накопитель (список пользователя  $GPZ$ ) оператором SPLIT заданного количества копий транзакта  $J$ -го типа. Количество копий определяется максимальным количеством одновременно находящихся на обслуживании в ССМО  $T_{pj}$ , т. е. соотношением интенсивностей входного потока  $Tr(o)$  и обслуживания;
- 4) генерация оператором GENERATE однородного потока  $Tr(o)$  с интенсивностью

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^I \lambda_i;$$

- 5) присвоение разыгранного по схеме полной группы независимых событий значения  $j$  сгенерированному на предыдущем шаге  $Tr(o)j$ ;
- 6) выбор из накопителя  $GPZ$  транзактом  $Tr(o)j$  транзакта  $Tr_j$  по значению  $j$ , полученному на предыдущем шаге;

7) ввод  $T_{pj}$ , выбранного по  $j$  на предыдущем шаге, в модель ОУ.

Следует отметить, что шаг 1 выполняется до начала «Процесса моделирования», а шаги 2 и 3 один раз в процессе выполнения одного или серии имитационных экспериментов. Такая организация ГПЗ, совмещенного с записью в параметры  $T_{pj}$  последовательности, используемые в обслуживании ОУ, позволяет существенно сократить затраты машинного времени на выполнение СИЭ, особенно при моделировании многофазных, многоканальных и высоконагруженных ССМО. Следует отметить, что чем выше уровень формализации процессов синтеза ИМ, планирования и проведения СИЭ, обработки их результатов, тем легче и эффективнее осуществляется выполнение сложнейших и наиболее ответственных процедур верификации и валидации ИМ и результатов моделирования [14–16].

Полученные результаты позволяют разработать логическую схему моделирующего алгоритма (ЛСМА) с использованием символики и структуры логических схем алгоритмов [17].

### 3. Алфавит ЛСМА

$G$  — генератор  $T_{pj}$ ;  
 $A$  — работа с параметром  $P(N)$ ;  
 $V$  — извлечение из накопителя;  
 $K$  — создание копий  $T_{pj}$ ;  
 $S$  — запись в ячейку  $x(N)$ ;  
 $En$  — занятие ОУ;  
 $Zn$  — задержка на время обслуживания;  
 $Rn$  — освобождение ОУ;  
 $N$  — возврат  $T_{vi}$  в накопитель;  
 $q$  — логическое условие;  
 $T$  — вывод  $T_{pj}$  из ИМ;  
 $g$  — ждущее логическое условие.

### 4. ЛСМА установки двоичных объектов

$$U_1 = G_{11}^1 L_{11} L_{12} \dots L_{1m} \dots L_{1m} T,$$

$G_{11}^1$  — генератор  $T_{py}$ ;  
 $L_{1m}$  — установки двухпозиционных объектов;  
 $T_{py}$  — установочный транзакт;  
 $T$  — вывод транзакта из модели.

### 5. ЛСМА ГПЗ

$$U_2 = G_{21} S_{21} A_{21} A_{22} \downarrow^2 A_{23} q_{21} \uparrow^1 \times \\ A_{24} w \uparrow^2 \downarrow^1 A_{25} K_{21} \uparrow^3 N_{21} \downarrow^3 T_{21},$$

$G_{21}$  — генератор  $j T_{pj}^0$ ,  $j = \overline{1, J}$ ;

$S_{21}$  —  $x1 = x1 + 1$ ;

$A_{11}$  —  $P1 := x1$ ;

$A_{21}$  —  $P100 := 1$ ;

$A_{23}$  —  $P100 = P100 + 1$ ;

$$q_{21} \begin{cases} 1 - \text{если } mx1(*1, *100) < 1\,000\,000; \\ 0 - \text{если } mx1(*1, *100) = 1\,000\,000; \end{cases}$$

$A_{25}$  —  $P100 := mx1(*1, *100)$ ;

$K_{21}$  — создание  $K$  копий  $T_{pj}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ;

$N_{21}$  — ввод в накопитель GPZ копий  $T_{pj}$ ,  $j = \overline{1, J}$ ;

$T_{21}$  — вывод транзактов  $T_{pj}^0$  из модели

Тип заявки — по маршруту транзакта в ССМО (последовательность ОУ).

### 6. ЛСМА системы обработки заявок

$$U_3 = G_{31}^r q_{31} \uparrow^{31} A_{31} \downarrow^{38} V_{31} \uparrow^{32} T_{31} \downarrow^{32} A_{32} \downarrow^{34} \times \\ \times A_{33} q_{32} \uparrow^{33} A_{34} S_{31} A_{35} g_{31} E_{31} Z_{31} R_{31} w \uparrow^{34} \downarrow^{33} K_{31} \uparrow^{35} \times \\ \times N_{31} \downarrow^{35} T_{32}^1 \downarrow^{31} q_{34} \uparrow^{36} S_{32} \downarrow^{36} S_{33} A_{36} A_{37} q_{35} \times \\ \times \uparrow^{37} w \uparrow^{38} \downarrow^{37} S_{34} w \uparrow^{38};$$

где  $G_{31}^r$  — генератор однородного потока заявок

$$j = \overline{1, J} \text{ с интенсивностью } \lambda_0 = \sum_{i=1}^J \lambda_i;$$

$$q_{31} \begin{cases} 1 - x\$vid = 1; \\ 0 - x\$vid = 0; \end{cases}$$

$A_{31}$  —  $*1 := FN\$TYP$ ;

$V_{31}$  — извлечение  $T_{pj}$  из накопителя GPZ;

$T_{31}$  — вывод извлекающего  $T_{pj}$  из модели;

$A_{32}$  —  $*111 := 1$ ;

$A_{33}$  —  $*111 = *111 + 1$ ;

$$q_{32} \begin{cases} 1 - \text{если } P*111 < 1\,000\,000; \\ 0 - \text{если } P*111 = 1\,000\,000; \end{cases}$$

$A_{34}$  —  $*112 := P*111$ ;

$S_{31}$  —  $x7 := P*111$ ;

$A_{35}$  —  $*112 := x7$ ;

$$g_{31} = \begin{cases} 1 - \text{если } BV * 112 = 1; \\ 0 - \text{если } BV * 112 = 0; \end{cases}$$

$E_{31}$  — занять  $OY * 112$ ;

$Z_{31}$  — задержка  $T_{Pj}$ ;

$R_{31}$  — освобождение  $OY * 112$ ;

$K_{31}$  — создание копии  $T_{Pj}$ ;

$N_{31}$  — возврат  $T_{Pj}$  в накопитель GPZ;

$T_{32}$  — счетчик количества обслуженных  $T_{Pj}$ ;

$$q_{31} = \begin{cases} 1 - x1000 = 0; \\ 0 - x1000 \neq 0; \end{cases}$$

$S_{32}$  —  $x1000 := 1$ ;

$S_{33}$  —  $x1000 = x1000 + 1$ ;

$A_{36}$  —  $*1000 := x1000$ ;

$A_{37}$  —  $*1 := mx4(1, *1000)$ ;

$S_{34}$  —  $x1000 := 0$

ЛСМА  $U_1, U_2, U_3$  выполнены с ориентацией на инструментальную среду GPSS World, что позволило установить однозначное соответствие GPSS-программы данным моделирующим алгоритмам.

### 7. GPSS-программа по ЛВФ

```

typ1 equ 1
typ1 function rn10,d2;
.5,1/1,2
vhvrem equ 3;
vhvrem matrix ,5,2;
initial mx3(1,1),100
initial mx3(1,2),50
vhtyp equ 4;
vhtyp matrix ,1,10;
initial mx4(1,1),3;
initial mx4(1,2),1
initial mx4(1,3),2
initial x$vid,0;
hustr equ 1;
hustr matrix ,5,10;
initial mx1(1,2),1;
initial mx1(1,3),3
initial mx1(1,4),5;

```

```

initial mx1(1,5),1000000;
initial mx1(2,2),2;
initial mx1(2,3),3;
initial mx1(2,4),4;
initial mx1(2,5),1000000;
vrem equ 2;
vrem matrix ,20,3;
initial mx2(1,1),11
initial mx2(1,2),5
initial mx2(2,1),12
initial mx2(2,2),7
initial mx2(3,1),13
initial mx2(3,2),6
initial mx2(4,1),9
initial mx2(4,2),4
initial mx2(5,1),21
initial mx2(5,2),11
klk1 equ 1;
klk1 bvariable 1s1
klk2 equ 3
klk2 bvariable 1s3
klk3 equ 4
klk3 bvariable 1s4
klk4 equ 5
klk4 bvariable 1s5
klk5 equ 2
klk5 bvariable 1s2
generate .5,,1; G11
logic s 1; L11
logic s 2; L12
logic s 3; L13
logic s 4; L14
logic s 5; L15
terminate; 1
generate 1,,2; G21
savevalue 1+,1; S21
assign 1,x1; A21
assign 100,1; A22
gis1 assign 100+,1; A23
test 1 mx1(*1,*100),1000000,tis1; q21
assign *100,mx1(*1,*100); A24
transfer ,gis1; w
tis1 assign *100,mx1(*1,*100); A25
split 10,lnk1; K21
buffer;
terminate; T21
lnk1 link gpz,fifo; N21
generate mx3(1,1),mx3(1,2); G31
test e x$vid,1,determ; q31

```

```

transfer ,ppp; w
determ test e x1000,0,vall; q34
savevalue 1000,1; S32
vall savevalue 1000+,1; S33
assign 1000,x1000; A36
assign 1,mx4(1,*1000); A37
test l *1000,mx4(1,1),obnul; q35
transfer ,unk1; w
pp assign 1,fn$typ1; A31
unk1 unlink gpz,potok,1,1,,rmi1; V31
terminate; T31
obnul savevalue 1000,0; S3
transfer ,unk1; w
potok assign 111,1; A32
gis2 assign 111+,1; A33
test l p*111,1000000,tis2; q32
assign 112,p*111; A34
savevalue 7,p*111; S31
assign 112,x7; A35
test e bv*112,1,rmi3; g31
seize *112; E31
advance mx2(*112,1),mx2(*112,2); Z31
release *112; R31
transfer ,gis2; w
tis2 split 1,rmi2; K31
lnk2 link gpz,fifo; N31
rmi1 terminate;
rmi2 terminate 1; T32
rmi3 terminate;

```

### Заключение

Оценка системотехнических решений на различных этапах жизненного цикла СЖАТ, как правило, выполняется с использованием методов имитационного моделирования. Аппаратно-программные средства СЖАТ рассматриваются как системы массового обслуживания с жесткой технической структурой, в отличие от систем организационно-технологического типа, для которых определяющей является функционально-алгоритмическая структура. Предложенная ЛВФ ИМ предназначена для синтеза моделей СЖАТ с жесткой структурой и заданной строгой последовательностью многофазного обслуживания заявок разного типа. Тип заявки в данном контексте определяется только подмножеством ОУ и последовательностью их использования в

процессе обработки заявок. Модель, построенная на основе ЛВФ, является транзактной, процессной, асинхронной, дискретно-событийной моделью ССМО с жесткой структурой и реализуется в инструментальной среде GPSS World.

В работе получены следующие результаты:

1. Сформулирована концепция ЛВФ моделей СЖАТ как ССМО, основанная на записи идентификаторов ОУ в параметры транзактов  $T_{pj}$ ; с учетом последовательности их использования в процессе обработки заявок  $j$ -го типа.
2. Предложен новый подход к построению ГПЗ с использованием в качестве буферного накопителя транзактов  $T_{pj}$ ; списка пользователя GPZ и двухэтапной процедуры генерации  $T_{pj}$ ; с записью идентификаторов ОУ в параметры транзакта по типу  $j$ . Такой подход позволяет существенно сократить затраты машинного времени на выполнение ИЭ.
3. Разработан алфавит и с его использованием логические схемы моделирующих алгоритмов ИМ, реализующих концепцию ЛВФ.
4. По ЛСМА разработана GPSS-программа.
5. Таким образом, предложенный подход к синтезу ИМ СЖАТ с жесткой структурой проиллюстрирован реализацией в виде GPSS-программы, позволившей сделать вывод о возможности и эффективности по времени разработки моделей конкретных СЖАТ и выполнения ИЭ.
6. Существенное сокращение времени разработки ИМ СЖАТ достигается за счет настройки GPSS-программы на конкретную систему на уровне исходных данных, занесением в соответствующие матрицы, непрерывные и дискретные функции, булевы переменные данных о вероятностно-временных, структурных и логических свойствах моделируемой СЖАТ.

Предложенный подход к синтезу ИМ СЖАТ представляется авторам (на уровне экспертной оценки) перспективным и предполагает развитие по следующим направлениям:

- развитие логики моделирования многопозиционных устройств ЖАТ;

- разработка широкого класса моделей устройств ЖАТ как ОУ в рамках ЛВФ;
- разработка алгоритмов и программ моделей управления двумя и многопозиционными объектами в соответствии с логикой различных СЖАТ;
- разработка алгоритмов и программ управления изменением последовательности использования ОУ в процессе обработки заявки  $j$ -го типа;
- разработка алгоритмов и программ управления СИЭ с учетом особенностей ЛВФ ИМ, прежде всего задания последовательности ОУ при многофазном обслуживании в параметрах  $T_{pj}$  и оценки логики доступности процессов обработки заявок булевыми функциями;
- выполнение оценочных процедур построения ИМ и проведения СИЭ для конкретных СЖАТ. ▲

### Библиографический список

1. Марков Д. С. Технология имитационного моделирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. С. Марков, Т. Ю. Константинова, А. А. Лыков и др. // Автоматика на транспорте. — 2023. — Т. 9. — № 2. — С. 193–204. — DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204.
2. Марков Д. С. Матричный метод формализации имитационных моделей сложных систем массового обслуживания / Д. С. Марков, П. Е. Булавский // Известия ПГУПС. — 2010. — Вып. 4. — С. 63–74.
3. Лыков А. А. Метод формализации имитационных моделей технологических процессов в хозяйстве автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте / А. А. Лыков, Д. С. Марков. — СПб.: Известия ПГУПС, 2012. — Вып. 1. — С. 23–38.
4. 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. ПГУПС. — СПб., 2013. — С. 52–60.
5. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. — 363 с.
6. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis / A. M. Law, W. D. Kelton. — Fourth Edition. — McGraw-Hill, 2007. — 768 p.
7. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation / O. Balci // Simulation. — 2012. — Vol. 88(7). — Pp. 870–883.
8. Марков Д. С. Формализация алгоритмического описания систем обеспечения жизненного цикла железнодорожной автоматики и телемеханики / Д. С. Марков, В. Б. Соколов, Т. Ю. Константинова // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1. — № 4. — С. 418–433.
9. 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. ПГУПС. — СПб., 2014. — С. 43–47.
10. Кудрявцев Е. М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем: монография / Е. М. Кудрявцев. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 37 с.
11. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World / В. Д. Боев. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 348 с.
12. Девятков В. В. Имитационные исследования в среде моделирования GPSS STUDIO / В. В. Девятков, Т. В. Девятков, М. В. Федотов. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 283 с.
13. Девятков В. В. Руководство пользователя по GPSS World / В. В. Девятков. — Казань: Мастер Лайн, 2002. — 383 с.
14. Rabe M. Verifikation und Validie — rung fur die Simulation in Produktion und Logistik / M. Rabe, S. Spieckermann, S. Wenzel. — Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. — 195 p.
15. Carson J. S. Model verification and validation / J. S. Carson // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. — 2002. — Pp. 52–58.
16. Sargent R. G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models / R. G. Sargent // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. — 2001. — Pp. 106–114.
17. Лазарев В. Г. Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 328 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 4, pp. 368–376  
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-04-368-376

#### Logical Time Formalization of Simulation Models for Railway Automation and Remote Control Systems

##### Information about authors

**Belishkina T. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department.  
E-mail: belishkina@mail.ru

**Konstantinova T. Yu.**, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department.  
E-mail: at-tanya@mail.ru

**Lykov A. A.**, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department.  
E-mail: bastdrew@mail.ru

**Markov D. S.**, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department.  
E-mail: MDS1945@yandex.ru

**Mikado E. N.**, Head of Laboratory of the Department.  
E-mail: mikadowork@yandex.ru

**Sokolov V. B.**, PhD in Engineering, Associate Professor of the Department.  
E-mail: SVB9@yandex.ru

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, "Automation and Remote Control on Railways" Department, St. Petersburg

**Abstract:** The purpose of the article is to present the results of developing a method for formalizing simulation models of railway automation and remote control systems as queuing systems with a rigidly regulated sequence of using service devices while processing streams of requests of various types. For the software implementation of simulation models with such properties, the GPSS World tool is traditionally used. The logical time formalization is proposed, and the concept of the proposed formalization of simulation models is formulated. Its main provisions include: the type of request is determined solely by the composition and sequence of occupation and release of servicing devices; the use of transaction parameters to organize their multiphase processing for each type of request; checking the value of Boolean functions for each procedure of processing requests for each type; the regulated time in the procedure of processing requests is considered as one of the many logical conditions of Boolean functions; logical and parametric description of the modeled system should be performed at the level of initial data without changing the text of the modeling program. Objects in GPSS World sufficient for implementing this concept have been identified. Using the selected objects, an alphabet has been compiled, and logical diagrams of modeling algorithms have been developed in the obtained alphabet. This serves as a demonstration of the application of the logical time concept for the formalization of simulation models of complex queuing systems. A GPSS program has been developed to confirm the possibility and feasibility of using the proposed method for formalizing simulation models of railway automation systems with a rigid structure.

**Keywords:** railway automation and remote control systems; queuing systems with a rigid structure; simulation model; Boolean functions; model formalization; logical algorithm schemes.

#### References

1. Markov D. S., Konstantinova T. Yu., Lykov A. A. et al. Tekhnologiya imitatsionnogo modelirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Technology of simulation modeling of railway automation and telemechanics systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2023, vol. 9, Iss. 2, pp. 193–204. DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-02-193-204.
2. Markov D. S., Bulavskiy P. E. Matrichnyy metod formalizatsii imitatsionnykh modeley slozhnykh sistem massovogo obsluzhivaniya [Matrix method for formalizing simulation models of complex queuing systems]. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2010, Iss. 4, pp. 63–74.
3. Lykov A. A., Markov D. S. *Metod formalizatsii imitatsionnykh modeley tekhnologicheskikh protsessov v khozyaystve avtomatiki i telemekhaniki na zheleznodorozhnom transporte* [Method for formalizing simulation models of technological processes in the field of automation and telemechanics in railway transport]. St. Petersburg: Izvestiya PGUPS Publ., 2012, Iss. 1, pp. 23–38.
4. Markov D. S., Bulavskiy P. E. Ierarkhicheskaya mnogomatrixnaya formalizatsiya imitatsionnoy modeli elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii [Hierarchical multi-matrix formalization of a simulation model of electronic document management of technical documentation]. *Aktual'nye voprosy razvitiya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. tr. PGUPS* [Current issues in the development of railway automation and telemechanics systems: collection. scientific tr. PGUPS]. St. Petersburg, 2013, pp. 52–60.
5. Aliev T. I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Fundamentals of modeling discrete systems]. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2009, 363 p.
6. Law A. M., Kelton W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. Fourth Edition, McGraw-Hill, 2007, 768 p.
7. Balci O. A Life Cycle for Modeling and Simulation. *Simulation*, 2012, vol. 88(7), pp. 870–883.
8. Markov D. S., Sokolov V. B., Konstantinova T. Yu. Formalizatsiya algoritmicheskogo opisaniya sistem obespecheniya zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Formalization of algorithmic description of life cycle support systems for railway automation and telemechanics]. *Avtomatika na transporte* [Automation in Transport]. 2015, vol. 1, Iss. 4, pp. 418–433.
9. Markov D. S., Sokolov V. B. Metod portsiionnogo modelirovaniya transportnykh sistem massovogo obsluzhivaniya [Method of batch modeling of queuing transport systems]. *Razvitie elementnoy bazy i sovershenstvovanie metodov postroyeniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: sb. nauch. tr. PGUPS* [Development of the element base and improvement of methods for constructing devices for railway automation and telemechanics: collection. scientific tr. PGUPS]. St. Petersburg, 2014, pp. 43–47.
10. Kudryavtsev E. M. *GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya razlichnykh sistem: monografiya* [GPSS World. Fundamentals of simulation modeling of various systems: monograph]. Moscow: DMK Press Publ., 2018, 37 p.
11. Boev V. D. *Modelirovanie sistem. Instrumental'nye sredstva GPSS World* [Modeling of systems. GPSS World tools]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg Publ., 2004, 348 p.
12. Devyatkov V. V., Devyatkov T. V., Fedotov M. V. *Imitatsionnye issledovaniya v srede modelirovaniya GPSS STUDIO* [Simulation studies in the GPSS STUDIO modeling environment]. Moscow: INFRA-M Publ., 2019, 283 p.
13. Devyatkov V. V. *Rukovodstvo pol'zovatelya po GPSS World* [User's Guide for GPSS World]. Kazan': Master Layn Publ., 2002, 383 p.
14. Rabe M., Spieckermann S., Wenzel S. *Verifikation und Validie — rung fur die Simulation in Produktion und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, 195 p.
15. Carson J. S. Model verification and validation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 2002, pp. 52–58.
16. Sargent R. G. Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 2001, pp. 106–114.
17. Lazarev V. G., Piyl' E. I. *Sintez upravlyayushchikh avtomatov, 3-e izd., pererab. i dop.* [Synthesis of control automata]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 328 p.