

УДК 656.216.2

Ришат Зинфирович Галинуров, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Антон Николаевич Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПЕРЕЕЗДНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Rishat Zinfirovich Galinurov, Assistant Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Anton Nikolaevich Popov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Study of level crossing safety installation operation parameters on the basis of stochastic modeling

Аннотация

Причины, приводящие к простою автотранспорта у закрытого переезда и к росту числа транспортных происшествий в местах пересечения железнодорожной линии с автодорогой, во многом обусловлены несовершенством действующей методики расчета параметров переездной сигнализации.

В статье предложен вероятностный метод исследования переездной сигнализации, при котором учитываются параметры движения потока железнодорожного транспорта. Для построения стохастической модели используется аппарат теории сетей Петри. Кроме того, рассмотрены вопросы аналитического исследования модели на основе теории графов и теории полумарковских процессов. По результатам стохастического моделирования выполнен расчет параметров устройств переездной сигнализации.

Ключевые слова: железнодорожный переезд, параметры движения поезда, расчет участков извещения, сети Петри, полумарковский процесс.

Abstract

Reasons that lead to delay of motor transport at a closed railway crossing and to increase of a number of transport accidents at road level intersections are caused by the imperfection of the currently used method for calculation of parameters of level crossing safety installations.

The paper proposes a probabilistic method for studying level crossing safety installations that considers parameters of railway transport traffic. For the creation of a stochastic model the authors have applied the Petri nets theory. Besides they have considered issues of analytical studying of the model on the basis of the graph theory and the theory of semi-Markovian processes. As a result, on the basis of stochastic modeling the authors have calculated parameters of devices for a level crossing safety installation.

Keywords: railway crossing, train movement parameters, calculation of approach sections, Petri nets, semi-Markovian process.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-42-49

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности функционирования систем автоматической переездной сигнализации (АПС) и минимизация времени простоя автотранспорта на железнодорожных переездах до сих пор остается актуальной задачей, особенно в связи с увеличением интенсивности автомобильного потока и расширением диапазона скоростей движения железнодорожного транспорта.

Согласно работам [1, 2], основными мероприятиями, позволяющими минимизировать время закрытого состояния переезда, являются:

- уменьшение длины участка извещения;
- управление АПС по характеристикам поезда.

С другой стороны, в [3, 4] поднимается вопрос безопасности на переездах при наличии препятствий на пересечении с автодорогой. Теоретически подтверждено, что существующие методы расчета участков извещения переездной сигнализации не обеспечивают перед закрытым переездом остановку поезда торможением, если возникает такая необходимость. К мероприятиям, позволяющим снизить вероятность столкновений на переездах [5, 6], относятся:

- увеличение длины участка извещения;
 - снижение скорости поезда на участке приближения к переезду;
 - совершенствование средств торможения поезда;
 - управление АПС по характеристикам поезда.
- Согласно указаниям [7], параметры работы АПС устанавливаются на основе следующих зависимостей:

$$\begin{cases} t_{\text{и}}^{\text{п}} = f(L_{\text{пер}}) + t_{\text{пр}} + t_{\text{г}}, \\ l_{\text{и}}^{\text{п}} = f(V_{\text{max}}, t_{\text{и}}^{\text{п}}) \end{cases}, \quad (1)$$

где $t_{\text{и}}^{\text{р}}$ — расчетное время извещения о приближении железнодорожного подвижного состава к переезду, с;

$L_{\text{пер}}$ — длина переезда, м;

$t_{\text{пр}}$ — время срабатывания устройств АПС, с;

$t_{\text{г}}$ — гарантийное время, с;

$l_{\text{р}}^{\text{и}}$ — расчетная длина участка извещения, м;

V_{max} — установленная максимальная скорость движения поездов на участке, м/с.

Однако время закрытого состояния переезда зависит не только от длины участка извещения и скорости поезда, но и от длины состава (рис. 1). Поэтому с точки зрения анализа работы переездной сигнализации во временной области следует учитывать время полного освобождения подвижным составом зоны пересечения с автомобильной дорогой, включая участок удаления.

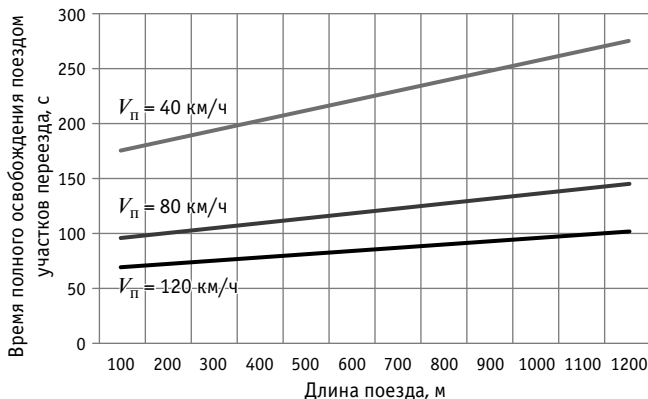


Рис. 1. Зависимость времени полного освобождения поездом участков переезда от длины и скорости поезда

Недостатки существующей методики расчета параметров автоматической переездной сигнализации [7] заключаются в том, что она не учитывает:

поток движения поездов;

категории поездов на участке;

параметры движения (длину, вес, скорость) подвижных составов, обращающихся на участке.

В настоящее время развитие и совершенствование бортовых локомотивных комплексов и систем мониторинга движения поездов позволяют изменить подход к расчету временных параметров работы переездной сигнализации на основе данных о параметрах движения и характеристиках поездов, обращающихся на участке.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Взаимодействие транспортного потока с устройствами переездной сигнализации можно рассматривать как транспортный процесс, который подчиняется стохастическим закономерностям, таким как неравномерность транспортного потока, неодинаковое время прохождения участков пути, случайный характер событий на транспорте и др. Для изучения подобных стохастических процессов успешно применяются теория массового обслуживания [8]. При этом система массового обслуживания характеризуется входным потоком, очередью и временем обслуживания.

В качестве анализируемого показателя моделируемого процесса примем временные зависимости функционирования автоматической переездной сигнализации T . При этом воздействие входного потока на параметры переездной сигнализации на однопутном участке железнодорожной линии описывается одиночными потоками Π (рис. 2), а временные параметры работы переезда зависят от значений скорости и длины заданных поездов $T(V_{\text{п}}, l_{\text{п}})$.

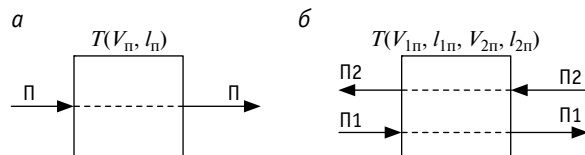


Рис. 2. Схема взаимодействия потока:

а — однонаправленный одиночный поток П;

б — двухнаправленные одиночные потоки П1 и П2

Однако описать реальный поток поездов одним параметром потока невозможно, поэтому будем учитывать классификацию поездов (рис. 3), так как длина составов, а также скорости и тормозные характеристики различных категорий поездов существенно отличаются.

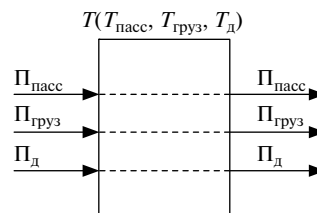


Рис. 3. Разнородный однонаправленный поток, описывающий движение пассажирских ($\Pi_{\text{пасс}}$), грузовых ($\Pi_{\text{груз}}$) и прочих ($\Pi_{\text{д}}$) поездов

Формально, с точки зрения описания динамических систем, процесс взаимодействия подвижного состава и устройств переездной сигнализации можно описать следующим выражением:

$$U(T, X, T_{\text{инт}}, V_k, a_k, L_k, \phi_{ij}^k), \quad (2)$$

где T — множество, определяющее моменты времени;

X — множество состояний моделируемой системы;

$T_{\text{инт}}$ — множество, характеризующее величину межпоездного интервала;

V_k — множество, характеризующее скорость k -го поезда на участке извещения о приближении к переезду;

a_k — множество, характеризующее ускорение k -го поезда на участке извещения о приближении к переезду;

L_k — множество, характеризующее длину k -го поезда;

ϕ_{ij}^k — переходная функция состояний для k -го поезда, причем переход из состояния i в состояние j в момент времени $t_{i,j}^k \in T$ зависит от параметров движения k -го поезда.

Для построения стохастической модели и анализа временных параметров исследуемого объекта необходимо корректное описание изменений состояний системы.

ВЫБОР ФОРМАЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

При описании подобных событийных динамических систем будем использовать методы моделирования на основе сетей Петри.

В работах отечественных ученых [9, 10] предложено и обосновано применение сетей Петри для построения моделей, описывающих процесс движения поездов. В том числе сети Петри могут использоваться при оценке времени поиска отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. В зарубежных источниках предлагается применять сети Петри для оценки эффективности и безопасности системы интервального регулирования движения поездов [11, 12], устройств ERTMS/ETCS [13], а также для построения модели влияния отказов поездной радиосвязи на движение поездов [14].

Сети Петри (СП) представляют собой графический формализм, позволяющий описывать и анализировать логико-временные процессы функционирования динамических систем. СП задаются как кортеж $P_N = (P, T, I, M_0)$, где $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ — конечное и непустое множество мест, $T = \{t_1, \dots, t_m\}$ — конечное и непустое множество переходов, I — функция перехода, M_0 — начальное состояние системы.

Графическим представлением СП служит двудольный ориентированный граф с двумя типами вершин: это условия (места) и события (переходы), характеризующие состояние системы. Функционирование СП описывается множеством событий, изменяющихся согласно условиям, и множеством достижимых в сети состояний [15].

Однако классические СП не подходят для анализа количественных и временных параметров. Поэтому для функционального описания моделируемых процессов более корректно использовать временные сети Петри (ВСП), которые учитывают время реализации событий. В отличие от СП, для ВСП возможность наступления очередного события зависит не только от текущего состояния сети, но и от того, сколько времени прошло после наступления предыдущего события [16]. Если изменение состояний моделируемого процесса носит вероятностный характер, то подобные системы описываются с помощью стохастических сетей Петри (ССП).

Среди достоинств применения аппарата СП выделяют возможность:

моделировать асинхронность и параллельные независимые события;

строить модель сложных динамических систем;

анализировать отдельные подсистемы модели;

детализировать события, происходящие в модели.

Анализ СП стандартно проводится при помощи марковских процессов с дискретным множеством состояний. Поскольку используемые статистические данные для построения модели (длины и скорости поездов на перегоне, длины участков извещения о приближении подвижного состава к переезду и др.) не являются экспоненциально распределенными, при анализе сетей Петри необходимо учитывать сложные формы распределения для параметров задержек срабатывания переходов СП. Поэтому процессы рассматриваются в качестве полумарковских, но система остается марковской в том смысле, что следующее состояние зависит от текущего состояния, а длительность времени смены событий в системе зависит от заданных условий.

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРЫ МОДЕЛИ И ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

В статье представлена математическая модель функционирования системы автоматической переездной сигнализации однопутного железнодорожного участка с учетом параметров движения поезда. Исходные данные модели:

максимальная допустимая скорость движения на участке;

длина участка извещения;

ширина и длина переезда;

скорость движения подвижного состава;

длина подвижного состава.

Зона железнодорожного переезда (рис. 4) задается участком извещения $L_{изв}$, длиной переезда $L_{пер}$, участком удаления $L_{уд}$. Также в расчете необходимо учитывать длину поезда L_k , которая определяет полное освобождение подвижным составом участка удаления и прекращение подачи извещения в устройства автоматической переездной сигнализации.

Для поезда, следующего по указанным участкам, задаются фазы равномерного движения:

в зоне извещения;

на участке пересечения с автодорогой;

при выезде с участка пересечения с автодорогой.

Формализация функционирования системы автоматической переездной сигнализации при движении поезда, представленной структурой сети Петри (рис. 5), сводится к имитации проследования поезда по участкам зоны переезда с учетом заданных параметров движения.

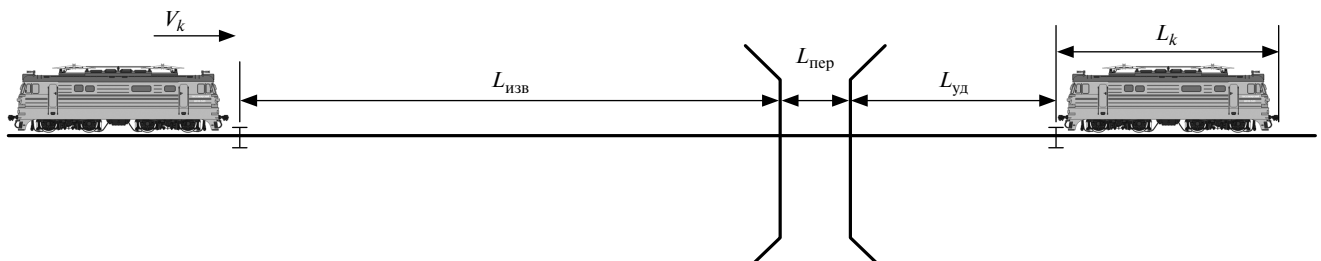


Рис. 4. Входные данные для построения модели функционирования переездной сигнализации

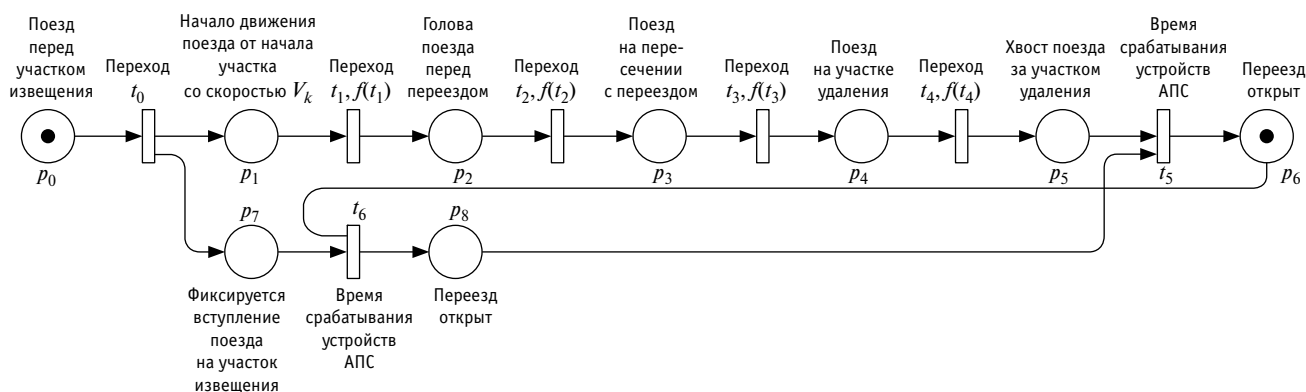


Рис. 5. Сеть Петри, описывающая функционирование переездной сигнализации при движении подвижного состава

Таблица 1

Описание условий построенной сети Петри

Условия	
p_0	Задан поезд с параметрами V_k, l_k
p_1	Поезд вступил на участок извещения о приближении поезда к переезду
p_2	Голова поезда перед переездом
p_3	Поезд на участке пересечения с автодорогой
p_4	Поезд вступил на участок удаления
p_5	Поезд полностью освободил участок удаления
p_6	Переезд открыт
p_7	Путевые датчики фиксируют занятие участка извещения
p_8	Переезд закрыт

Таблица 2

Описание событий построенной сети Петри

События	
t_0	По истечении времени t_0 задается поезд на приближении к участку извещения переезда, проходящий через рассматриваемый участок
t_1	Когда участок извещения свободен, но поезд на приближении имеется, то по истечении времени t_1 голова поезда полностью проедет участок извещения $L_{изв}$ с заданной скоростью V_k
t_2	Когда голова поезда перед переездом, то по истечении времени t_2 голова поезда полностью проедет участок пересечения с автодорогой $L_{пер}$ с заданной скоростью V_k
t_3	Когда поезд находится на участке пересечения с автодорогой, то по истечении времени t_3 голова поезда полностью проедет участок удаления $L_{уд}$ с заданной скоростью V_k
t_4	Когда поезд на участке удаления, то по истечении времени t_4 хвост поезда освободит участок удаления $L_{уд}$ с заданной скоростью V_k
t_5	Когда извещение на переезд неактивно и переезд закрыт, то за время t_5 переезд открывается
t_6	Когда извещение на переезд активно и переезд открыт, то за время t_6 переезд закрывается

Представленная непрерывно-временная стохастическая сеть Петри N имеет множество мест $P_N = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\}$ и переходов $T_N = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}$. При этом переходы t_1, t_2, t_3, t_4 задаются законом распределения вероятностей времени их срабатывания либо в виде функции распределения $F_i(x)$, либо в виде плотности распределения $f_i(x)$, так как время срабатывания переходов зависит от скорости движения поезда по участкам. Описание условий и событий построенной сети Петри приведено в табл. 1 и 2.

Графическое построение и анализ сетей Петри возможны с помощью доступных инструментов (например, таких как CPN Tools [17], Oris Tool [18], Pipe [19], и др.).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Согласно предлагаемому подходу, для анализа временных параметров работы переездной сигнализации задаются: известные размеры движения грузовых, пассажирских и пригородных поездов в соответствии с данными графика исполненного движения поездов, распределение длин поездов на рассматриваемом участке и распределение скоростей на участке извещения о приближении подвижного состава к переезду. Для получения гистограммы этих распределений можно воспользоваться данными со скоростемерных лент или с локомотивных бортовых комплексов.

Исследуемый переезд на однопутном железнодорожном участке оборудован устройствами переездной сигнализации и устройствами заграждения. В соответствии с установленной на участке максимальной скоростью движения поездов вычислены расчетное время подачи извещения и расчетная длина участка извещения (табл. 3). Перегон оборудован токовыми рельсовыми цепями, по изменению состояний которых контролируется свобода участка извещения о приближении поезда к переезду.

Таблица 3

Параметры исследуемого переезда

V_{\max} км/ч	$L_{пер}$ м	$S_{пер}$ м	$t_{пр}^H$ с	$I_{пр}^P$ м	$L_{изв}$ м	$L_{уд}$ м
120	10	15	45	1510	1615	190

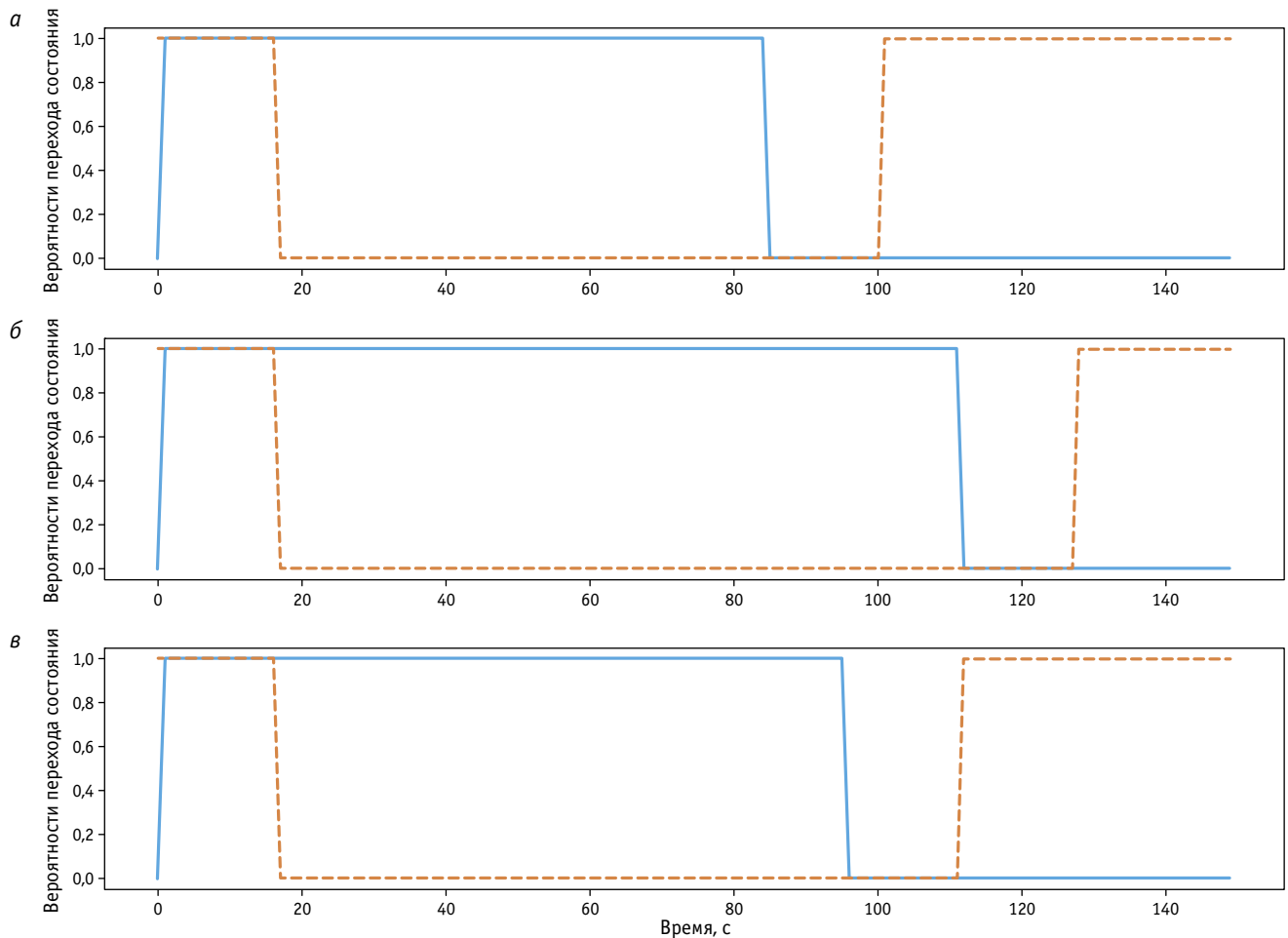


Рис. 6. Кривые смены состояний моделируемой системы:

а — для подвижного состава длиной 900 м с заданной скоростью движения по участкам зоны переезда 120 км/ч; *б* — для состава длиной 900 м со скоростью движения 90 км/ч; *в* — для состава длиной 500 м со скоростью движения 90 км/ч;
— поезд в зоне переезда; — переезд открыт

При анализе можно использовать метод редукции числа состояний для ССП, позволяющий получить значения математического ожидания и дисперсий времени достижения состояний [20]. Значение математического ожидания $M(t_k)$, дисперсии $D(t_k)$ и функции плотности распределения $f_k(t)$ любых последовательных переходов из события p_i в событие p_{i+1} определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} M(t_k) = \sum_i^n M(t_{i,i+1}) \\ D(t_k) = \sum_i^n D(t_{i,i+1}) \cdot \\ f_k(t) = f_i(t) \cdot f_{i+1}(t) \end{cases} \quad (3)$$

Результаты анализа также можно представить в виде переходных функций, характеризующих пространство достижимых состояний во временной области (рис. 6). Полученные кривые показывают, что время закрытого состояния переезд-

ной сигнализации различно при различных параметрах движения подвижного состава. Таким образом, построенная модель адекватно описывает работу АПС. Однако ввиду того что время пребывания в определенном условии построенной сети Петри (см. рис. 5) зависит от задаваемых параметров движения поезда, анализ переходных кривых неудобен при вычислении статистических характеристик, определяющих состояние системы.

Также анализ временных интервалов между событиями в сетях Петри возможен с использованием аппарата полумарковских процессов [20]. Для получения числовых параметров построенной модели (см. рис. 5) анализ сети Петри сводится к построению графа достижимости (ГД) (рис. 7) на основе матрицы состояний модели (рис. 8), характеризующей изменение состояний системы.

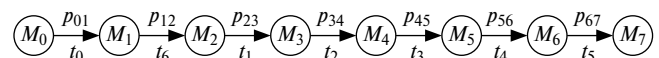


Рис. 7. Граф достижимости для анализируемой сети

Условия Состояния	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
M_0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
M_1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
M_2	0	1	0	0	0	0	0	0	1
M_3	0	0	1	0	0	0	0	0	1
M_4	0	0	0	1	0	0	0	0	1
M_5	0	0	0	0	1	0	0	0	1
M_6	0	0	0	0	0	1	0	0	1
M_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Рис. 8. Матрица состояний

ГД, представляет собой непрерывную полумарковскую цепь и описывается:

множеством состояний $\{M\}$;

множеством значений переходных вероятностей p_{ij} из состояния i в состояние j , где $i, j \in M$;

функцией или плотностью распределения времени пребывания $F_i(t), f_i(t)$ в состояниях.

Стандартный процесс анализа полумарковских цепей достаточно полно изучен в работах [21–23] и включает следующие этапы:

- 1) определение переходных вероятностей вложенной цепи Маркова p_{ij} и составление матрицы переходных вероятностей;
- 2) определение закона распределения времени срабатывания «быстрого» из активных r переходов i -го состояния

$$F_i'(t) = 1 - \prod_{i=0}^r [1 - F_i(t)]; \quad (4)$$

3) определение математического ожидания времени непрерывного пребывания процесса в состоянии i , при этом, если время перехода задано функцией распределения, применимо выражение (5), если время перехода задано плотностью распределения, то применимо выражение (6):

$$m_i = \int_0^{\infty} t dF_{ij}(t); \quad (5)$$

$$m_i = \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt. \quad (6)$$

Результаты расчета для состояний $\{M\}$ исследуемого полумарковского процесса (см. рис. 8) в виде вероятностей соответствующих состояний вложенной цепи Маркова (p_{ij}) и математического ожидания времени пребывания модели в состояниях (m_i) приведены в табл. 4.

Результаты моделирования функционирования железнодорожного переезда на основе ССП можно представить в виде гистограмм, показывающих распределение значений параметров работы переездной сигнализации. В качестве искоемых количественных признаков нами выделены время закрытого состояния переезда для различных категорий поездов (рис. 9) и значения длин участков извещения, рассчитанных исходя из реальных данных о параметрах движения поездов на исследуемом железнодорожном участке (рис. 10).

Таблица 4

Результаты расчета

Состояния	p_{ij}	m_i
M_0	0,14	0
M_1	0,14	15
M_2	0,14	64,65
M_3	0,14	0,45
M_4	0,14	7,05
M_5	0,14	20,5
M_6	0,14	15
M_7	0,14	∞

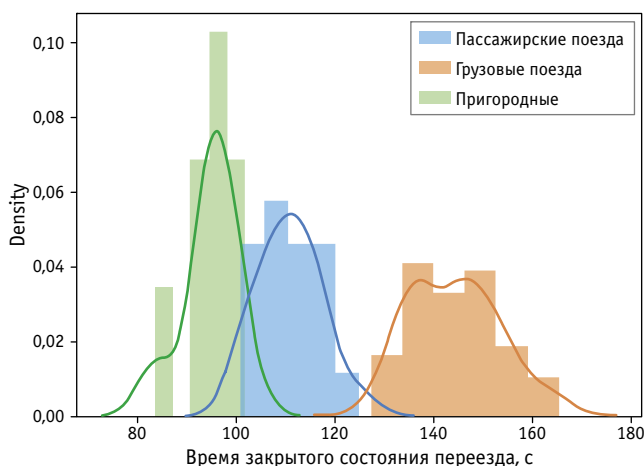


Рис. 9. Гистограммы времени закрытого состояния переезда для различных категорий поездов на исследуемом участке

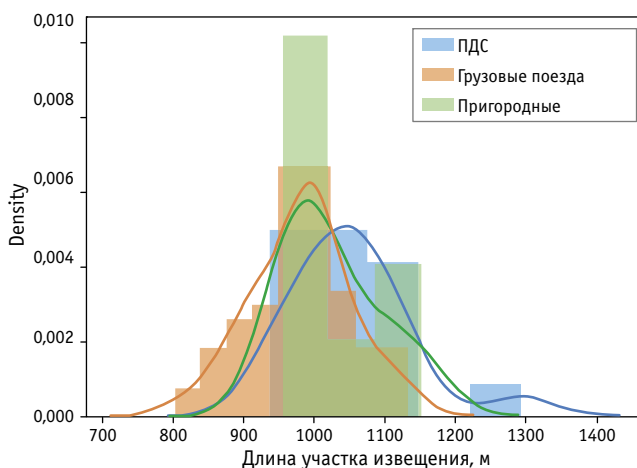


Рис. 10. Гистограммы значений длин участков извещения для различных категорий поездов

Ожидаемое значение времени длительности закрытого состояния переезда для грузового движения составляет $\bar{t}_{\text{ГР}} = 143,8$ с, для поездов дальнего следования $\bar{t}_{\text{Пасс}} = 111,3$ с, для пригородных поездов $\bar{t}_{\text{д}} = 98,42$ с. Суммарное взвешенное

по плотности распределения времени закрытого состояния переезда в сутки для одного направления движения поездов по данным расчетам составит $\bar{T}_{\text{загр}} = 4$ ч.

На основе полученных результатов выявлено, что 99 % полученных значений (99-й процентиль) длин участков извещения не превышают 1269 м, а максимальное значение составляет 1274 м. Таким образом, фактическое значение длины участка извещения, равное 1615 м, для исследуемого участка с заданными характеристиками движения поездов является избыточным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к исследованию параметров работы переезда может стать основой для создания методов оценки эффективности функционирования устройств АПС с учетом данных о характеристиках движения потока поездов на конкретном участке. Определение избыточности в существующих технических решениях устройств АПС позволит усовершенствовать методы расчета параметров переезда с точки зрения сокращения продолжительности его закрытого состояния.

С другой стороны, открываются перспективы практического использования стохастического моделирования для описания транспортных процессов. Такой подход позволит определить вероятности возникновения опасных факторов и аварийных событий на переезде и на основе полученных оценок разработать рекомендации по оборудованию железнодорожного переезда техническими решениями, обеспечивающими безопасное и эффективное пересечение транспортных потоков.

Литература

1. Повышение пропускной способности железнодорожных переездов самонастраивающимся алгоритмом управления АПС / Е. М. Тарасов, Г. М. Третьяков, А. А. Булатов, А. Е. Тарасова // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 2 (80). С. 63–71. ISSN 1997–0722.
2. Тарасов Е. М., Железнов Д. В., Герус В. Л. Оценка эффективности существующей переездной сигнализации // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 6 (54). С. 58–61. ISSN 1997–0722.
3. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Оценка вероятности аварийной ситуации при вынужденной остановке автомобиля на переезде // Автоматика на транспорте. 2021. № 1 (7). С. 21–38. ISSN 2412–9186.
4. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Безопасность движения при остановке автотранспорта на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом // Транспорт Урала. 2020. № 1 (64). С. 39–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42. ISSN 1815–9400.
5. Бушуев С. В., Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Автоматическое управление закрытием переезда по характеристикам приближающегося поезда // Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-3-7. ISSN 1815–9400.
6. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Время закрытия переезда при различных способах формирования участков извещения // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 29–33. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-29-33. ISSN 1815–9400.
7. Методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. И-276–00. Расчет параметров работы переездной сигнализации. URL: <http://static.scbist.com/scb/mu/I-276-00.pdf> (дата обращения: 10.06.2021).
8. Ивницкий В. А. Моделирование информационных систем железнодорожного транспорта. Москва : УМЦ ЖДТ, 2015. 276 с.
9. Дзюба Ю. В., Павловский А. А. Применение сетей Петри при управлении движением // Наука и технологии железных дорог. 2019. № 2 (10). С. 77–88. ISSN 2587–5752.
10. Булавский П. Е., Ваисов О. К., Быстров И. Н. Моделирование и оценка времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью сетей

References

1. Increasing the traffic capacity of railway crossings by self-tuning algorithm of automatic crossing signaling control [Povyshenie propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh pereezdov samonastroyayushhimsya algoritmom upravleniya APS] / E. M. Tarasov, G. M. Tretiakov, A. A. Bulatov, A. E. Tarasova // Bulletin of transport of the Volga region. 2020. No. 2 (80). Pp. 63–71. ISSN 1997–0722.
2. Tarasov E. M., Zheleznov D. V., Gerus V. L. Evaluation of existing level crossing signaling [Otsenka effektivnosti sushhestvuyushhey pereezdnoy signalizatsii] // Bulletin of transport of the Volga region. 2015. No. 6 (54). Pp. 58–61. ISSN 1997–0722.
3. Popov A. N., Grishaev S. Yu. Assessment of emergency probability at the time of vehicle involuntary stop on the railway crossing [Otsenka veroyatnosti avariynoy situatsii pri vyzhdennoy ostanovke avtomobilya na pereезде] // Automation on Transport. 2021. No. 1 (7). Pp. 21–38. ISSN 2412–9186.
4. Popov A. N., Grishaev S. Yu. Safety of operation when motor vehicles stop at railway crossings in front of approaching train [Bezopasnost' dvizheniya pri ostanovke avtotransporta na zheleznodorozhnykh pereezdakh pered priblizhayushhimsya poezdom] // Transport of the Urals. 2020. No. 1 (64). Pp. 39–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42. ISSN 1815–9400.
5. Bushuev S. V., Popov A. N., Grishaev S. Yu. Control of crossing closure on characteristics of approaching train [Avtomaticheskoe upravlenie zakrytiem pereezda po kharakteristikam priblizhayushhegosya poezda] // Transport of the Urals. 2021. No. 1 (68). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-3-7. ISSN 1815–9400.
6. Popov A. N., Grishaev S. Yu. Time of crossing closure at different methods of formation of notification sections [Vremya zakrytiya pereezda pri razlichnykh sposobakh formirovaniya uchastkov izveshheniya] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 29–33. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-29-33. ISSN 1815–9400.
7. Guidelines on design of automation, telemechanics and connection devices on railway transport. I-276–00. Calculation of level crossing safety installation operation parameters [Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu ustroystv avtomatiki, telemekhaniki i svyazi na zheleznodorozhnom transporte. I-276–00. Raschet parametrov raboty pereezdnoy signalizatsii]. URL: <http://static.scbist.com/scb/mu/I-276-00.pdf> (access date: 10.06.2021).
8. Ivnitkiy V. A. Modeling of railway information systems [Modelirovanie informatsionnykh sistem zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow : UMTs ZhDT, 2015. 276 p.
9. Dzuba Yu. V., Pavlovskiy A. A. Application of Petri nets in control of mobile objects [Primenenie setey Petri pri upravlenii dvizheniem]

- Петри // Автоматика на транспорте. 2019. № 4 (5). С. 478–492. ISSN 2412–9186.
11. Somsak V.-A. Modelling Railway Interlocking Tables Using Coloured Petri Nets // Coordination Models and Languages: Proceedings of 12th International Conference, COORDINATION 2010, Amsterdam, The Netherlands, 7–9 June 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13414-2_10.
 12. Chen L., Liu H., Wang W. Using Colored Petri net for Level-Crossing safety analysis // International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2018. DOI: 10.1109/ICIRT.2018.8641674.
 13. Ghazel M. A Control Scheme for Automatic Level Crossings under the ERTMS/ETCS Level 2/3 Operation // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2017. Vol. 18. No. 10. Pp. 2667–2680. DOI: 10.1109/TITS.2017.2657695.
 14. Non-Markovian performability evaluation of ERTMS/ETCS level 3 / L. Carnevali, F. Flammini, M. Paolieri, E. Vicario // European Workshop on Performance Engineering. 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23267-6_4.
 15. Королев Ю. И. Методы и программные средства моделирования сложных динамических систем на основе темпоральной модификации раскрашенных сетей Петри: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2015. 20 с.
 16. Бестужева И. И., Руднев В. В. Временные сети Петри. Классификация и сравнительный анализ // Автоматика и телемеханика. 1990. № 10. С. 3–21. ISSN 0005–2310.
 17. Jensen K., Kristensen L. M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2007. No. 9. Pp. 213–254. DOI: 10.1007/s10009-007-0038-x.
 18. The ORIS Tool: Quantitative Evaluation of Non-Markovian Systems / M. Paolieri, M. Biagi, L. Carnevali, E. Vicario // IEEE Transactions on Software Engineering. 2021. Vol. 47. No. 6. Pp. 1211–1225. DOI: 10.1109/TSE.2019.2917202.
 19. Dingle N. J., Knottenbelt W., Suto T. PIPE 2: A tool for the performance evaluation of generalised stochastic Petri Nets // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. 2009. Vol. 36. No. 4. Pp. 34–39.
 20. Угоренко Л. Ч., Сисков А. В. Методы анализа обобщенных временных стохастических сетей Петри // Системы обработки информации. 2004. № 10 (38). С. 211–223. ISSN 1681–7710.
 21. Тарасюк И. В. Стохастические сети Петри — формализм для моделирования и анализа производительности вычислительных процессов // Системная информатика. 2004. Вып. 9. С. 135–194. ISSN 2307–6410.
 22. Иванов Н. Н. Полумарковские процессы во временных стохастических сетях Петри // Автоматика и телемеханика. 1994. № 3. С. 117–127. ISSN 0005–2310.
 23. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений / Пер. с англ. В. В. Калашникова, В. С. Манусевича; под ред. Н. П. Бусленко. Москва : Наука, 1977. 176 с.
 - // Railway science and technologies. 2019. No. 2 (10). Pp. 77–88. ISSN 2587–5752.
 10. Bulavsky P. E., Vaisov O. K., Bystrov I. N. Modeling and evaluating the time of search and elimination of failures of railway automation systems and telemechanics by means of Petri nets [Modelirovanie i otsenka vremeni poiska i ustraneniya otkazov sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki s pomoshhyu setey Petri] // Automation on Transport. 2019. No. 4 (5). Pp. 478–492. ISSN 2412–9186.
 11. Somsak V.-A. Modelling Railway Interlocking Tables Using Coloured Petri Nets // Coordination Models and Languages: Proceedings of 12th International Conference, COORDINATION 2010, Amsterdam, The Netherlands, 7–9 June 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13414-2_10.
 12. Chen L., Liu H., Wang W. Using Colored Petri net for Level-Crossing safety analysis // International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2018. DOI: 10.1109/ICIRT.2018.8641674.
 13. Ghazel M. A Control Scheme for Automatic Level Crossings under the ERTMS/ETCS Level 2/3 Operation // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2017. Vol. 18. No. 10. Pp. 2667–2680. DOI: 10.1109/TITS.2017.2657695.
 14. Non-Markovian performability evaluation of ERTMS/ETCS level 3 / L. Carnevali, F. Flammini, M. Paolieri, E. Vicario // European Workshop on Performance Engineering, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23267-6_4.
 15. Korolev Yu. I. Methods and software for modeling complicated dynamic systems on the basis of temporal modification of color Petri nets [Metody i programnye sredstva modelirovaniya slozhnykh dinamicheskikh sistem na osnove temporal'noy modifikatsii raskrashennykh setey Petri]: Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2015. 20 p.
 16. Bestuzheva I. I., Rudnev V. V. Temporal Petri nets. Classification and comparative analysis [Vremennyye seti Petri. Klassifikatsiya i sravnitel'nyy analiz] // Automation and Remote Control. 1990. No. 10. Pp. 3–21. ISSN 0005–2310.
 17. Jensen K., Kristensen L. M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2007. No. 9. Pp. 213–254. DOI: 10.1007/s10009-007-0038-x.
 18. The ORIS Tool: Quantitative Evaluation of Non-Markovian Systems / M. Paolieri, M. Biagi, L. Carnevali, E. Vicario // IEEE Transactions on Software Engineering. 2021. Vol. 47. No. 6. Pp. 1211–1225. DOI: 10.1109/TSE.2019.2917202.
 19. Dingle N. J., Knottenbelt W., Suto T. PIPE 2: A tool for the performance evaluation of generalised stochastic Petri Nets // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. 2009. Vol. 36. No. 4. Pp. 34–39.
 20. Ugorenko L. Ch., Siskov A. V. Methods of analysis of generalized temporal stochastic Petri nets [Metody analiza obobshchennykh vremennykh stokhasticheskikh setey Petri] // Information processes systems. 2004. No. 10 (38). Pp. 211–223. ISSN 1681–7710.
 21. Tarasyuk I. V. Stochastic Petri nets — formality for modeling and analysis of performance of computing processes [Stokhasticheskie seti Petri — formalizm dlya modelirovaniya i analiza proizvoditel'nosti vychislitel'nykh protsessov] // System Informatics. 2004. Issue 9. Pp. 135–194.
 22. Ivanov N. N. Semi-Markovian processes in stochastic Petri nets [Polumarkovskie protsessy vo vremennykh stokhasticheskikh setyakh Petri] // Automation and Remote Control. 1994. No. 3. Pp. 117–127. ISSN 0005–2310.
 23. Mine H., Osaki S. Markovian Decision Processes [Markovskie protsessy prinyatiya resheniy] / Translated from English by V. V. Kalashnikov and V. S. Manusevich; ed. by N. P. Buslenko. Moscow: Science, 1977. 176 p.

Объем статьи 0,98 авторских листа