# ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫЕ МОДЕЛИ Железнодорожной сети<sup>1</sup>

А.И. Потехин, С.А. Браништов, С.К. Кузнецов

Разработаны дискретно-событийные модели основных элементов участка железной дороги: перегона с разъездом, сегмента (как части перегона), секции сегмента (блок-участка), стрелки, а также модели движения поездов. Модели представлены в виде сетей Петри с ограничивающими дугами. Групповое управление моделями при параллельно-конвейерном движении поездов осуществляется специально разработанными управляющими компонентами (супервизорами), обеспечивающими требования безопасности движения.

Ключевые слова: дискретно-событийная модель, сети Петри, супервизор, железнодорожная сеть, участок, перегон, блок-участок.

#### ВВЕДЕНИЕ

Системы управления железнодорожным транспортом относятся к классу структурно сложных систем, которые при математическом описании не сводятся к последовательно-параллельным или древовидным структурам, а описываются структурами сетевого типа с циклами.

Современные мировые научные разработки в области железнодорожного транспорта направлены, в первую очередь, на решение вопросов безопасности движения. Сейчас безопасность обеспечивается системами сигнализации, обнаружения и блокирования аварийных ситуаций, контроля движения поездов. Ввиду недопустимости ошибок в таких системах для их проектирования и моделирования необходимо применять формальные методы.

Наличие автоматических блокировок в современных железнодорожных (ж/д) сетях позволяет каждый перегон между станциями представить в виде совокупности электрически изолированных блок-участков (секций) с соответствующими датчиками состояния и светофорами. Это обстоятельство позволяет перейти от традиционных непрерывных моделей компонентов движения поездов к дискретно-событийным моделям (ДС-моделям).

В случае нахождения на перегоне нескольких поездов возникает проблема обеспечения безопасного их перемещения. Принят критерий безопасного параллельно-конвейерного движения поездов: безопасность движения обеспечивается, если между любыми двумя соседними поездами, находящимися на перегоне, имеется, по крайней мере, один свободный блок-участок, а в ряде случаев два.

Поставить и решить задачу обеспечения безопасности предлагается с помощью теории дискретно-событийных систем (ДСС), которая сейчас активно развивается в ряде научных центров мира [1—3]. Основная задача ДСС: как по ДС-модели объекта и заданным ограничениям на его функционирование построить управляющий компонент (*супервизор*), обеспечивающий поведение объекта в соответствии с заданными ограничениями.

Таким образом, обеспечение безопасного движения на железнодорожном транспорте (обнаружение и блокирование аварийных ситуаций) состоит, прежде всего, в разработке ДС-моделей основных компонентов ж/д сети (перегона с разъездом, сегмента, блок-участка, стрелки, светофора) и, далее, в разработке супервизора, обеспечивающего заданный уровень безопасности при параллельном (одновременном) движении поездов по перегону.

Традиционно компоненты ДСС (ДС-модели объектов, ограничений и супервизоров) обычно

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-00973-а, проект офи-м-РЖД № 12-08-13179).

представляются конечными автоматами, что не приемлемо для транспортной системы с параллельным движением нескольких подвижных средств.

Для представления ДС-моделей основных компонентов ж/д сети вместо конечных автоматов целесообразно применить сети Петри: они обладают точной математической семантикой, что позволяет достаточно просто интерпретировать поведение ж/д сети. Парадигма параллельности сети Петри хорошо подходит к реальной параллельности ж/д сетей. Графическое представление моделей ж/д компонентов в сети Петри наглядно и удобно для анализа. Движение поездов также удобно моделировать в сети Петри: поезда моделируются метками (фишками), перегоны и блок-участки (секции) представляются позициями, управляемые переходы сети Петри реализуют условия движения поездов. Сети Петри в виде текущей разметки всегда точно определяют состояние ж/д сети, положение поездов, ж/д стрелок, светофоров. Поэтому ДС-модели ж/д компонентов в виде сетей Петри могут использоваться как основа для программной поддержки мониторинга, моделирования и анализа ж/д сети.

Однако моделирование и графическое представление реальной ж/д сети в виде сети Петри получается громоздким и сложным для анализа. Поэтому в работах [4—6] сети Петри применяются для моделирования небольших участков ж/д сети. В настоящей работе предлагается строить несколько иерархически зависимых уровней моделирования.

На верхнем уровне с помощью сети Петри строится модель перегона с разъездом ж/д сети по его структурной схеме. Основное назначение этого уровня — наблюдать за движением поездов по перегону и контролировать соответствие заданным маршрутам, рассчитывать временные параметры движения поездов и др.

На среднем уровне моделирования моделируется часть перегона — сегмент, состоящий из нескольких последовательно соединенных блок-участков (секций). На этом уровне проектируется управляющий компонент ДСС — супервизор в виде сети Петри, обеспечивающий заданную зону безопасности, состоящую из одной, двух или трех свободных секций между двумя соседними поездами, находящимися на перегоне.

На нижнем уровне моделирования определяется связь ДС-моделей блок-участков, ж/д стрелок, светофоров с соответствующими датчиками состояния и управляющими командами оператора, тем самым обеспечивается соответствие между состояниями моделей всех уровней и состояниями физических объектов.

Далее в работе показано применение ДС-моделей для расчета пропускной способности перегона. Разработанные модели участка железной дороги, а также модели управляющих компонентов (супервизоров) на базе сетей Петри могут быть положены в основу построения системы моделирования параллельно-конвейерного движения поездов в режиме реального времени.

## 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

В общем виде ж/д сеть представляется совокупностью железнодорожных станций, соединенных между собой перегонами с разъездами (вставками).

На рис. 1 изображена топологическая схема участка, состоящего из двух станций A и B и однопутного перегона с одним разъездом. Через  $v_1 - v_4$  обозначены сегменты перегона. Сегмент, как часть перегона, состоит из нескольких последовательно соединенных электрически изолированных друг от друга секций (блок-участков).

Нахождение поезда на *i*-й секции контролируется датчиком состояния секции  $d_i$ . Предполагаем, что в любой момент времени доступны сигналы всех секционных датчиков. В узлах схемы расположены стрелки  $c_1$  и  $c_2$ . С каждой стороны секции установлены светофоры. Для простоты изложения будем считать, что светофор может находиться в двух состояниях: красный или зеленый. В реальной ситуации светофор может находиться в трех или четырех состояниях.

Одно важное свойство перегона с разъездом, содержащим ж/д стрелки, (свойство корректности): поезд, находящийся, например, на секции сегмента  $v_2$  физически не может переместиться на секцию сегмента  $v_3$ , минуя секцию сегмента  $v_1$  или  $v_4$ . Таким образом, по топологической схеме перегона, содержащего ж/д стрелки, а в общем случае по произвольной схеме железнодорожной сети, невозможно определить корректные маршруты движения, применяя формальные методы теории графов.

Содержательное описание объекта закончим перечислением основных свойств перегона:

 каждый сегмент перегона (благодаря наличию в современных ж/д сетях автоматических



Рис. 1. Топологическая схема перегона с одним разъездом



Рис. 2. Неориентированный граф перегона с одним разъездом



Рис. 3. Ориентированный граф перегона с одним разъездом

блокировок) состоит из нескольких электрически изолированных друг от друга секций (блокучастков);

— длина сегмента определяется числом секций;

 – каждая секция длиннее самого длинного поезда и ее длина находится в строго фиксированном диапазоне;

— критерий безопасного параллельно-конвейерного движения поездов: безопасность движения обеспечивается, если между любыми двумя соседними поездами на перегоне имеется, по крайней мере, один свободный блок-участок.

Наличие автоматических блокировок позволяет перейти от непрерывных моделей компонентов движения поездов к ДС-моделям.

С целью построения графа перегона, по которому можно формально определить все возможные пути, маршруты, циклы и т. д., поступаем следующим образом.

Вначале строится неориентированный граф G = (V, W) перегона с разъездом: каждому *i*-му сегменту (ребру топологической схемы перегона) сопоставляется вершина  $v_i$  графа G. Ребро  $(v_i, v_j) \in W$ , если в схеме возможно движение от *i*-го сегмента к *j*-му или наоборот. Станции A и B представляются вершинами  $v_a$  и  $v_b$ . На рис. 2 изображен граф перегона с одним разъездом, стрелки не показаны, будем считать, что они принадлежат сегментам  $v_1$  и  $v_4$ .

Для организации движения поездов в обе стороны по однопутному перегону заменим каждое

ребро графа Gдвумя разнонаправленными дугами. Таким образом, граф G преобразуется в ориентированный граф G' = (V, W') (рис. 3).

# 2. ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕГОНА

Задачи обеспечения безопасности движения поездов аналогичны задачам, решаемым в теории ДСС. Основная из них состоит в том, как по ДС-модели объекта и заданным ограничениям на его функционирование построить управляющий компонент-супервизор, обеспечивающий поведение объекта в соответствии с заданными ограничениями.

Таким образом, обеспечение безопасного движения на железнодорожном транспорте (блокирование аварийных ситуаций) сводится к дискретнособытийному моделированию, включая парадигму супервизорного управления, основных компонентов ж/д сети: перегона с разъездом, сегмента, блок-участка, стрелки, светофора.

Напомним основные положения ДСС. Под ДСС понимается триплет (G, K, S), где объект  $G = \{G^1, G^2, ..., G^n\}$  — совокупность автономных компонентов, K — спецификации (ограничения на поведение объекта), S — супервизор (управляющий компонент ДСС), обеспечивающий поведение объекта G в соответствие со спецификацией K.

Функционирование ДСС характеризуется множеством событий E и генерируемыми последовательностями из этих событий. Множество событий E состоит из множества управляющих событий  $E_1$  (генерируются собственным контроллером объекта), множества ожидаемых событий  $E_2$  (моделируют состояния (положения) исполнительных механизмов). Супервизор S блокирует те управляющие события, появление которых противоречит спецификации K.

Поведение ДСС рассматривается с самых общих позиций как поведение некоторого генератора (источника) последовательностей (строк) событий из конечного множества событий E. Событие  $e \in E$  — это абстракция для множества фактов наблюдения «жизни» ДСС. События мгновенны, их появление спонтанно и происходят они в непредсказуемые моменты времени, поэтому все, что можно наблюдать, это их последовательности, которые и представляются строками. Примеры событий: факты изменения положения и состояния отдельных компонентов объекта; команды на объект; характеристика исправного или неисправного состояния объекта и т. п.

В теории ДСС для моделирования компонентов объекта и ограничений *К* применяются конечные

S

автоматы (КА). Каждый КА определяется собственным набором: ( $Q, E, \delta, F, Q_m, q_0$ ), где Q — множество состояний; E — множество событий;  $\delta$  — функция переходов  $QxE \rightarrow Q$ ;  $F: Q^2^E$  — функция допустимых событий в каждом состоянии;  $Q_m$  — множество достижимых состояний;  $q_0$  — начальное состояние.

Для построения ДС-модели объекта *G* в ДСС используют одну из двух операций над множеством КА компонентов: декартовое произведение или параллельную композицию, что естественно приводит к огромному числу состояний ДС-модели объекта *G*.

В работах [7, 8] А.А. Амбарцумян показал, как по ДС-моделям объекта G, представленным в виде сетей Петри, и заданным ограничениям K проектировать супервизор S, обеспечивающий поведение G в соответствии с ограничениями K, не применяя указанных операций.

В нашем случае объект представляет собой перегон с разъездом, он состоит из компонентов: сегментов, стрелок, светофоров, кроме того, сам перегон является элементом ж/д сети.

# 2.1. Дискретно-событийная модель перегона с разъездом

Построение ДС-моделей начнем с ДС-модели перегона (П) как элемента ж/д сети. Объект  $\Pi = \{V, M, E, G\}$ , где V — множество вершин графа G (сегментов), в каждой вершине (сегменте) находится *m*<sub>i</sub> поездов, *M* — множество поездов, находящихся на перегоне, Е — множество событий. Наступление события  $e_{i,j} \in E$  разрешает движение поезда из сегмента v<sub>i</sub> в сегмент v<sub>i</sub>; G – граф соединения сегментов перегона. Ограничения К содержательно определим следующим образом: движение поезда из сегмента  $v_i$  в сегмент  $v_i$  может быть разрешено только тогда, когда в сегменте v, обеспечивается заданный интервал безопасности между поездами, иными словами, ограничения К задаются множеством запрещенных состояний каждого сегмента. Задача супервизора S состоит в выполнении ограничений К путем разрешения или блокирования  $e_{i, i} \in E$ . Нетрудно видеть, что автоматная модель перегона сложна.

Поэтому для представления ДС-моделей основных компонентов ж/д сети вместо конечных автоматов целесообразно применить сети Петри: поезда моделируются метками (фишками), перегоны, блок-участки (секции) и т. д. представляются позициями, управляемые переходы сети Петри реализуют движение поездов. Сети Петри в виде текущей разметки всегда точно определяют состо-



Рис. 4. Сеть Петри, моделирующая перегон с разъездом,  $\mu = (0, a, 0, 0, b, 0)$ 

яние ж/д сети, положение поездов, ж/д стрелок, светофоров.

Дискретно-событийную модель перегона с разъездом представляем сетью Петри (*P*, *T*, *Pre*, *Post*) следующим образом:

— каждой вершине  $v_i$  (сегменту) графа G' (см. рис. 3) сопоставляется позиция  $p_i$  в графе сети Петри (рис. 4);

— дуга  $(v_i, v_j) \in W'$  заменяется структурой  $(p_i, t_{i,j}, p_j)$ , где  $t_{i,j}$  — управляемый переход,  $pre(t_{i,j}) = p_i, post(t_{i,j}) = p_j$ . Множества позиций и переходов — соответственно P и T (множества конечны, не пусты и в графической форме сети Петри изображаются двумя типами вершин — кружками и полочками). Состояние сети Петри определяется ее маркировкой  $\mu = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_n)$ , где n = |P|, значение  $\mu_i$  равно числу фишек в позиции  $p_i$  (числу поездов в *i*-м сегменте).

Движение поездов по перегону имитируется перемещением фишек по позициям при срабатывании управляемых переходов. Запуск перехода  $t_{i,j}$  разрешается при наличии фишек в управляющих позициях (разрешающих и блокирующих). Управление переходами на рис. 4 не показано, далее этому будет уделено основное внимание.

Иногда требуется различать фишки, перемещающиеся по позициям сети Петри от  $A \\ \kappa B$ и от  $B \\ \kappa A$ . Например, фишку соответствующую поезду, следующему от  $A \\ \kappa B$ , можно обозначить как a, соответственно фишки, перемещающиеся от  $B \\ \kappa A$ , обозначить как b. Таким образом, получаем *раскрашенную* сеть Петри. На рис. 4 изображен граф базовой сети Петри перегона с разъездом с маркировкой  $\mu = (0, a, 0, 0, b, 0)$ .

Основное назначение этого уровня моделирования — наблюдать за движением поездов по перегону на соответствие заданным маршрутам, рассчитывать временные параметры движения поездов др.

#### 2.2. Дискретно-событийная модель сегмента

Как уже отмечалось, сегмент перегона состоит из последовательно соединенных секций (блокучастков). Сеть Петри сегмента представляется как (P, T,  $\mu$ ), где P — множество позиций (секций), T — множество переходов (событий, управляющих движением поездов),  $\mu$  — маркировка сегмента:  $\mu = (\mu_1, \mu_2, ..., \mu_k)$ , где  $k = |P|, \mu_i \in (0, 1); \mu_i = 1$  соответствует наличию фишки в позиции  $p_i$ .

Рассмотрим движение поездов по сегменту. Пусть без потери общности сегмент состоит из трех секций и представляется сетью Петри, изображенной на рис. 5, где позиции  $p_1, p_2, p_3$  соответствуют секциям сегмента,  $t_1 - t_4$  — управляемые переходы,  $\mu = (1, 0, 0)$ .

В позиции  $p_1$  находится фишка, что означает нахождение поезда на первой секции. Позиции а<sub>2</sub>, *a*<sub>3</sub>, *b*<sub>1</sub>, *b*<sub>2</sub> будем называть управляющими позициями сети, их состояния (наличие или отсутствие фишек) определяются значениями соответствующих логических переменных, с помощью которых осуществляется управление движением фишек по позициям. Значения управляющих переменных задаются системой организации маршрутов, маневров. Например, если требуется переместить поезд с первой секции на вторую секцию, то управляющей переменной a<sub>2</sub> присваивается единичное значение ( $a_2 = 1$ ), а в позицию  $a_2$  помещается фишка, создавая тем самым условия запуска перехода  $t_1$ , в результате фишка перемещается из позиции  $p_1$  в позицию  $p_2$ . Если затем будет  $b_1 = 1$ , то фишка переместится из позиции  $p_2$  в позицию  $p_1$ . Комбинируя наборами управляющих переменных, можно осуществить желаемое движение фишек. Естественно, что не все наборы управляющих переменных допустимы, например, должно быть  $b_1 a_3 = 0$ , т. е. перемещение фишки из каждой позиции должно быть однозначным.

Помимо управляющих позиций, каждый переход ДС-модели сегмента дополнительно управляется (разрешается или блокируется) супервизором, обеспечивающим заданный уровень безопасности движения поездов, проектирование которого показано в п. 2.3. Кроме того, каждый переход ДС-модели сегментов перегона соответствует так называемому в теории сетей Петри непримитивному событию. Исследуем его более подробно.

Рассмотрим связь состояний ДС-моделей секций, сегментов, перегона в целом с состояниями соответствующих физических объектов. Покажем процесс перемещения фишки из одной позиции в другую на примере перехода фишки из позиции *p*<sub>1</sub>



Рис. 5. Сеть Петри сегмента перегона, состоящего из трех секций



Рис. 6. Сеть Петри, моделирующая движение поездов по сегменту

в позицию  $p_2$  (рис. 6). Срабатывание перехода  $t_{1,2}^1$ ( $a_2 = 1$ ) переводит фишку в позицию  $p_{1,2}^1$  (начало движения поезда). После того, как голова поезда окажется на второй секции, срабатывает ее датчик состояния  $d_2 = 1$ , в результате чего в позицию  $d_2$ помещается фишка. Тем самым создаются условия срабатывания перехода  $t_{1,2}^2$ , в результате фишка перемещается из позиции  $p_{1,2}^1$  в позицию  $p_{1,2}^2$  (поезд находится одновременно на обеих секциях).

Фишка будет оставаться в позиции  $p_{1,2}^2$  до тех пор, пока конец поезда будет находиться на первой секции. После того как  $d_1 = 0$  (первая секция свободная) фишка из позиции  $p_{1,2}^2$  переместится в позицию  $p_2$  (дуга ( $d_1$ ,  $t_{1,2}^3$ ) является блокирующей вместо стрелки эта дуга оканчивается кружком).

Время нахождения фишек в позициях  $p_{1,2}^1$  и  $p_{1,2}^2$  определяется сигналами от датчиков  $d_1$  и  $d_2$ , оно зависит от скорости движения поезда, длины поезда и секций.

Рассмотренный процесс движения поезда проиллюстрирован в таблице.

Светофор на входе второй секции со стороны первой секции обозначим как  $C_{2,1}$ , аналогично, светофор первой секции со стороны второй —  $C_{1,2}$ .

Ş

Шаг	<i>a</i> <sub>2</sub>	<i>d</i> <sub>1</sub> , <i>d</i> <sub>2</sub>	<i>t</i> <sub>1</sub>	$p_1, p_{1,2}^1, p_{1,2}^2, p_2$	Состояние секций		Состояние светофора	
					Первая	Вторая	<i>C</i> <sub>1,2</sub>	<i>C</i> <sub>2,1</sub>
1	0	1, 0	0	1, 0, 0, 0	Занята	Свободна	Красный	Зеленый
2	1	1, 0	$t_{1,2}^{1}$	0, 1, 0, 0				
3	0	1, 1	$t_{1,2}^2$	0, 0, 1, 0		Занята		Красиций
4	0	0, 1	$t_{1,3}^3$	0, 0, 0, 1	Свободна		Зеленый	териспын

Пошаговое описание движения поезда

Состояние светофора (красный/зеленый) в простейшем случае определяется состоянием секций (свободна/занята), т. е сигналом соответствующего датчика. В таблице приведена смена состояний светофоров  $C_{1,2}$  и  $C_{2,1}$  при движении поезда из первой секции на вторую.

## 2.3. Обеспечение безопасности при параллельно-конвейерном движении поездов

Требование безопасности состоит в том, чтобы между двумя движущимися поездами в попутном или встречном направлении по одному пути была бы, по крайней мере, одна свободная секция. В сети Петри это требование означает, чтобы между позициями сегмента, содержащими фишки, была бы, по крайней мере, одна пустая позиция. Рассмотрим процесс конструирования супервизора безопасности.

На рис. 7 изображена сеть Петри сегмента, состоящего из пяти секций. Пусть в исходном состоянии сети позиции  $p_1$  и  $p_3$  содержат фишки, а позиция  $p_2$  — пустая, тем самым в исходном состоянии сети выполняется требование безопасности. При  $a_2 = 1$  срабатывает переход  $t_{1,2}$ , и фишка из по-



Рис. 7. Объединенная сеть Петри сегмента и супервизора безопасности

/X

зиции  $p_1$  перемещается в позицию  $p_2$ , но при этом будет нарушено требование безопасности. Для блокирования срабатывания перехода  $t_{1,2}$  позиция  $p_3$ дополняется позицией  $s_3$  супервизора и блокирующей дугой ( $s_3$ ,  $t_{1,2}$ ). Одновременно с этим блокируется симметричный ему переход  $t_{5,4}$  с помощью дуги ( $s_3$ ,  $t_{5,4}$ ). Позиция  $s_3$  дублирует позицию  $p_3$ , т. е. наличие (отсутствие) фишки в позиции  $s_3$  совпадает с наличием (отсутствием) фишки в позиции  $p_3$ . Таким образом, каждая позиция  $p_i$  сети дополняется управляющей позицией  $s_i$  и соответствующими блокирующими дугами. Число управляющих позиций (позиций типа s) равно числу секций перегона.

Совокупность управляющих позиций типа *s* и соответствующих блокирующих дуг образует так называемый супервизор безопасности, основные функции которого заключаются в синхронизации и обеспечении требований безопасности.

Требование безопасности можно ужесточить, а именно, потребовать, чтобы между активными позициями были бы две пустые позиции. Это достигается следующим образом. Рассмотрим перемещения фишки из позиции  $p_3$  в позицию  $p_4$ . После срабатывания перехода  $t_{3,4}$  в позицию  $s_4$  супервизора помещается фишка. Блокирующая дуга в переход  $t_{1,2}$  от позиции  $s_4$  (штриховая линия) обеспечивает его блокирование и тем самым между позициями  $p_1$  и  $p_4$ , содержащими фишки, будут две пустые позиции  $p_2$  и  $p_3$ .

Супервизор безопасности одновременно управляет переходами светофоров из состояния «красный» в состояние «зеленый» и наоборот. Рассмотрим управление светофором  $C_{2,1}$ . Представим модель светофора  $C_{2,1}$  в виде конечного автомата  $A_{2,1}$  с двумя состояниями (красный, зеленый). Функцию переходов, переводящую автомат  $A_{2,1}$  из со-

Ş

стояния «красный» в состояние «зеленый» обозначим как  $f_1$ . Нетрудно найти, что  $f_1 = \overline{d}_2 \, \overline{s}_3$ , т. е. функция  $f_1$  принимает единичное значение при отсутствии поезда на второй секции и отсутствия фишки в позиции  $s_3$  супервизора. Функцию переходов, переводящую автомат  $A_{2,1}$  из состояния «зеленый» в состояние «красный» обозначим как  $f_2 = d_2 \vee s_3$ , т. е. функция  $f_2$  принимает единичные значения при занятой второй секции или при наличии фишки в позиции  $s_3$  супервизора.

## 2.4. Дискретно-событийная модель стрелки

На рис. 8 изображена ДС-модель стрелки  $c_1$  перегона в виде сети Петри. Позиции  $m_{1,1}$  и  $m_{1,3}$  соответствуют устойчивым состояниям стрелки, причем фишка в позиции  $m_{1,1}$  означает, что стрелка находится в состоянии, в котором соединены сегменты 1 и 3 перегона (см. рис. 4).

Определим это состояние как положение 1 стрелки. Аналогично: фишка в позиции  $m_{1,3}$  — сегмент 1 соединен с сегментом 2 (положение 2 стрелки). Датчики положения стрелки —  $d_{c,1}^1$  и  $d_{c,1}^2$  и управляющие переменные  $a_{1,2}$ ,  $a_{1,3}$ ,  $b_{1,2}$ ,  $b_{3,1}$  определяют состояние соответствующих управляющих позиций сети Петри. Рассмотрим переход из положения 2 стрелки (фишка находится в устойчивой позиции  $m_{1,3}$ ) в положение 1 стрелки.

При значениях управляющих переменных  $a_{1,3} = 1$ или  $b_{3,1} = 1$  фишка перемещается из позиции  $m_{1,3}$ в позицию  $m_{1,4}$ , в которой на стрелку  $c_1$  выдается



Рис. 8. Дискретно-событийная модель стрелки

управляющее воздействие. В результате изменения состояния стрелки будет  $d_{c,1}^1 = 1$ . В итоге фишка из позиции  $m_{1,4}$  переместится в устойчивую позицию  $m_{1,1}$ . При этом управляющая позиция  $s_{1,1}$  (позиция супервизора стрелки) и управляющие переменные  $a_{1,3}$ ,  $b_{3,1}$  ( $a_{3,1}b_{3,1} = 0$ ) создают условия срабатывания переходов либо  $t_{1,3}$ , либо  $t_{3,1}$  (см. рис. 4). Аналогично происходит переход стрелки из положения 1 в положение 2. В этом случае фишка перемещается из позиции  $m_{1,1}$  в устойчивую позицию  $m_{1,3}$ , где аналогичным образом формируется управляющая позиция  $s_{1,2}$  (на рис. 8 не показана), которая в зависимости от значений  $a_{1,2}$ , и  $b_{2,1}$ ( $a_{1,2}b_{2,1} = 0$ ) определяет условия срабатывания переходов  $t_{1,2}$ ,  $t_{2,1}$  (см. рис. 4).

Таким образом, в данном разделе показано как строить ДС-модели ж/д сети: сегмента, секции (блок-участка), светофора, стрелки, перегона с разъездом на основе аппарата сети Петри, а также показано, как строить блокирующие супервизоры, обеспечивающие безопасное групповое движение поездов.

#### 3. ПРИМЕНЕНИЕ ДС-МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕГОНА

## 3.1. Применение ДС-моделей элементов перегона для расчета пропускной способности

Рассмотрим применение ДС-моделей элементов перегона для определения времени движения поездов по перегону при их конвейерном движении.

Каждый перегон состоит из сегментов. Упрощенную сеть Петри сегмента (движение фишек только слева направо) представим в виде цепи последовательно соединенных  $k_i$  позиций, где  $k_i$  число секций *i*-го сегмента.

**Пример 1.** Пусть сегмент содержит четыре секции (рис. 9).

Для обеспечения безопасности движения поездов введем ограничение на взаимное расположение фишек в сети Петри: между позициями, в которых находятся фишки, должна быть, по крайней мере, одна позиция, не содержащая фишку.

Такие маркировки сети Петри будем называть допустимыми. Пример допустимой маркировки:  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4) = (1, 0, 1, 0)$ ; пример недопустимой маркировки:  $\mu = (1, 1, 0, 0)$ . Допустимость маркировки обеспечивается блокирующим супервизором (см. п. 2.3).

Сеть Петри функционирует следующим образом. Переход t может посылать фишку в позицию  $p_1$  всякий раз, когда это не противоречит принятому ограничению. В дереве достижимости сети Петри каждая последовательность маркировок определяется последовательностью



срабатывания переходов. Можно показать, что самая короткая последовательность допустимых маркировок для пакета из двух поездов в нашем примере имеет место при одновременном сдвиге фишек в сети Петри:

$$\mu_0 = (0, 0, 0, 0), \quad \mu_1 = (1, 0, 0, 0), \quad \mu_2 = (0, 1, 0, 0),$$
  
$$\mu_3 = (1, 0, 1, 0), \quad \mu_4 = (0, 1, 0, 1), \quad \mu_5 = (0, 0, 1, 0),$$
  
$$\mu_6 = (0, 0, 0, 1), \quad \mu_0 = (0, 0, 0, 0). \blacklozenge$$

Длину последовательности маркировок, начинающейся и оканчивающейся начальной маркировкой  $\mu_0$  при прохождении пакетом поездов *i*-го сегмента, обозначим как  $N_i$ . Иными словами, величина  $N_i$  равна числу тактов прохождения пакетом поездов *i*-го сегмента.

Нетрудно видеть, что для прохождения одного поезда через  $k_i$  секций *i*-го сегмента потребуется  $N_i = k_i + 1$  тактов. Для прохождения пакета из двух поездов (с одной секции безопасности между ними) потребуется  $N_i = (k_i + 2) + 1$  тактов. Для прохождения *n* поездов в пакете потребуется не менее  $N_i = (k_i + n) + (n - 1)$  тактов или

$$N_i = k_i + 2n - 1. (1)$$

В общем случае, когда интервал безопасности равен r (r = 1, 2, 3), минимальное число тактов для прохождения пакета из n поездов через k секций определяется как

$$N = k_i + n + r(n - 1),$$
(2)

а время прохождения

$$N\tau = (k + n + r(n - 1))\tau,$$
 (3)

где т — среднее время прохождения поездом одной секции.

Если задан интервал времени T и число секций k и требуется определить максимальное число прошедших поездов, то из формулы (3) следует, что

$$n_{\max} = (T/\tau - k + r)1/(r + 1).$$
(4)

**Пример 2.** Определим максимальную пропускную способность сегмента за сутки (T = 1440 мин), пусть  $\tau = 1$  мин, k = 10, тогда при интервале безопасности r = 1 по формуле (4) получаем 67 поездов, при r = 2 получаем 45 поездов, при r = 3 имеем 34 поезда.

Таким образом, формула (4) определяет пропускную способность сегмента перегона. В любом маршруте сегмент, имеющий минимальную пропускную способность, определяет пропускную способность всего маршрута.

# 3.2. Варианты организации параллельного движения поездов по перегону с разъездом

Перегон с разъездом (см. рис. 3) содержит два маршрута от станции *А* до станции *В*:

$$M_A^1 = (A, 1, 3, 4, B), \quad M_A^2 = (A, 1, 2, 4, B),$$

где цифрами 1—4 обозначены сегменты. Длины маршрутов соответственно

$$L_A^1 = k_1 + k_3 + k_4, \quad L_A^2 = k_1 + k_2 + k_4,$$

где *k* — число секций соответствующего сегмента.

От станции *В* до станции *А* имеются два маршрута

$$M_B^1 = (B, 4, 3, 1, A), \quad M_B^2 = (B, 4, 2, 1, A).$$

Существует большое число вариантов организации движения поездов между станциями A и B. Рассмотрим наиболее интересные. Пусть требуется отправить  $n_a$  поездов со станции A на станцию B, а со B на станцию  $A - n_b$ . Интервал безопасности равен 1.

Вариант 1. Рассмотрим случай, когда в начале поезда отправляются из A в B, затем — из B в A по основному маршруту  $M^1$ . Для простоты анализа положим, что все секции имеют равные временные задержки. По формуле (1) определяем длину пути из A в B

$$N_{ab} = k_1 + k_3 + k_4 + 2n_a - 1.$$

Аналогично длина пути из В в А

$$N_{ba} = k_1 + k_3 + k_4 + 2n_b - 1,$$

тогда

$$\begin{split} N_{ab} + N_{ba} &= 2(k_1 + k_3 + k_4) + 2n_a + 2n_b - 2 = \\ &= 2(k_1 + k_3 + k_4 + n_a + n_b - 1). \end{split}$$

Время в пути  $T = (N_{ab} + N_{ba})\tau$ , где  $\tau$  — среднее время прохождения поездом одной секции перегона.

Вариант 2. Пакет поездов размерности  $n_a$ , следующий от станции *A* по маршруту  $M_A^2 = (A, 1, 2, 4, B)$ , и пакет поездов размерности  $n_b$ , одновременно следующий от станции *B* по маршруту  $M_B^1 = (B, 1, 3, 4, A)$  не должны мешать друг другу.





Необходимо определить величины  $n_a$  и  $n_b$ . Величина  $n_a$  определяется как

$$2n_a = k_3 + k_4 - k_1 + 1$$

Величину  $n_b$  определяем аналогично:

$$2n_b = k_1 + k_2 - k_4 + 1.$$

Пусть, например  $k_1 = k_4$ , тогда

$$2n_a = k_3 + 1$$
 и  $2n_b = k_2 + 1$ ,

отсюда

$$n_a = (k_3 + 1)/2$$
 и  $n_b = (k_2 + 1)/2$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем основные результаты настоящей работы.

- Построены ДС-модели компонентов перегона с разъездом: сегмента, секции (блок-участка), стрелки, светофора, перегона с разъездом на основе сети Петри.
- Показано, как строить блокирующие супервизоры, управляющие ДС-моделями элементов ж/д сети и обеспечивающие безопасное параллельно-конвейерное движение поездов. Разработаны супервизоры для компонентов перегона: сегмента, секции (блок-участка), стрелки, светофора, перегона с разъездом. Модели элементов перегона и супервизоров в виде сетей Петри могут быть использованы в системе моделирования железнодорожной сети при параллельно-конвейерном движение поездов.
- Разработан метод оценки времени параллельно-конвейерного безопасного движения поездов по перегону, что позволит приблизиться к решению задачи определения оптимальных по времени маршрутов в произвольной железнодорожной сети.

Авторы признательны О.П. Кузнецову, конструктивная и доброжелательная критика которого способствовала улучшению статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. *Ramadge J.G., Wonham RaW.M.* The control of discrete-event systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1989. 77 (1). P. 81—98.
- Chalmers Golaszewski C. H., Ramadge P. J. Control of discrete-event processes with forced events // Proc. 28<sup>th</sup> Conf. Decision Control. Los Angeles. – 1987. – P. 247–251.

- Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to discrete event systems // Springer Science + Business Media, LLC. USA. – 2008. – P. 781.
- 4. *Mustafa SeçkinDurmuş, Mehmet TuranSöylemez.* Automation Petri Net Based Railway Interlocking and Signalization Design, Istanbul Technical University. International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications, INISTA'09, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 29 June—01 July, 2009.
- JoakimBjørk, Anders M. Hagalisletto, and Paal Enger. Large scale simulations of Railroad Nets, Precise Modeling and Analysis, Department of Informatics, University of Oslo, 2006.
- MagedDessouky, Ph.D, Fernando Ordonez, Ph.D, Robert Leachman, Ph.D, PavankumarMural. STRATEGIES FOR EFFEC-TIVE RAIL TRACK CAPACITY USAGE. Final Report ME-TRANS Project January 16, 2010. University of Southern California1. Automation Petri Net Based Railway Interlocking and Signalization Design.
- Амбарцумян А.А. Моделирование и синтез супервизорного управления на сетях Петри для рассредоточенных объектов. Ч. 1. // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 8. — С. 151—169. Ч. 2. // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 9. — С. 173—189.
- 8. Амбарцумян А.А. Потехин А.И. Групповое управление в дискретно-событийных системах // Проблемы управления. 2012. № 5. С. 46—53.
- Ramadge J.G., Wonham RaW.M. The control of discrete-event systems // IEEE Trans. Automat. Control. – 1989. – Vol. 77, N 1. – P. 81–98.
- Chalmers Golaszewski C. H., Ramadge P. J. Control of discrete-event processes with forced events // Proc. of 28th Conf. Decision Control., Los Angeles. – 1987. – P. 247–251.
- Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to discrete event systems. – Philadelphia: Springer Science + Business Media, LLC. – 2008. – P. 781.
- 12. Mustafa SeçkinDurmuş, Mehmet Turan Söylemez. Automation Petri Net Based Railway Interlocking and Signalization Design, Istanbul Technical University // Intern. Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, INISTA'09, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 29 June– 01 July, 2009.
- 13. Joakim Bjork, Anders M. Hagalisletto, and Paal Enger. Large scale simulations of Railroad Nets, Precise Modeling and Analysis, Department of Informatics, University of Oslo, 2006.
- 14. Dessouky M., Ordonez F., Leachman R., Mural P. Strategies for effective rail track capacity usage / Final Report METRANS Project January 16, 2010. University of Southern Californial. Automation Petri Net Based Railway Interlocking and Signalization Design.
- Амбарцумян А.А. Моделирование и синтез супервизорного управления на сетях Петри для рассредоточенных объектов. Ч. 1 // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 8. — С. 151—169. Ч. 2 // Там же. — № 9. — С. 173—189.
- 16. Амбарцумян А.А. Потехин А.И. Групповое управление в дискретно-событийных системах // Проблемы управления. — 2012. — № 5. — С. 46—53.

Статья представлена к публикации членом редколлегии О.П. Кузнецовым.

Потехин Анатолий Иванович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-90-29, ⊠ apot@ipu.ru,

**Браништов Сергей Александрович** — канд. техн. наук, и. о. зав. лабораторией, **2** (495) 334-93-70, ⊠ branishtov@mail.ru,

Кузнецов Сергей Константинович — науч. сотрудник, ☎ (495) 334-90-29, ⊠ skuznetsov@bk.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.