

СУПЕРВИЗОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ

А.И. Потехин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: apot@ipu.ru

С.А. Браништов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: branishtov@mail.ru

С.К. Кузнецов

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65
E-mail: skuznetsov@bk.ru

Ключевые слова: дискретно-событийные модели, сети Петри, супервизор, железнодорожная сеть, участок, перегон, блок-участок

Аннотация: В статье разработаны дискретно-событийные модели основных элементов участка железной дороги: перегона с разъездом, сегмента (как части перегона), секции сегмента (блок-участка), стрелки, модели движения поездов. Модели этих элементов представлены в виде сетей Петри с ограничивающими дугами. Групповое управление моделями при моделировании параллельно-конвейерного движения поездов осуществляется специально разработанными управляющими компонентами (супервизорами), обеспечивающими требования безопасности

1. Введение

Современная железнодорожная сеть представляет собой разветвленную параллельную структуру со сложно формализуемым поведением.

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.

Наличие автоматических блокировок в современных железнодорожных сетях (ЖД 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).

Поставить и решить задачу обеспечения безопасности предлагается с использованием теории дискретно-событийных систем (ДСС). Эта теория сейчас активно развива-

ется в ряде научных центров мира [3-5]. 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 в следующем: во-первых, в разработке ДС-моделей основных компонентов ЖД сети (перегона с разъездом, сегмента, блок-участка, стрелки, светофора) и, во-вторых, в разработке Супервизора, обеспечивающего заданный уровень безопасности при параллельном движении поездов по перегону.

Для решения этих задач при используются сети Петри (СП): они имеют точную математическую семантику, что позволяет достаточно точно интерпретировать ЖД сети, парадигма параллельности СП хорошо подходит к реальной параллельности ЖД сетей, графическое представление моделей компонентов ЖД сетей в СП наглядно и удобно для анализа. Движение поездов удобно моделировать в СП: поезда моделируются метками (фишками), перегоны и блок-участки (секции) представляются позициями, управляемые переходы реализуют движение поездов по перегонам. В отличие от других моделей, СП всегда точно определяют состояние ЖД сети, положение поездов, стрелок. Поскольку состояние всей системы непосредственно определяется текущей разметкой, модели ЖД сетей на базе СП могут использоваться как основа для программной поддержки мониторинга, моделирования и анализа ЖД сети.

Однако, моделирование и графическое представление реальной ЖД сети в виде сети Петри получается громоздким и сложным для анализа. Поэтому в работах [6-8] сети Петри применяются для моделирования небольших участков ЖД сети. В настоящей работе предлагается строить несколько иерархически зависимых уровней моделирования.

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

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.

2. Краткое описание объекта моделирования

ЖД сеть в общем виде представляется совокупностью железнодорожных станций, соединенных между собой перегонами с разъездами (вставками).

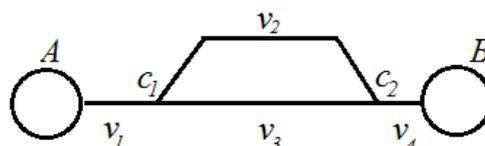


Рис. 1. Топологическая схема перегона с одним разъездом.

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 пе-

региона. 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, c_2 . С каждой стороны секции установлены светофоры. Для простоты изложения будем считать, что состояния светофора: красный, зеленый. В реальной ситуации светофор содержит три или четыре состояния.

Одно важное свойство перегона с разъездом, содержащим ЖД 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 ЖД стрелки, а в общем случае по произвольной схеме железнодорожной сети, невозможно определить корректные маршруты движения, используя формальные методы теории графов.

Содержательное описание объекта закончим перечислением основных свойств перегона:

- 1) каждый сегмент перегона (благодаря наличию в современных ЖД сетях Автоматических Блокировок) состоит из нескольких электрически изолированных друг от друга секций (блок-участков),
- 2) длина сегмента определяется числом секций,
- 3) каждая секция длиннее самого длинного поезда и ее длина находится в строго фиксированном диапазоне,
- 4) 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 дискретно-событийным моделям (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, v_b . На рис. 2 изображен граф перегона с одним разъездом, стрелки не показаны, будем считать, что они принадлежат сегментам v_1, v_4 .

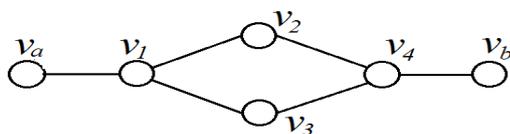


Рис. 2. Неориентированный граф перегона с одним разъездом.

Для организации движения поездов в обе стороны по однопутному перегону заменим каждое ребро графа G двумя разнонаправленными дугами. Таким образом, граф G преобразуется в ориентированный граф $G' = (V, W')$ (рис. 3).

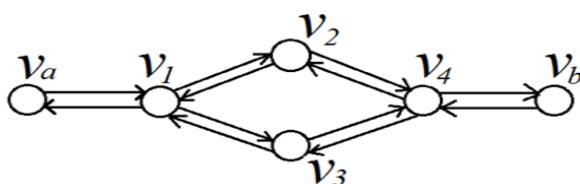


Рис. 3. Ориентированный граф перегона с одним разъездом.

3. Дискретно-событийная модель перегона

Задачи обеспечения безопасности движения поездов аналогичны задачам, решаемым в теории дискретно-событийных систем (ДСС). Основная задача, решаемая в ДСС: как по ДС-модели объекта и заданным ограничениям на его функционирование построить управляющий компонент-супервизор, обеспечивающий поведение объекта в соответствии заданным ограничениям.

Таким образом, обеспечение безопасного движения на железнодорожном транспорте (блокирование аварийных ситуаций) состоит в дискретно-событийном моделировании, включая парадигму супервизорного управления, основных компонентов ЖД сети: перегона с разъездом, сегмента, блок-участка, стрелки, светофора.

Напомним основные положения ДСС. ДСС – это триплет (G, K, S) , где объект $G = \{G^1, G^2, \dots, G^n\}$ – совокупность автономных компонентов, K – спецификации (ограничения на поведение объекта), S – супервизор (управляющий компонент ДСС), обеспечивающий поведение G в соответствии с 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 (положение) 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 работах [1, 2] 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 K .

В нашем случае объектом является перегон с разъездом, он состоит из следующих компонентов: сегменты, стрелки, светофоры, кроме того, перегон сам является элементом ЖД сети.

3.1. ДС-модель перегона с разъездом

Построение ДС-моделей начнем с ДС-модели перегона (Π) как элемента ЖД сети. Объект $\Pi = \{V, M, E, G\}$, где V – множество вершин графа G (сегментов), в каждой вершине (сегменте) находится m_i поездов, M – множество поездов находящихся на перегоне, E – множество событий. Наступление события $ei, j \in E$ разрешает движение поезда из сегмента vi в сегмент vj , G – граф соединения сегментов перегона. Ограничения K содержательно определим следующим образом: движение поезда из сегмента vi в сегмент vj может быть разрешено только тогда, когда в сегменте vj обеспечивается заданный интервал безопасности между поездами, иными словами, K задается множеством запрещенных состояний каждого сегмента. Задачей супервизора S является выполнение ограничений K путем разрешения или блокирования $ei, j \in E$. Нетрудно видеть, что автоматная модель перегона сложна.

Поэтому для представления ДС-моделей основных компонентов ЖД 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 состояние ЖД сети, положение поездов, ЖД стрелок, светофоров.

ДС-модель перегона с разъездом представляем сетью Петри $(P, T, Pre, Post)$ следующим образом:

1) каждой вершине v_i (сегменту) графа G' (рис. 3) сопоставляется позиция p_i в графе сети Петри (рис. 4); 2) 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 палочками). Состояние сети Петри определяется ее маркировкой μ :

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n),$$

где $n = |P|$, величина μ_i равна количеству фишек в позиции p_i (количеству 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, в следующих разделах этому будет уделено основное внимание.

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

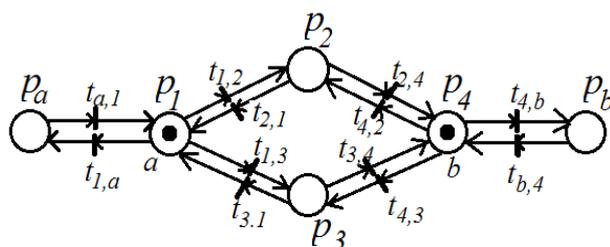


Рис. 4. Граф сети Петри перегона с разъездом, $\mu = (0, a, 0, 0, b, 0)$.

Основное назначение этого уровня моделирования – наблюдать за движением поездов по перегону на соответствие заданным маршрутам, осуществлять расчет временных параметров движения поездов т. д.

3.2. ДС-модель сегмента

Как отмечалось выше, сегмент перегона состоит из последовательно соединенных секций (блок-участков). Сеть Петри сегмента представляется как (P, T, μ) , где P – множество позиций (секций), T – множество переходов (событий, управляющих движением поездов), μ – маркировка сегмента:

$$\mu = (\mu_1 \mu_2 \dots \mu_k),$$

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, $\mu = (100)$.

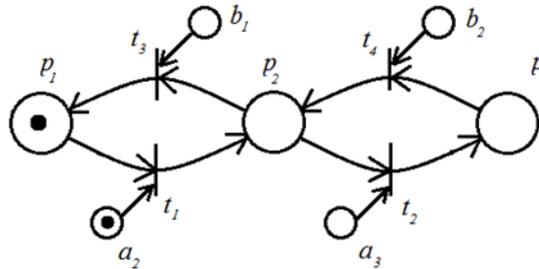


Рис. 5. Сеть Петри сегмента перегона, состоящего из трех секций.

В позиции p_1 находится фишка, что означает нахождение поезда на 1-й секции. Позиции a_2 , a_3 , b_1 , b_2 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 1-й на 2-ю секцию, то управляющей переменной a_2 присваивается единичное значение ($a_2 = 1$), а в позицию a_2 помещается фишка, создавая тем самым условия запуска перехода t_1 , в результате чего происходит перемещение фишки из позиции p_1 в p_2 . Если затем будет $b_1 = 1$, то произойдет перемещение фишки из позиции p_2 в 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 разделе 3.3. 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_1 в 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 2-й 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 чего фишка перемещается из позиции $p_{1,2}^1$ в позицию $p_{1,2}^2$ (поезд находится одновременно на обеих секциях).

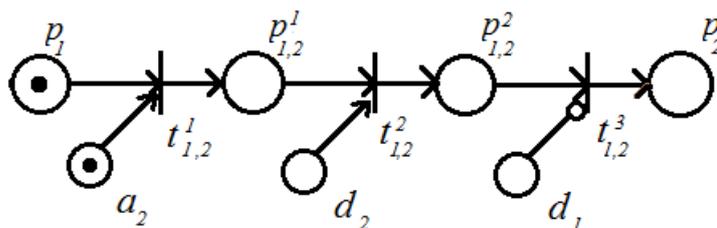


Рис. 6. Сеть Петри, моделирующая движение поездов по сегменту.

Фишка будет оставаться в позиции $p_{1,2}^2$ до тех пор, пока конец поезда будет находиться на 1-й секции. После того как $d_1 = 0$ (1-я 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 $p_{1,2}^1, p_{1,2}^2$ определяется сигналами от датчиков d_1 и d_2 , оно зависит от скорости движения поезда, длины поезда и секций.

Рассмотренный процесс движения поезда приведен в таблице 1.

Таблица 1. Процесс движения поезда.

	a_2	$d_1 d_2$	t_1	$p_1, p_{1,2}^1, p_{1,2}^2, p_2$	Секции		Светофор	
					$C_{1,2}$	$C_{2,1}$		
1	0	1 0	0	1 0 0 0	1-я занята	2-я свободна	Красный	Зеленый
2	1	1 0	$t_{1,2}^1$	0 1 0 0	1-я занята	2-я свободна	Красный	Зеленый
3	0	1 1	$t_{1,2}^2$	0 0 1 0	1-я занята	2-я занята	Красный	Красный
4	0	0 1	$t_{1,3}^3$	0 0 0 1	1-я свободна	2-я занята	Зеленый	Красный

Светофоры секций обозначим следующим образом: светофор на входе 2-й секции со стороны 1-й секции обозначим как $C_{2,1}$, аналогично, светофор 1-й секции со стороны 2-й обозначим как $C_{1,2}$. Состояние светофора (красный – зеленый) в простейшем случае определяется состоянием секций (свободна – занята), т. е. сигналом соответствующего датчика. В таблице приведена смена состояний светофоров $C_{1,2}, C_{2,1}$ при движении поезда из 1-й секции на 2-ю.

3.3. 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.

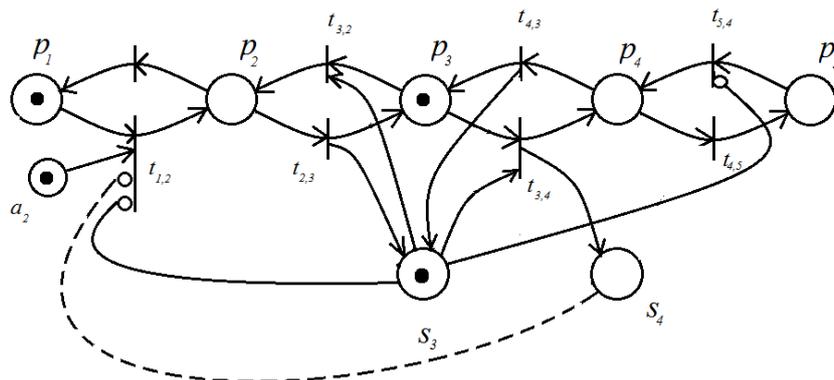


Рис. 7. Объединенная сеть Петри сегмента и супервизора безопасности.

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 позиции p_1 переместится 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 s_3 совпадает с наличием (отсутствием) фишки в p_3 . Таким образом: каждая позиция p_i сети дополняется управляющей позицией s_i и соответствующими блокирующими дугами. Количество управляющих позиций (позиций типа s) равно количеству секций перегона.

Совокупность управляющих позиций типа s и соответствующих блокирующих дуг образует так называемый супервизор безопасности, основными функциями которого являются синхронизация и обеспечение требований безопасности.

Требование безопасности можно ужесточить, а именно потребовать, чтобы между активными позициями были бы две пустые позиции. Это достигается следующим образом. Рассмотрим перемещение фишки из позиции p_3 в p_4 ($a_4 = 1$). После срабатывания перехода $t_{3,4}$ в позицию s_4 супервизора помещается фишка. Блокирующая дуга в переход $t_{1,2}$ от позиции s_4 (пунктир) 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 «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 состояния «Красный» в состояние «Зеленый» обозначим как f_1 . Нетрудно найти, что

$$f_1 = \bar{d}_2 \bar{s}_3,$$

т. е. функция f_1 принимает единичное значение при отсутствии поезда на 2-й 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 :

$$f_2 = d_2 \vee s_3,$$

т. е. функция f_2 принимает единичные значения при занятой 2-й секции или при наличии фишки в позиции s_3 супервизора.

3.4. ДС-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 (рис. 4).

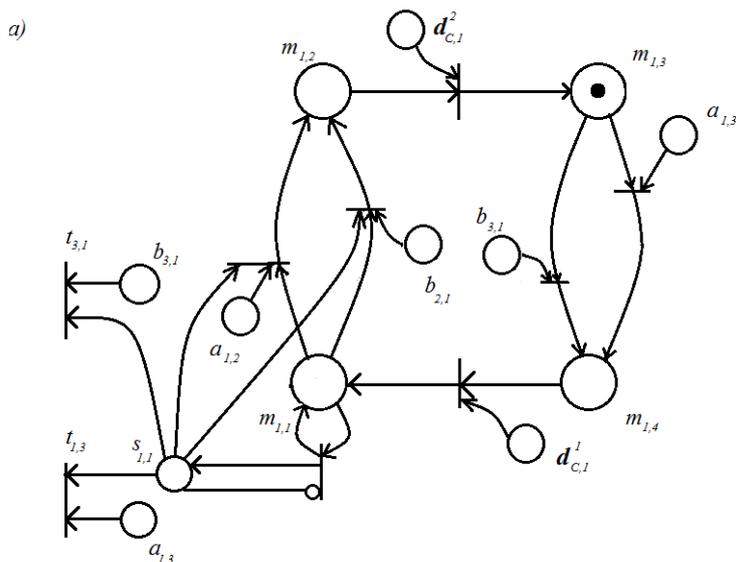


Рис. 8. ДС-модель стрелки.

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 $a_{1,2}$, $a_{1,3}$, $b_{1,2}$, $b_{2,1}$ 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 $b_{3,1} = 1$ происходит перемещение фишки из позиции $m_{1,3}$ в позицию $m_{1,4}$, в которой на стрелку c_1 выдается 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 $t_{3,1}$ (рис. 4). Аналогично происходит переход из положения стрелки 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 $t_{1,2}$, $t_{2,1}$ (рис. 4).

Таким образом, в данном разделе показано как строить ДС-модели ЖД 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.

4. Заключение

- 1) Построены ДС-модели компонентов перегона с разъездом: сегмента, секции (блок-участка), стрелки, светофора, перегона с разъездом на основе сети Петри.
- 2) Показано как строить блокирующие супервизоры, управляющие ДС-моделями элементов ЖД 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 движении поездов.

Список литературы

1. 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.
2. Амбарцумян А.А. Потехин А.И. Групповое управление в дискретно-событийных системах // Проблемы управления. 2012. № 5. С. 46-53.
3. Ramadge J.G., Wonham W.M. The control of discrete-event systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1989. Vol. 77, No. 1. P. 81-98.
4. Chalmers Golaszewski C.H., Ramadge P.J. Control of discrete-event processes with forced events // Proc. 28th Conf. Decision Control. Los Angeles, 1987. P. 247-251.
5. Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to discrete event systems // Springer Science+Business Media, LLC. USA. 2008. 781 p.
6. Mustafa Seçkin Durmuş, Mehmet Turan Söylemez. 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.
7. Joakim Bjørk, Anders M. Hagalisletto, Paal Enger. Large scale simulations of Railroad Nets, Precise Modeling and Analysis. Department of Informatics, University of Oslo, 2006.
8. Maged Dessouky, Fernando Ordonez, Robert Leachman, PavankumarMural. Strategies for effective rail track capacity usage. Final Report METRANS Project January 16, 2010. University of Southern California. Automation Petri Net Based Railway Interlocking and Signalization Design.