МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Потехин А. И.
ИПУ РАН г. Москва

Аннотация: В качестве объекта транспортной системы рассмотрена железнодорожная станция. Структура станции моделируется логической схемой, по которой строится сеть маршрутов. В работе представлен метод группового управления движением поездов, ориентированный на отношения между маршрутами (совместимости, враждебности). Разработан Жизненный Цикл маршрута поезда (сборка маршрута, движение по маршруту, разборка маршрута), реализующий его перемещение по станции одновременно с другими поездами. Жизненный Цикл реализуется в виде автоматного графа переходов. В базисе сети Петри разработана универсальная дискретно-событийная модель движения поезда по маршруту.

Ключевые слова: транспортные системы, логическая модель железнодорожной станции, групповое управление движением поездов, жизненный цикл маршрутов, дискретно-событийная модель движения поезда.

Введение

Увеличение нагрузки на железнодорожный транспорт, повышение требований к безопасности движения при ограниченных возможностях развития железнодорожной сети требуют все более эффективного использования ресурсов существующей инфраструктуры. Этим объясняется растущий интерес к развитию автоматических средств поддержки принятия решений, направленных, 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 необходимо применять формальные методы проектирования и моделирования этих систем.

При исследовании безопасности структурно-сложных и потенциально-опасных систем (железнодорожные сети, транспортные сети в нефтегазодобывающих областях), широкое применение находят логические модели и методы. Логическое моделирование основано на законах алгебры логики, конечных автоматов, сетей Петри, общей теории дискретно-событийных систем (ДСС).

Центральным звеном в оперативном управлении подвижным составом является дежурный по станции (*станционный диспетчер*). Он определяет маршруты (пути следования поездов по станции) и с помощью устройств СЦБ (сигнализации, централизации, блокировок) дистанционно управляет стрелками и светофорами. Главные требования – обеспечение безопасности и выполнение графика движения поездов. Работа станционного диспетчера сложна и ответственна, принимаемые им решения связаны с риском, выполнение функций требует максимальной сосредоточенности, контроля всех процессов и прогнозного анализа развития текущей ситуации.

В этой связи, создание системы, выполняющей в автоматическом (или в интерактивном) режиме задачи оперативной работ (формировать маршруты и управлять движением поездов с учетом оперативной обстановки на станции, предвидеть возможные конфликтные ситуации и находить решения, исключающие эти ситуации) является актуальной научной и практической задачей.

В предыдущей работе [1] разработаны логические модели типовой железнодорожной станции, станционных маршрутов (маршрутов отправления, прибытия поездов и т. д). Структура станции моделируется логической схемой, на основе которой находиться множество маршрутов. Разработан метод построения простых, составных и альтернативных маршрутов движения, разработаны критерии совместимости, несовместимости, враждебности маршрутов.

Необходимо отметить, что предлагаемая типовая модель железнодорожной станции существенно проще реально существующих станций, как по структуре, так и по функционированию. Основной задачей автор видит построение такой станции и такого управления, которые б исключили необходимость наличия диспетчера.

В настоящей работе разработан Жизненный Цикл маршрута (сборка маршрута, движение по маршруту, разборка маршрута), учитывающий одновременное движение на станции данного поезда с другими поездами. Жизненный Цикл реализуется в виде автоматного графа переходов.

Графическое представление движения поездов по железнодорожной сети удобно моделировать перемещением меток по модели железнодорожной сети на основе сети Петри, что позволяет привлекать к работе железнодорожных экспертов, не являющихся экспертами в математических дисциплинах. Сети Петри хорошо подходят к реальной параллельности движения поездов: выделенные участки (блок-участки) железнодорожной сети представляются позициями, управляемые переходы реализуют условия движения поездов. Поезда моделируются метками (фишками) в позициях. Сеть Петри в виде текущей разметки всегда точно определяет состояние железнодорожной сети, положение поездов. Однако, движение поезда от одного фиксированного участка к другому моделируется перемещением только одной метки по сети Петри, в то время как длинный поезд при движении некоторое время может занимать оба участка и несколько стрелок.

В настоящей работе разработана типовая дискретно – событийная модель движения поезда по заданному маршруту (в виде сети Петри).

1 Жизненный цикл маршрута

В предыдущей работе [1] разработана логическая модель типовой железнодорожной станции, станционных маршрутов (маршрутов отправления, прибытия поездов и т. д). Структура станции моделируется логической схемой, на основе которой находиться множество маршрутов. Разработан метод построения простых, составных и альтернативных маршрутов движения, разработаны критерии совместимости, несовместимости маршрутов.

Напомним основные положения этих исследований на простом примере (рис. 1).

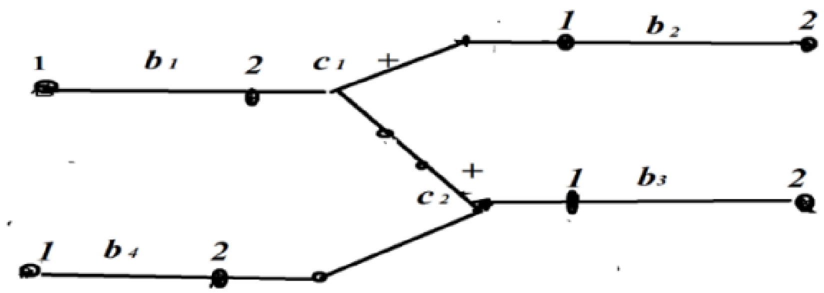

Рис.1 Фрагмент железнодорожной сети

Блок - участки фрагмента обозначены как b_1, b_2, b_3, b_4. Стрелки- c_1, c_2.

Основные свойства блок – участка:

- окончания блок – участков обозначены цифрами 1(слева) и 2 (справа);
- разрешения въезда поезда на блок – участок b_i (слева) обозначим как $x(b_i^1)$, справа- $x(b_i^2)$;
- разрешения выезда поезда с блок – участка b_i обозначим соответственно, как $y(b_i^1)$, $y(b_i^2)$;
- наличие поезда на блок – участке bi обозначим как $p(b_i)$:

$p(b_i)=1$- есть поезд,

$p(b_i)=0$ - нет поезда;

-имеем:

$x(b_i^1)$ & $y(b_i^1)=0$, $x(b_i^2)$ &$y(b_i^2)=0$,

$x(b_i^1)$ & $p(b_i)=0$, $x(b_i^2)$ & $p(b_i)=0$;

Основные свойства светофоров:

- на входах и выходах блок – участков установлены светофоры.
- при сигнале диспетчера $x(b_i^1)=1$ светофор $A_1(b_i^1)$ на входе 1 блок – участка b_i устанавливается в положение “Зеленый”,
- иначе устанавливается в положение “ Красный”,
- аналогично устанавливается светофор $A_2(b_i^2)$,
- при $y(b_i^1)=1$ светофор $B_1(b_i^1)$ на выходе 1 блок – участка bi устанавливается в положение “Зеленый”,
- иначе устанавливается в положение “ Красный”,

- аналогично светофор $B_2(b_i^2)$.

На рис.1 светофоры не показаны.

Основные свойства стрелки:

- стрелка c_i имеет два положения - прямое и боковое.

На рис.1 прямое положение обозначено как +.

В тексте прямое положение обозначено как s_i, боковое - как $\bar{s}$.

Управляющие сигналы F(c) и R(c) устанавливают стрелку в прямое и боковое положения соответственно;

p(ci) = 1 означает, что стрелка ci находится под поездом.

2 Логическая модель маршрута

В работе [1] разработан формальный метод представления структуры железнодорожных объектов (станций, перегонов) в виде системы логических функций, на основе которых находится множества простых, составных, альтернативных маршрутов. Определены логические отношения между маршрутами (совместимые, несовместимые).

Формирование *простого* маршрута осуществляется диспетчером станции, он задаёт входную, выходную позиции (блок-участки) маршрута и последовательность соединяющих их стрелок:

$m\ (p_i, pj) = (b_i, c_{r,1}, c_{r,2}, ..., cr_{,k}, b_j)$,

где b_i – начало, b_j - конец маршрута.

Формирование *составного* маршрута осуществляется конкатенацией простых маршрутов:

$m\ (p_i, pj) = (b_i, c_{r,1}, c_{r,2}, b_g, cr_{,k}, b_j)$,

Здесь маршрут рассматривается как упорядоченная совокупность блок-участков и стрелок.

Далее, если все стрелки свободны (т. е. не заняты в других маршрутах), диспетчер устанавливает их в положение, соответствующее данному маршруту, которое задается набором, например: (1, 0…,1). В наборе “1” означает прямое направление, “0” – боковое направление стрелки *c*. Положение каждой стрелки описывается значением логической переменой *s*. Единичное значение конъюнкции $(s_{r,1}\ \bar{s}_{r,2} \ldots s_{r,k})$ означает, что все стрелки $(c_{r,1}, c_{r,2}, \ldots, c_{r,k})$ установлены в положения, соответствующее набору (1,0,…1), и маршрут считается сформированным (собранным). Важным ограничением является то, что маршрут может быть расформирован диспетчером либо до начала движения по нему поезда, либо после окончания движения, т.е. запрещается изменять маршрут во время движения по нему поезда. Затем путем управления входными, выходными светофорами диспетчер даёт разрешение на движение поезда по маршруту. Функция проходимости разрешенного маршрута $m\ (p_i, pj)$ имеет вид:

$f\ (b_{j,} b_{i)} = y(b_j), s_{r,\,k} \ldots \bar{s}_{\ r,2}\ s_{r,1}\ x(b_i)$.

7.1 Нахождение множества маршрутов

Фрагмент железнодорожной сети представляем как логическую схему со многими входами и выходами, роль которых играют позиции (блок - участки). Пусть *B* – множество позиций, *k* – количество стрелок. Для каждой позиции b_i є *B*, считая её выходной позицией, а остальные позиции - входными, специальной процедурой [1] (от “ выхода схемы – к входам”) находим логическую функцию проходимости *f* (b_i). Она принимает единичное значение на множестве разрешённых путей, оканчивающихся в позиции (блок-участке) b_i.

Свойства функции проводимости *f* (b_i):

1.Количество конъюнкций в ДНФ функции *f*(b_i) равно количеству путей, оканчивающихся в вершине b_i.

2. Каждая конъюнкция функции *f* (b_i) содержит информацию о начале и конце соответствующего пути.

3. Каждая конъюнкция функции *f* (b_i) содержит информацию о количестве стрелок и их положении в каждом пути.

4. Конъюнкции функции *f* (b_i) допускают перестановку переменных (в силу коммутативного закона булевой алгебры ($s_1\ s_2 = s_2\ s_1$)). В то время как всякий маршрут имеет фиксированную последовательность стрелок. Таким образом, ДНФ функция *f* (b_i) явно *не содержит* информацию о последовательности стрелок в маршрутах. Для того, чтобы конъюнкции функции *f* (b_i) содержали информацию о последовательности стрелок в маршрутах поступим следующим образом. Первой стрелке на шаге 1 процесса получения функции *f* (b_i) присвоим порядковый номер 1. В нашем случае

при построении функции проводимости f (b_1) по рис.1 первой стрелкой является стрелка c_1. Поэтому логической переменной s_1 присвоим порядковый номер 1 в виде верхнего индекса - s_1^1. Последовательно соединённой со стрелкой c_1 является стрелка c_2. Логической переменной s_2 присвоим порядковый номер 2 в виде верхнего индекса - s_2^2 . В этом случае каждая конъюнкция функций проводимости содержит информацию о последовательности и одновременно о положении стрелок соответствующего маршрута. Для составных маршрутов потребуется упорядочивание не только стрелок, но и блок- участков.

По функции f (b_i) получаем множество маршрутов M(b_i), оканчивающихся в позиции b_i. Множество ∪ M (b_i) по всем b_i є B определяет (задаёт) множество маршрутов сети.

Система логических функций проводимости нашего фрагмента сети имеет вид:

$f(b_1)=y(b_1^1)\,x(b_1^2)\,[s_1^1\,y(b_2^1)\,x(b_2^2) \vee \overline{s_1^1}\,s_2^2\,y(b_3^1)\,x(b_3^2)]$;

$f(b_2)=y(b_2^2)\,x(b_2^1)\,s_1^1\,y(b_1^2)\,x(b_1^1)$;

$f(b_3)=y(b_3^2)\,x(b_3^1)\,[s_2^1\,\overline{s_1^2}\,y(b_1^2)\,x(b_1^1) \vee \overline{s_2^1}\,y(b_4^2)\,x(b_4^1)]$;

$f(b_4)=y(b_4^1)\,x(b_4^2)\,\overline{s_2^1}\,y(b_3^1)\,x(b_3^2)$.

После представления системы функций в виде ДНФ получаем 6 конъюнкций и соответственно 6 простых маршрутов.

Обозначим маршрут m(b_i , bj) как $m_{i,j.}$, верхние индексы стрелок можно убрать:

$m_{2,1} = (b_2, s_1, b_1)$;

$m_{1,2} = (b_1, s_1, b_2)$;

$m_{1,3} = (b_1, \overline{s}_1, s_2, b_3)$;

$m_{3,1} = (b_3, s_2, \overline{s}_1, b_1)$;

$m_{3,4} = (b_3, \overline{s}_2, b_4)$;

$m_{4,3} = (b_4, \overline{s}_2, b_3)$

7.2 Типы маршрутов

Отношения между маршрутами (совместимые, несовместимые) можно определить по системе логических функций следующим образом.

Множество маршрутов можно разделить на совместимые, несовместимые и враждебные маршруты.

1. Совместимые маршруты – маршруты, по которым поезда могут двигаться одновременно и независимо друг от друга. Это маршруты, которые не имеют общих входных, выходных позиций (блок-участков) а также общих стрелок.

Например, маршруты

$m_{2,1} = (b_2, s_1, b_1)$ и $m_{3,4} = (b_3, \overline{s}_2, b_4)$

не имеют общих входных, выходных позиций, а также общих стрелок.

Вывод 1. Конъюнкции совместимых маршрутов не должны иметь общих переменных.

2. Несовместимые маршруты – маршруты, которые не могут выполняться одновременно.

Пара маршрутов, отличающиеся положением хотя бы одной стрелки, не может выполняться одновременно, т. е. одновременное движение поездов по несовместимым маршрутам физически невозможно.

Конъюнкции ДНФ функции проходимости $f(b_i)$ для всех b_i є B отличаются друг от друга значением, по крайней мере, одной переменной типа s.

Вывод 2. Конъюнкции несовместимых маршрутов ортогональны, т. е. их произведение равно нулю.

3. Враждебные маршруты – пара маршрутов, по которым одновременное движение поездов может привести к аварии (столкновению).

Пара маршрутов враждебны друг другу, если они имеют общий блок- участок.

В талице1 несовместимость или враждебность маршрутов обозначены 0.

Таблица 1

	$m_{2,1}$	$m_{1,2}$	$m_{1,3}$	$m_{3,1}$	$m_{3,4}$	$m_{4,3}$
$m_{2,1}$	1	0	0	0	1	1
$m_{1,2}$	0	1	0	0	1	1
$m_{1,3}$	0	0	1	0	0	0
$m_{3,1}$	0	0	0	1	0	0
$m_{3,4}$	1	1	0	0	1	0
$m_{4,3}$	1	1	0	0	0	1

7.3 Жизненный Цикл маршрута

На рис.2 изображен типовой Жизненный Цикл маршрута в виде автоматного графа переходов.

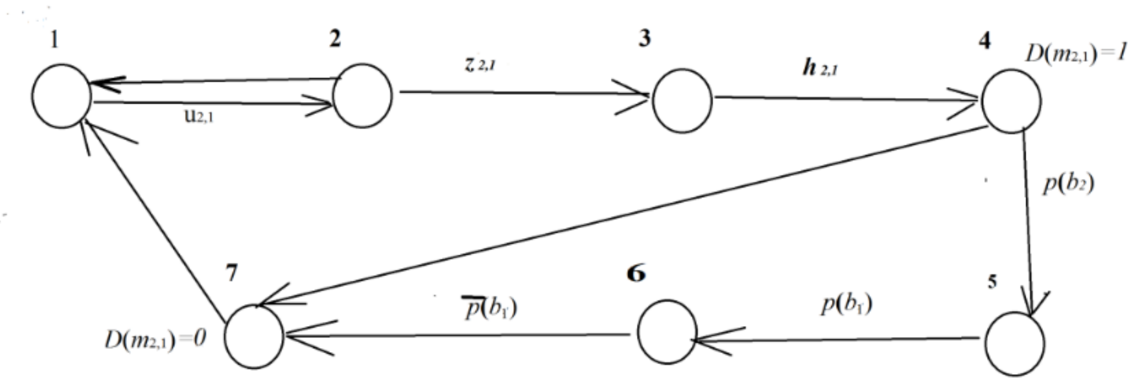

Рис.2 Типовой Жизненный Цикл маршрута

Рассмотрим Жизненный Цикл маршрута $m_{2,1} = (b_2, s_1, b_1)$ с функцией проводимости
$f(b_1) = y(b_1^1)\ x(b_1^2)\ s_1^1\ y(b_2^1\ )\ x(b_2^2)$

Состояние1 графа –исходное.

Состояние 2 – проверка наличия несовместимых маршрутов с маршрутом $m_{2,1}$.

По таблице1 находим несовместимые маршруты $m_{1,2}$, $m_{1,3}$, $m_{3,1}$.

Собранный маршрут или маршрут,по которому движется поезд (активный маршрут), обозначим как $D(m_{i,j})=1$, иначе $D(m_{i,j})=0$.

Заданный маршрут $m_{2,1} = (b_2, s_1, b_1)$ может быть собран, если логическое произведение
$(D(m_{12})=0) \wedge (D(m_{13})=0) \wedge (D(m_{31})=0) = 1$.

Обозначим это произведение как $z_{1,2}$. При $z_{1,2}$ =1 – переход в состояние 3.

Состояние3 - Установка светофоров в соответствие с единичными значениями сигналов разрешения $y(b_1^1)$, $x(b_1^2)$, $y(b_2^1\ )$, $x(b_2^2)$, а также установка стрелки C_1 в положение s: F(s)=1.

Выполнение этих действий обозначим как $h_{2,1}$.

При $h_{1,2}$ =1 – переход в состояние 4.

Состояние4 - Маршрут $m_{2,1} = (b_2, s_1, b_1)$ собран и $D(m_{2,1})=1$.

Начало движения поезда: $p(b_2) = 1$ (переход в состояние 5).

Состояние5 – Движение поезда по маршруту.

Состояние 6 –Поезд находится на последнем блок-участке маршрута: $p(b_1) = 1$

Состояние 7 - Поезд проехал последний блок-участок маршрута: $p(b_1) = 0$.

Разборка маршрута и $D(m_{21})=0$. Переход в исходное состояние.

3 Типовая ДС-модель движения поезда по заданному маршруту

В большинстве работ по моделям движения поездов в виде сети Петри имеют понятное, но мало реалистичное поведение. Так, движение поезда от одного блок - участка к другому моделируется обычно перемещением только одной метки по сети Петри, в то время как длинный поезд при движении некоторое время может занимать несколько блок- участков.

Предложим универсальную модель движения поезда по заданному маршруту (в виде сети Петри), в которой возможно занятие движущим поездом двух и более блок- участков, стрелок.

Рассмотрим **маршрут** $m_{2,1}$ = (b_2, s_1, b_1), $f(b_1) = y(b_1^1)\ x(b_1^2)\ s_1^1\ y(b_2^1\ )\ x(b_2^2)$.

При $p(b_2)$=1 и $x(b_2^2)$=1 считаем, что поезд начал движение по блок-участку b_2. Затем поезд движется по стрелке c_1 и блок-участку b_1, при этом конец поезда может еще находиться на блок-участке b_2. Таким образом, движение поезда по маршруту $m_{2,1}$ = (b_2, s_1, b_1) можно изобразить в виде последовательности маркировок (таблица2).

таблица2

	b_2	c_1	b_1
1	0	0	0
2	1	0	0
3	1	1	0
4	1	1	1
5	0	1	1
6	0	0	1
7	0	0	0

Сеть Петри движения поезда по маршруту $m_{2,1}$ = (b_2, s_1, b_1) изображена рис.3 (показана маркировка 2).

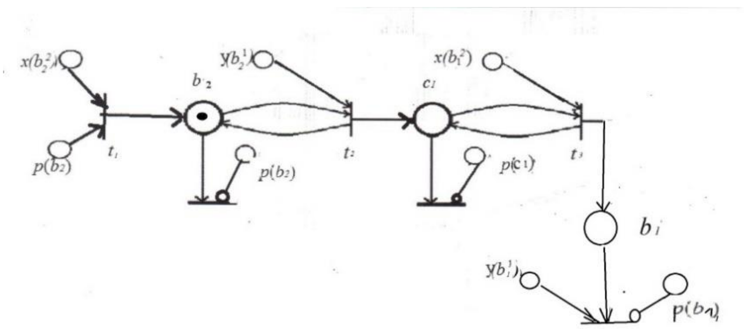

Рис.3. Сеть Петри движения поезда по маршруту $m_{2,1}$ = (b_2, s_1, b_1)

При $p(b_2)$=0 метка в позиции b_2 сети Петри исчезает (поезд покинул блок- участок b_2), при $p(c_1)$=0 исчезает метка в позиции c_1, при $p(b_1)$=0 исчезает метка в позиции b_1 (поезд покидает данный фрагмент сети).

Заключение

1. Разработан Жизненный Цикл маршрута (сборка маршрута, движение по маршруту, разборка маршрута), учитывающий одновременное с другими движение заданного поезда. Жизненный Цикл реализуется в виде автоматного графа переходов.

2. Разработана универсальная ДС-модель движения поезда по заданному маршруту (в виде сети Петри), допускающая занятие движущим поездом двух и более блок- участков, стрелок.

3. Использование полученных результатов позволяет формально описать управление групповым движением поездов на железнодорожной станции.

Литература

1. *Потехин А.И.* Логические модели объектов ж/д стации. // Проблемы управления, №5 2016г.с.71-79.
2. *Кузнецов С.К., Потехин А.И.*, Современные системы поддержки принятия решений железнодорожным диспетчером, //Проблемы управления, №6, 2017г. с.1-11.