

© 2020 г. А.И. ПОТЕХИН, канд. техн. наук (an_pot@mail.ru)
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

ЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДОВ

Показано применение методов математической логики при проектировании системы управления групповым движением поездов железнодорожной станции. Разработан типовой жизненный цикл маршрута (проектирование маршрута, сборка, контроль движения поезда по маршруту, разборка маршрута), гарантирующий безопасное групповое движение поездов на станции. Разработаны модель маршрута в виде логической функции проходимости и модель железнодорожной станции в виде логической схемы. На основе этих моделей находится множество потенциально возможных станционных маршрутов, определяются состояния стрелочных переводов, светофоров маршрута. Задаются различные отношения между маршрутами: совместимые, несовместимые, альтернативные.

Ключевые слова: модель железнодорожной станции, логическая модель маршрута, жизненный цикл маршрута, совместимые, несовместимые, альтернативные маршруты.

DOI: 10.31857/S0005231020050104

1. Введение

В работе [1] предложен подход к логическому управлению технологическими процессами. Он основан на обследовании текущего состояния структуры технологических потоков по их логической модели. При этом применяется принцип управления с обратной связью по отклонению текущего состояния структуры потоков от требуемого состояния. Это существенно расширяет область применения систем логического управления. Традиционно система логического управления представлялась в виде совокупности жесткого логического алгоритма (логическая схема, конечный автомат) и объекта управления в виде множества параметров объекта. Следствием этого задачами логического управления, как правило, были управление режимами пуска, останова, защиты, блокировки и т.д., т.е. те алгоритмы, которые были постоянными вне зависимости от технологических процессов. В то время как было необходимо решать задачи управления конфигурацией объекта, целенаправленным изменением состава активных элементов объекта, связей между ними, управлением структурой технологических потоков.

В [2] этот подход был использован при разработке событийного логического управления производственными процессами поточного типа. Разработаны принципы построения системы логического управления технологической системой на основе событийных логических моделей технологических процессов, модели структуры производства, элементов транспортной сети.

Это направление получило название «управление по логическим моделям». Управление по логическим моделям позволяет создавать качественное программное обеспечение на всех этапах его жизненного цикла (на этапах проектирования, тестирования, верификации и т.д.). В этой статье рассмотрена попытка применения «управления по логическим моделям» для безопасного управления групповым движением поездов на железнодорожной станции.

Увеличение нагрузки на железнодорожный транспорт, повышение требований к безопасности движения при ограниченных возможностях развития железнодорожной сети требуют все более эффективного использования ресурсов существующей инфраструктуры. Главные требования — обеспечение безопасности и выполнение графика движения поездов. При этом задача оперативного управления осложняется тем, что:

- большой объем информации для принятия решений;
- огромное количество инструкций, правил и исключений.

Поэтому принимаемые станционным диспетчером (дежурным по станции) решения связаны с риском в прогнозном анализе развития текущей ситуации. В случае серьезных нарушений у диспетчера отсутствуют эффективные средства обеспечения безопасности и выполнения графика движения поездов. В общем случае управление железнодорожной системой состоит из двух частей: оперативное планирование движения поездов в условиях разнообразных помех и оперативное управление компонентами железнодорожной системы с целью реализации плана движения поездов. В работе [3] рассмотрены некоторые пионерские зарубежные проекты по созданию интеллектуальных систем оперативного планирования движением поездов в условиях разнообразных помех. В их основе лежит вычисление приближающихся конфликтов, нахождение оптимальных решений группового движения поездов путем перепланировки планов движения каждого поезда в режиме реального времени. Оперативное управление компонентами железнодорожной системы направлено на автоматическую реализацию функций управления элементами железнодорожных объектов (стрелками, светофорами, сборкой-разборкой маршрутов). С этой целью в работе [4] разработаны логические модели элементов инфраструктуры типовой станции (стрелочного перевода, последовательности стрелок, маршрута).

В данной работе исследуется применение методов математической логики для управления групповым движением поездов железнодорожной станции: поиск альтернативных маршрутов, выбор маршрута, совместимого с действующими маршрутами, проектирование жизненного цикла типового маршрута (проектирование маршрута, сборка, движения по маршруту, разборка маршрута).

2. Железнодорожная станция и маршруты

Станцией называется «раздельный пункт» с путевым развитием и устройствами, позволяющими выполнять операции по приему, отправлению, скрещению и обгону поездов, а также по приему, погрузке, выгрузке и выдаче грузов и по обслуживанию пассажиров. Структура путей станции состоит из множества так называемых блок-участков, стрелочных переводов (стрелок),

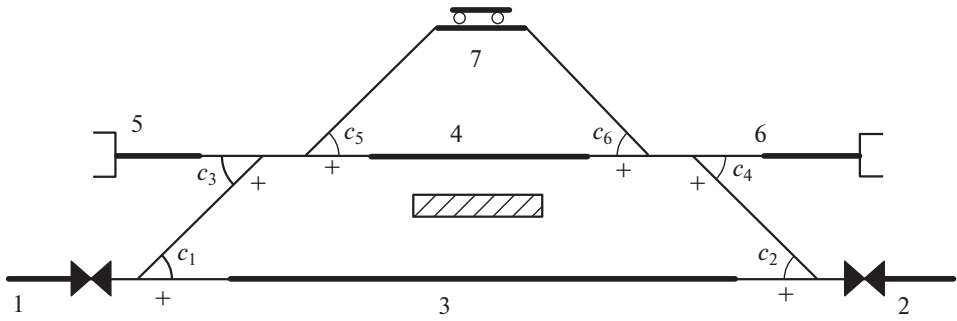


Рис. 1. Схема «промежуточной» железнодорожной станции.

соединительных рельсовых участков и светофоров. Блок-участок — это электрически изолированный рельсовый участок, состояние которого (свободен — занят) контролируется и управляется автоматически или диспетчером и дублируется состоянием светофоров, расположенных на границах блок-участка. Каждый блок-участок соединяется с помощью соединительных участков с другими блок-участками, а также — с электрически изолированными стрелочными переводами. Длина блок-участка должна быть больше самого длинного поезда. Стрелочный перевод (стрелка) служит для соединения рельсовых путей и изменения направления движения поездов. По количеству и расположению в топологическом плане пересекающихся путей стрелочные переводы могут быть обыкновенными, перекрестными и т.д. С помощью переводного механизма обыкновенная стрелка может находиться в одном из двух направлений — прямом и боковом.

На рис. 1 изображена схема так называемой промежуточной станции. Рассматривается упрощенная схема станции, она не содержит некоторых элементов инфраструктуры действующих станций (глухих пересечений, двойных стрелочных переводов и др.). Жирными линиями изображены блок-участки именных путей: 1, 2 — вход-выходные пути станции, 3 — главный путь, 4 — приемоотправочный путь, 5 и 6 — вытяжные пути (тупики), 7 — погрузочно-разгрузочный путь. Обыкновенные стрелки обозначены как c_1, \dots, c_6 . Прямоугольником обозначена платформа посадки и высадки пассажиров (путь 4) и место погрузки — разгрузки (путь 7). Светофоры не показаны. Несмотря на различные функциональные назначения станций, модель железнодорожной станции должна сохранить основные внешние свойства, как то: топологическую схему путей, соединительных рельсовых участков и стрелочных переводов (стрелок). С учетом этого исходную схему железнодорожной станции представим в виде неориентированного графа. Это преобразование достаточно простое, покажем его на данном примере.

На рис. 2 железнодорожная станция показана в виде «станционного» графа. Ребра и вершины «станционного» графа определим следующим образом:

— ребра обозначены как b_1, \dots, b_7 , они соответствуют блок-участкам станции.

Окончания участков обозначены цифрами 1 и 2 (произвольно). Ребро, соответствующее блок-участку b_i , в тексте будем обозначать как (b_i^1, b_i^2) или

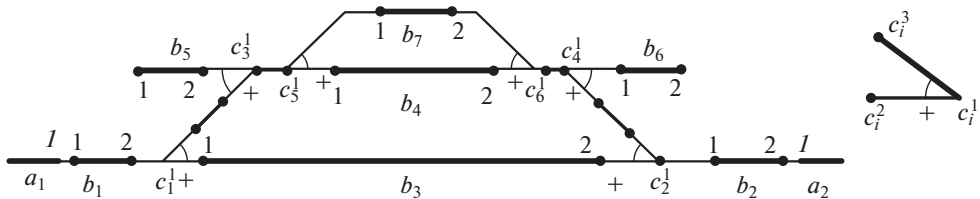


Рис. 2. Графическое представление железнодорожной станции.

(b_i^2, b_i^1) в зависимости от направления движения поезда. Блок-участки приближения к станции (блок-участки перегонов) — a_1 и a_2 ;

— узлы графа обозначены как c_1^1, \dots, c_6^1 , они соответствуют центрам обыкновенных стрелок. Каждому узлу инцидентны два ребра соответственно двум положениям стрелки, они соединены знаком Δ (см. рис. 2). Ребро, обозначенное знаком $+$, соответствует прямому направлению стрелки. Это ребро связывает центр стрелки c_i^1 и вершину c_i^2 только тогда, когда i -я стрелка находится в положении s . Другое ребро соответствует боковому направлению стрелки, т.е. это ребро связывает центр стрелки c_i^1 и вершину c_i^3 только тогда, когда стрелки находятся в положении \bar{s} . В тексте положения i -й стрелки обозначены как $c_i(\bar{s})$ или $c_i(s)$;

— ребра, соединяющие два блок-участка или блок-участки со стрелками, соответствуют соединительным рельсовым участкам.

Из теории графов: любая последовательность вида

$$v_1, e_1, v_2, e_2 \dots, e_k, v_{k+1},$$

где v_1, \dots, v_{k+1} — вершины графа, e_1, \dots, e_k — его ребра, причем $e_i = (v_i, v_{i+1})$, $i = 1, \dots, k$, и все ребра различны, называется цепью (путем).

В данном случае последовательность ребер графа станции будем называть рельсовым путем, в котором:

- все ребра различны;
- концевые ребра последовательности соответствуют блок-участкам;
- каждая стрелка в последовательности представлена не более одного раза;
- стрелки, входящие в последовательность, установлены в положения соответственно стрелочным ребрам последовательности.

Примеры рельсовых путей:

- внутростанционный рельсовый путь: $(b_5, c_3(\bar{s}), c_5(s), b_4, c_6(s), c_4(\bar{s}), b_6)$ (соединительные участки не показаны);
- рельсовый путь с участками приближения a_1, a_2 :

$$(a_1, b_1, c_1(s), b_3, c_2(s), b_2, a_2).$$

Определение 1. Ориентированную часть последовательности рельсового пути, имеющую начальный и конечный блок-участки, будем называть маршрутом.

Маршрут с начальным блок-участком b_i и конечным b_j обозначим как $m[b_i, b_j]$.

Примеры маршрутов из рис. 2

— внутрисканционный маршрут:

$$m[b_5, b_6] = [b_5, c_3(\bar{s}), c_5(s), b_4, c_6(s), c_4(\bar{s}), b_6],$$

где правая часть маршрута содержит последовательность блок-участков и стрелок рельсового пути;

— маршрут отправления поезда от приемоотправочного блок-участка b_4 на участок приближения a_2 :

$$m[b_4, a_2] = [b_4, c_6(s), c_4(s), c_2(\bar{s}), b_2, a_2];$$

— маршрут приема поезда на блок-участок b_4 с блок-участка приближения a_1 :

$$m[a_1, b_4] = [a_1, b_1, c_1(\bar{s}), c_3(s), c_5(s), b_4].$$

Утверждение 1. Из рельсового пути, содержащего n блок-участков можно построить $n(n-1)$ различных маршрутов.

3. Основные положения постановки задачи

Дадим несколько простых определений. Множество маршрутов станционного графа обозначим как M . Совместимые маршруты — маршруты, по которым поезда могут двигаться одновременно и независимо друг от друга. Очевидно, что маршруты, которые не имеют общих блок-участков и общих стрелок, являются совместимыми. Множество попарно совместимых маршрутов обозначим как N . В общем случае может быть v таких множеств (N_1, N_2, \dots, N_v) . Предполагается, что движение поезда по маршруту должно быть возможным без остановки от начала до конца маршрута. Для этого на этапе сборки маршрута физические стрелки устанавливаются в состояния в соответствии с направлением стрелок маршрута, входные и выходные светофоры блок-участков и стрелок устанавливаются в состояния, обеспечивающие поезду «зеленый путь».

Действующий маршрут определим как маршрут, начиная с момента установки стрелок и светофоров (сборка маршрута), и включающий процесс движения поезда по маршруту. Обозначим множество действующих маршрутов на момент времени t как $D(t)$.

Безопасность группового движения поездов гарантирована только тогда, когда для множества действующих маршрутов в любой момент времени t выполняется

$$D(t) \subseteq N_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, v\}.$$

Маршруты $m[b_i, b_j] = [b_i, b_{i,1}, \dots, b_{i,k}, b_j]$ и $m[b_i, b_j] = [b_i, b_{r,1}, \dots, b_{r,l}, b_j]$ альтернативны, если они имеют одинаковые начало и конец, при этом

$$\{b_{i,1}, \dots, b_{i,k}\} \neq \{b_{r,1}, \dots, b_{r,l}\}.$$

Множество альтернативных маршрутов с общим началом b_i и общим концом b_j обозначим как $M(b_i, b_j)$.

Пусть заданы начало b_i и конец b_j будущего маршрута. Требуется найти в множестве $M(b_i, b_j)$ маршрут $m[b_i, b_j] = [b_i, b_{i,1}, \dots, b_{i,k}, b_j]$, который был бы попарно совместим с действующими маршрутами на станции в данный момент времени $D(t)$. При положительном исходе переходим к его сборке, после чего считаем этот маршрут действующим, формируем $D(t + 1)$:

$$D(t + 1) = \{[m[b_i, b_j]] \cup D(t)\}.$$

Таким образом, этапы построения нового маршрута $m[b_i, b_j]$ состоят из:

- нахождения множества станционных маршрутов;
- нахождения множества альтернативных маршрутов $M(b_i, b_j)$;
- нахождения маршрута $m_r[b_i, b_j] \in M(b_i, b_j)$, попарно совместимого с действующими на данный момент времени маршрутами ($D(t)$).

4. Логическая модель маршрута

Для построения логической модели маршрута необходимо уточнить, с какого окончания (1-го или 2-го) блок-участка станции начинается и оканчивается маршрут. Например, в маршруте (рис. 2)

$$m[b_5, b_6] = [b_5, c_3(\bar{s}), c_5(s), b_4, c_6(s), c_4(\bar{s}), b_6],$$

прием поезда на участок b_6 происходит со стороны окончания 1. Поэтому в описании маршрута элемент b_6 заменим на b_6^1 . Аналогично, начало маршрута (элемент b_5) заменим на b_5^2 , что соответствует отправлению поезда через окончание 2 блок-участка b_5 . Проходной блок-участок b_4 заменим на (b_4^1, b_4^2) .

Аналогично поступаем со стрелками: $c_3(\bar{s})$ заменяем на (c_3^3, c_3^1) , $c_5(s)$ — на (c_5^1, c_5^2) , $c_6(s)$ — на (c_6^2, c_6^1) , $c_4(\bar{s})$ — на (c_4^3, c_4^1) .

В итоге имеем подробное описание маршрута:

$$m[b_5, b_6] = [b_5^2, (c_3^3, c_3^1), (c_5^1, c_5^2), (b_4^1, b_4^2), (c_6^2, c_6^1), (c_4^3, c_4^1), b_6^1].$$

Определение 2. Свойство маршрута, обеспечивающее поезду «зеленый путь» от начала до конца маршрута определим как проходимость маршрута.

Прочисимость маршрута есть аналог проводимости релейной схемы.

Рассмотрим процесс проектирования прочисимости маршрута. Окончаниям каждого блок-участка b_i сопоставляются логические переменные разрешения x_i^1, x_i^2 , единичное значение которых означают разрешение на въезд поезда со стороны окончаний 1, 2 соответственно. Одновременно с этим окончаниям блок-участка b_i сопоставляются логические переменные разрешения y_i^1, y_i^2 , единичное значение которых означают разрешение на выезд поезда со стороны окончаний 1, 2 соответственно. Единичное значение переменной разрешения означает, что соответствующий ей светофор устанавливается в

состояние «зеленый», инверсное значение переменных разрешения означает, что соответствующий ей светофор находится в состоянии «красный». При этом, имеют место естественные ограничения:

$$x_i^1 x_i^2 = 0, \quad y_i^1 y_i^2 = 0, \quad x_i^1 y_i^1 = 0, \quad x_i^2 y_i^2 = 0.$$

Каждый блок-участок маршрута может быть либо участком приема поезда (концом маршрута), либо участком отправления (началом маршрута), либо проходным участком. Логическую функцию разрешения приема поезда на блок-участок b_i через окончание 1 обозначим как $e(b_i^1)$ (the end): $e(b_i^1) = x_i^1 \bar{x}_i^2 \bar{y}_i^1 \bar{y}_i^2$, что соответствует разрешению приема поезда на блок-участок b_i со стороны окончания 1 ($x_i^1 = 1$) и при этом — запрет на въезд — выезд поезда через окончание 2 (так как $\bar{x}_i^2 \bar{y}_i^2 = 1$) и выезд поезда через окончание 1 ($\bar{y}_i^1 = 1$). Это соответствует обязательной остановке поезда на этом блок-участке (конец маршрута). Аналогично, разрешение приема поезда на блок-участок b_i со стороны окончания 2 обозначим как $e(b_i^2)$.

Таким образом, логические функции разрешения приема с остановкой поезда на блок-участок b_i имеют вид:

$$(1) \quad e(b_i^1) = x_i^1 \bar{x}_i^2 \bar{y}_i^1 \bar{y}_i^2, \quad e(b_i^2) = x_i^2 \bar{x}_i^1 \bar{y}_i^1 \bar{y}_i^2.$$

Логическую функцию разрешения отправления поезда (начало маршрута) с блок-участка b_i через окончание 1 обозначим как $d(b_i^1)$, через окончание 2 — $d(b_i^2)$ (departure):

$$(2) \quad d(b_i^1) = y_i^1 \bar{x}_i^1 \bar{x}_i^2 \bar{y}_i^2, \quad d(b_i^2) = y_i^2 \bar{x}_i^1 \bar{x}_i^2 \bar{y}_i^1.$$

При этом имеет место естественное ограничение: только одна из переменных разрешения приема или отправления $x_i^1, x_i^2, y_i^1, y_i^2$ блок-участка b_i может принимать единичное значение. Логическую функцию разрешения проезда через проходной блок-участок b_i (passing) обозначим как $p(b_i^1, b_i^2)$, если въезд происходит через окончание 1, и как $p(b_i^2, b_i^1)$, если въезд — через окончание 2:

$$(3) \quad p(b_i^1, b_i^2) = x_i^1 y_i^2 \bar{x}_i^2 \bar{y}_i^1, \quad p(b_i^2, b_i^1) = x_i^2 y_i^1 \bar{x}_i^1 \bar{y}_i^2.$$

Логические функции разрешения проезда через стрелку c_i определим следующим образом. Функцию разрешения проезда от центра стрелки c_i^1 «станционного» графа по прямому направлению (ребро (c_i^1, c_i^2)) обозначим как $q(c_i^1, c_i^2)$:

$$(4) \quad q(c_i^1, c_i^2) = s_i z_i^{12},$$

где z_i^{12} — переменная разрешения движения поезда от центра стрелки по прямому направлению.

Функцию разрешения проезда от центра стрелки c_i^1 по боковому направлению (ребро (c_i^1, c_i^3)) обозначим как $q(c_i^1, c_i^3)$:

$$(5) \quad q(c_i^1, c_i^3) = \bar{s}_i z_i^{13}.$$

Значения переменных z_i^{12} , z_i^{13} соответствуют состояниям светофоров, расположенных в центре стрелки, при этом $z_i^{12}z_i^{13} = 0$.

Функцию разрешения проезда к центру стрелки c_i^1 по прямому направлению (ребро (c_i^2, c_i^1)) обозначим как $q(c_i^2, c_i^1)$:

$$(6) \quad q(c_i^2, c_i^1) = s_i z_i^{21}.$$

Функцию разрешения проезда к центру стрелки c_i^1 по боковому направлению (ребро (c_i^3, c_i^1)) обозначим как $q(c_i^3, c_i^1)$:

$$(7) \quad q(c_i^3, c_i^1) = \bar{s}_i z_i^{31}.$$

Функцию разрешения проезда к центру стрелки c_i^1 по прямому или боковому направлению обозначим как $q(c_i^1)$:

$$(8) \quad q(c_i^1) = q(c_i^2, c_i^1) \vee q(c_i^3, c_i^1),$$

или

$$(9) \quad q(c_i^1) = s_i z_i^{21} \vee \bar{s}_i z_i^{31}.$$

При этом во всех случаях имеет место ограничение: только одна из переменных разрешения z_i^{12} , z_i^{13} , z_i^{21} , z_i^{31} стрелки c_i может принимать единичное значение.

Определение 3. Логическое произведение функций разрешения элементов маршрута определим как логическую функцию проходимости маршрута.

Обозначим логическую функцию проходимости маршрута $m[b_i, b_j]$ как $f(b_i, b_j)$.

Пример. Логическая функция проходимости маршрута

$$m[b_5, b_4] = [b_5^2, (c_3^3, c_3^1), (c_5^1, c_5^2), b_4^1]$$

имеет вид:

$$f(b_5, b_4) = (d(b_5^2) q(c_3^3, c_3^1) q(c_5^1, c_5^2) e(b_4^1)),$$

где

$$\begin{aligned} d(b_5^2) &= y_5^2 \bar{x}_5^1 \bar{y}_5^2 \bar{y}_5^1, & q(c_3^3, c_3^1) &= \bar{s}_3 z_3^{31}, \\ q(c_5^1, c_5^2) &= s_5 z_5^{12}, & e(b_4^1) &= x_4^1 \bar{x}_4^2 \bar{y}_4^1 \bar{y}_4^2. \end{aligned}$$

После замены функций d , q , e их правыми выражениями логическая функция проходимости имеет вид:

$$f(b_5, b_4) = y_5^2 \bar{x}_5^1 \bar{y}_5^2 \bar{y}_5^1 \bar{s}_3 z_3^{31} s_5 z_5^{12} x_4^1 \bar{x}_4^2 \bar{y}_4^1 \bar{y}_4^2.$$

Значения переменных y , x , z соответствуют состоянию светофоров блок-участков и стрелок, значения переменных s соответствуют направлению стрелок. По функции проходимости маршрута система управления движением

поездов на этапе сборки маршрута выдает управляющие воздействия на установку светофоров и стрелок в соответствующие состояния. Таким образом, логическая модель маршрута представляется как функция его проходимости. Существует проблема взаимодействия собираемого маршрута с действующими в данный момент времени маршрутами. В первом приближении все множество маршрутов можно разделить на совместимые, несовместимые и враждебные маршруты.

Совместимые маршруты — маршруты, по которым поезда могут двигаться одновременно и независимо друг от друга. Это маршруты, которые не имеют общих участков, а также общих стрелок. Очевидно следующее утверждение.

Утверждение 2. Логическое произведение функций проходимости совместимых маршрутов не равно нулю.

Несовместимые маршруты — маршруты, которые не могут выполняться одновременно. Пара маршрутов, отличающиеся положением хотя бы одной стрелки, не могут выполняться одновременно, так как одновременное движение поездов по таким маршрутам физически невозможно. Поэтому очевидно следующее утверждение.

Утверждение 3. Логическое произведение функций проходимости несовместимых маршрутов равно нулю.

Враждебные маршруты — пара маршрутов, по которым одновременное движение поездов может привести к аварии (столкновению). Это может быть, когда имеет место либо встречное движение поездов, либо один догоняет другого. В обоих случаях они должны иметь хотя бы один общий блок-участок.

Утверждение 4. Логическое произведение функций проходимости враждебных маршрутов равно нулю.

Доказательство:

Случай 1. При встречном движении поездов с общим конечным блок-участком b_i имеет место (формула 1):

$$e(b_i^1)e(b_i^2) = 0.$$

Случай 2. При встречном движении поездов и общим проходным блок-участком b_i имеет место (формула 3):

$$p(b_i^1, b_i^2)p(b_i^2, b_i^1) = 0.$$

Случай 3. При попутном движении поездов, когда начальный блок-участок b_i первого поезда является проходным для второго поезда (догоняющего), имеет место:

$$d(b_i^1)p(b_i^2, b_i^1) \vee (d(b_i^2)p(b_i^1, b_i^2)) = 0.$$

Доказательство закончено.

Таким образом, показано, что произведение функций проходимости несовместимых и враждебных маршрутов равно нулю. Поэтому все множество

Задать логическую схему — значит задать входные и выходные переменные, структуру связей между элементами схемы и логические функции, реализуемые этими элементами. В данном примере входные переменные x_1, x_2, x_3, b_2, b_3 , выходная переменная — b_1 .

Процедура получения логической функции по заданной схеме является многошаговой.

Шаг 1. Получение логической функции выходного элемента:

$$b_1 = x_1 h_1,$$

где h_1 — внутренняя переменная, она задает связь между выходным элементом схемы (элементом И) и связанного с ним элементом ИЛИ.

Шаг 2. Получение логической функции h_1 :

$$h_1 = h_2 \vee h_3,$$

где h_2, h_3 — внутренние переменные, они задают связи между элементом ИЛИ и связанных с ним элементами И.

Шаг 3. Получение логических функций h_2, h_3 :

$$h_2 = b_2 x_2, \quad h_3 = b_3 x_3.$$

Шаг 4. Получение логической функции схемы: последовательно заменяем внутренние переменные связи h_1, h_2, h_3 их правыми частями. В итоге имеем:

$$b_1 = x_1(b_2 x_2 \vee b_3 x_3) \quad \text{или} \quad b_1 = x_1 b_2 x_2 \vee x_1 b_3 x_3,$$

что можно рассматривать как два пути от входов схемы до выхода, если переменные x рассматривать как сигналы разрешения.

Рассмотрим процесс построения логических функций «станционного» графа (рис. 2), применяя основные положения вышеизложенной процедуры. При этом логическую функцию схемы, которая оканчивается элементом b_i^1 или b_i^2 блок-участка b_i будем называть логической функцией проходимости схемы с выходным элементом b_i^1 или b_i^2 и обозначать как $F(b_i^1)$ или $F(b_i^2)$ соответственно.

В качестве примера построим функцию проходимости схемы с выходным элементом b_4^1 блок-участка b_4 (рис. 2), т.е. построим функцию проходимости $F(b_4^1)$.

Шаг 1. Построение логической функции выходного элемента b_4^1 .

Заменим выходной элемент b_4^1 на логическую функцию разрешения приема поезда (формула 1), т.е. на функцию

$$e(b_4^1) = x_4^1 \bar{x}_4^2 \bar{y}_4^1 \bar{y}_4^2.$$

В дальнейшем (для краткости) в логических формулах переменные x, y с отрицанием исключим, тогда:

$$e(b_4^1) = x_4^1 h_1,$$

где h_1 — переменная связи элемента b_4^1 и соседнего с ним ориентированного ребра (c_5^1, c_5^2) стрелки c_5 .

Шаг 2. Построение функции h_1 .

Ребро (c_5^1, c_5^2) стрелки c_5 соответствует прямому направлению от центра стрелки c_5^1 . Заменяем ребро (c_5^1, c_5^2) на функцию разрешения проезда от центра стрелки c_5^1 по прямому направлению (формула (4)): $q(c_5^1, c_5^2) = s_5 z_5^{12}$, тогда:

$$h_1 = s_5 z_5^{12} h_2,$$

где h_2 — переменная связи центра c_5^1 стрелки c_5 с центром стрелки c_3 .

Шаг 3. Построение функции h_2 .

Центр стрелки c_3 соединен с двумя ориентированными ребрами (c_3^2, c_3^1) и (c_3^3, c_3^1) .

По формуле (8): $q(c_3^1) = q(c_3^2, c_3^1) \vee q(c_3^3, c_3^1)$, по формуле (9): $q(c_3^1) = s_3 z_3^{21} \vee \bar{s}_3 z_3^{31}$. В результате имеем:

$$h_2 = s_3 z_3^{21} h_3 \vee \bar{s}_3 z_3^{31} h_4,$$

где h_3 — переменная связи ребра (c_3^2, c_3^1) стрелки c_3 с ребром (c_1^3, c_1^1) стрелки c_1 , h_4 — переменная связи ребра (c_3^3, c_3^1) стрелки c_3 с элементом b_5^2 блок-участка b_5 .

Шаг 4. Построение функции h_3 .

По формуле (7): $q(c_1^3, c_1^1) = \bar{s}_1 z_1^{31}$, тогда:

$$h_3 = \bar{s}_1 z_1^{31} h_5,$$

где h_5 — переменная связи ребра (c_1^3, c_1^1) с элементом b_1^2 блок-участка b_1 .

Шаг 5. Построение функции h_4 .

Блок-участок b_5 является тупиковым участком станции, поэтому элемент b_5^2 является одним из входов рассматриваемой логической схемы, т.е. он может быть началом маршрута. В соответствие с формулой (2) имеем $d(b_5^2) = y_5^2 \bar{x}_5^1 \bar{x}_5^2 \bar{y}_5^1$, тогда:

$$h_4 = y_5^2.$$

Шаг 6. Построение функции h_5 .

Блок-участок b_1 является вход-выходным блок-участком. Он может быть или началом станционного маршрута (элемент b_1^2) или проходным участком (элемент (b_1^1, b_1^2)) при приеме поездов с участка перегона a_1 . Тогда в соответствие с формулами (2) и (3) имеем $d(b_1^2) = y_1^2 \bar{x}_1^1 \bar{x}_1^2 \bar{y}_1^1$, $p(b_1^1, b_1^2) = x_1^1 y_1^2 \bar{x}_1^2 \bar{y}_1^1$, тогда:

$$h_5 = y_1^2 \vee x_1^1 h_6,$$

где h_6 — переменная связи элемента (b_1^1, b_1^2) (блок-участок b_1) и участка перегона a_1 .

Шаг 7. Построение функции h_6 .

Участок перегона a_1 является одним из входов рассматриваемой логической схемы, т.е. он может быть началом маршрута. Тогда в соответствие с формулой (2) имеем

$$h_6 = d(a_1).$$

Шаг 8. Построение функции проходимости $F(b_4^1)$.

Заменяем переменные связи $h_1 - h_6$ их правыми выражениями, получим формулу функции проходимости $F(b_4^1)$:

$$(10) \quad F(b_4^1) = x_4^1 s_5 z_5^{12} (s_3 z_3^{21} \bar{s}_1 z_1^{31} (y_1^2 \vee x_1^1 d(a_1)) \vee \bar{s}_3 z_3^{31} y_5^2).$$

Дизъюнктивная нормальная форма функции $F(b_4^1)$ имеет вид:

$$F(b_4^1) = x_4^1 s_5 z_5^{12} s_3 z_3^{21} \bar{s}_1 z_1^{31} y_1^2 \vee \\ \vee x_4^1 s_5 z_5^{12} s_3 z_3^{21} \bar{s}_1 z_1^{31} x_1^1 y_1^2 d(a_1) \vee x_4^1 s_5 z_5^{12} \bar{s}_3 z_3^{31} y_5^2.$$

Значения переменных x, y, z в формуле (10) соответствуют состоянию «зеленый» светофоров соответствующих блок-участков и стрелок, значения переменных типа s — направлению стрелок.

Каждой конъюнкции ДНФ функции $F(b_4^1)$ соответствует маршрут, оканчивающийся элементом b_4^1 . Для построения маршрутов логические переменные конъюнкций заменяем (в обратном порядке) соответствующими элементами «станционного» графа:

— конъюнкции $(x_4^1 s_5 z_5^{12} s_3 z_3^{21} \bar{s}_1 z_1^{31} y_1^2)$ соответствует маршрут

$$m[b_1^2, b_4^1] = [b_1^2, c_1(\bar{s}), c_3(s), c_5(s), b_4^1];$$

— конъюнкции $(x_4^1 s_5 z_5^{12} s_3 z_3^{21} \bar{s}_1 z_1^{31} x_1^1 y_1^2 d(a_1))$ соответствует маршрут

$$m[a_1, b_4^1] = [a^1, (b_1^1, b_1^2), c_1(\bar{s}), c_3(s), c_5(s), b_4^1];$$

— конъюнкции $(x_4^1 s_5 z_5^{12} \bar{s}_3 z_3^{31} y_5^2)$ соответствует маршрут

$$m[b_5^2, b_4^1] = [b_5^2, c_3(\bar{s}), c_5(s), b_4^1].$$

Такой процедурой находятся все логические функции проходимости модели станции и соответствующие множества маршрутов станции:

$$F(b_1^1), F(b_1^2), F(b_2^1), F(b_2^2), \dots, F(b_n^1), F(b_n^2), \\ M(b_1^1), M(b_1^2), M(b_2^1), M(b_2^2), \dots, M(b_n^1), M(b_n^2).$$

Некоторые свойства функций проходимости:

1) все конъюнкции ДНФ функции $F(b_i^j)$ попарно ортогональны;

2) каждая конъюнкция ДНФ функции $F(b_j^i)$ является логической моделью соответствующего маршрута;

3) количество конъюнкций в ДНФ функции $F(b_j^i)$ равно количеству маршрутов, оканчивающихся элементом b_j^i ;

4) каждая конъюнкция ДНФ функции $F(b_j^i)$ содержит полную информацию о положении стрелок и состояниях светофоров соответствующего маршрута;

5) количество конъюнкций по всем ДНФ функций $F(b_j^i)$, $i = 1, j = 1, \dots, n$, равно количеству потенциально возможных стационарных маршрутов.

О вычислительной сложности процедуры получения функций проходимости.

Можно доказать, что количество конъюнкций функции $F(b_j^i)$, и, следовательно, количество маршрутов, оканчивающихся элементом b_j^i , меньше или равно $2k_j^i$. Здесь k_j^i — количество стрелок в подграфе «станционного» графа, который оканчивается выходным элементом b_j^i , $k_j^i \leq k$ (k — количество стрелок станции). При этом предполагается, что два и более последовательно соединенных блок-участков в рельсовых путях «станционного» графа считаются как один. Количество шагов процедуры — меньше или равно $4k_j^i$.

6. Нахождение альтернативных маршрутов

Для получения множества маршрутов с общим началом b_i^r и общим концом b_j^v достаточно построить по вышерассмотренной процедуре функцию проходимости $F(b_j^v)$ и соответствующее множество маршрутов $M(b_j^v)$.

Множество маршрутов с общим началом b_i^r и общим концом b_j^v обозначим как множество $M(b_i^r, b_j^v)$: $M(b_i^r, b_j^v) \subseteq M(b_j^v)$.

Пример. Построим множество альтернативных маршрутов с общим началом b_2^1 и общим концом b_1^2 по рис. 2.

Шаг 1. Построим функцию проходимости $F(b_1^2)$:

$$F(b_1^2) = f_1(b_2^1, b_3^1, b_2^1) \vee f_2(b_2^1, b_4^1, b_2^1) \vee f_3(b_2^1, b_7^1, b_2^1) \vee \\ \vee f_4(b_3^1, b_1^2) \vee f_5(b_4^1, b_1^2) \vee f_6(b_6^1, b_1^2) \vee f_7(b_7^1, b_1^2).$$

Шаг 2. Функциям проходимости f_1, f_2, f_3 соответствуют альтернативные маршруты

$$m_1[b_2^1, b_3, b_1^2] = [b_2^1, c_2(s), (b_3^2, b_3^1), c_1(s), b_1^2], \\ m_2[b_2^1, b_4, b_1^2] = [b_2^1, c_2(\bar{s}), c_4(s), c_6(s), (b_4^2, b_4^1), c_5(s), c_3(s), c_1(\bar{s}), b_1^2], \\ m_3[b_2^1, b_7, b_1^2] = [b_2^1, c_2(\bar{s}), c_4(s), c_6(\bar{s}), (b_7^2, b_7^1), c_5(\bar{s}), c_3(s), c_1(\bar{s}), b_1^2].$$

7. Жизненный цикл маршрута

Построим модель управления движением поезда по маршруту в виде автоматного графа переходов (рис. 4).

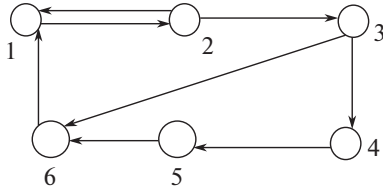


Рис. 4. Типовой жизненный цикл маршрута.

Состояние 1.

Задана модель станции в виде «станционного» графа, а также начало b_i^r и конец b_j^v проектируемого перемещения поезда. Множество действующих маршрутов на момент времени t задано в виде множества функций проходимости $D(t)$: $D(t) = \{d_1, \dots, d_p\}$.

Состояние 2.

Требуется найти во множестве альтернативных маршрутов такой маршрут, который был бы совместим с действующими маршрутами.

Шаг 1. Построение по логической модели станции функции проходимости $F(b_j^v)$.

Шаг 2. Нахождение альтернативных маршрутов.

Из функции $F(b_j^v)$ находим m функций проходимости альтернативных маршрутов:

$$A(b_j^v) = \{f_1(b_i^r, b_j^v), \dots, f_m(b_i^r, b_j^v)\}.$$

Шаг 3. Нахождение маршрута $m = [b_i^r, b_j^v]$, совместимого с действующими маршрутами.

Проверяем на ортогональность каждой функции $f_i \in A(b_j^v)$ с каждой функцией множества $D(t)$, либо вычисляем значение логического произведения функций $f_a d_1 d_2 \dots d_p$, где $a \in \{1, \dots, m\}$.

Если логическое произведение функций $f_a d_1 d_2 \dots d_p \neq 0$, то маршрут $m_a(b_i^r, b_j^v)$ совместим с действующими маршрутами.

Переход из состояния 2 в состояние 1 происходит в случае отсутствия маршрута, совместимого с действующими маршрутами, иначе — переход в состояние 3.

Состояние 3.

Сборка маршрута $m_a(b_i^r, b_j^v)$, совместимого с действующими маршрутами.

По функции проходимости f_a маршрута $m_a(b_i^r, b_j^v)$ система управления движением поездов выдает управляющие воздействия:

— набор управляющих воздействий X, Y на установку входных-выходных светофоров блок-участков маршрута в соответствующие состояния («зеленый» либо «красный»). При этом состояние выходного светофора (состояние разрешения движения поезда) начального блок-участка b_i^r должно сохраняться «красным» ($y(b_i^r) = 0$);

— набор Z управляющих воздействий на установку входных светофоров стрелок маршрута в соответствующие состояния;

— набор S управляющих воздействий на установку стрелок маршрута в соответствующие направления (прямое либо боковое).

После установки светофоров и стрелок в соответствующие состояния $(X^\circ, Y^\circ, Z^\circ, S^\circ)$ проверяются равенства: $X^\circ = X$, $Y^\circ = Y$, $Z^\circ = Z$, $S^\circ = S$. В случае хотя бы одного неравенства (состояние, хотя бы одного светофора или стрелки, не соответствует заданному) происходит переход в состояние б графа переходов. Иначе маршрут $m_a(b_i^r, b_j^v)$ считается собранным и помещается в множество действующих маршрутов: $D(t + 1) = D(t) \cup \{f_a\}$.

Переход в состояние 4.

Состояние 4.

Система управления или станционный диспетчер разрешают движения поезду: $y(b_i^r) = 1$.

Переход в состояние 5.

Состояние 5.

Движение поезда по маршруту.

Каждый блок-участок и каждая стрелка имеют автоблокировку, т.е. при пересечении поезда границы i -го блок-участка (или стрелки) его входные светофоры устанавливаются в состояние «красный».

Поезд находится на конечном блок-участке b_j^v , если вследствие автоблокировки $x(b_j^v) = 0$, то осуществляется переход в состояние 6.

Состояние 6.

Разборка маршрута.

Система управления движением поездов выдает управляющие воздействия на установку входных-выходных светофоров блок-участков и стрелок маршрута $m_a(b_i^r, b_j^v)$ в состояние «красный».

Из множества $D(t + 1)$ действующих маршрутов исключается маршрут $m_a(b_i^r, b_j^v)$:

$$D(t + 2) = D(t + 1) \setminus \{f_a\}.$$

Переход в состояние 1.

8. Заключение

1. Показано использование методов математической логики при проектировании системы управления групповым движением поездов железнодорожной станции.

2. Разработан типовой жизненный цикл маршрута (проектирование маршрута, сборка, контроль движения поезда по маршруту, разборка маршрута), гарантирующий безопасное групповое движение поездов.

3. На этапе проектирования маршрута разработаны модель маршрута в виде логической функции проходимости, модель железнодорожной станции в виде логической схемы. На основе этих моделей определяются состояния

стрелочных переводов, светофоров маршрута, а также отношения между маршрутами (совместимые, несовместимые).

4. Разработана процедура получения множества потенциально возможных станционных маршрутов, множества альтернативных маршрутов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев С.Н.* От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Изв. АН. Теория и системы управления. 2001. № 1. С. 5–22. № 2. С. 5–21.
2. *Амбарцумян А.А., Потехин А.И.* Событийное логическое управление производственными процессами поточного типа. М.: ИПУ РАН, 2006.
3. *Кузнецов С.К., Потехин А.И.* Современные системы поддержки принятия решений железнодорожным диспетчером // Проблемы управления. 2017. № 1. С. 1–14.
4. *Потехин А.И.* Логические модели объектов железнодорожной станции // Проблемы управления. 2016. № 5. С. 71–79.
5. *Закревский А.Д., Поттосин Ю.В., Черемисинова Л.Д.* Логические основы проектирования дискретных устройств. М.: Изд-во физмат. лит-ры, 2007. 590 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Лазаревым.

Поступила в редакцию 17.09.2018

После доработки 15.10.2019

Принята к публикации 28.11.2019