

УДК: 334.71: 656: 338.245

Применение сетей Петри при управлении движением

- Дзуба Ю.В.** Руководитель Центра стратегического анализа и развития, АО «НИИАС», E-mail: u.dzuba@vniias.ru, Москва, Россия
- Павловский А. А.** Заместитель Генерального директора, АО «НИИАС», E-mail: A.Pavlovskiy@vniias.ru, Москва, Россия
- Аннотация.** В статье анализируется управление транспортом на основе метода сетей Петри. Раскрывается содержание сетей Петри с позиций моделирования и управления. Показано, что сети Петри можно применять при управлении дискретными объектами. такими объектами являются объекты железнодорожного транспорта, в частности поезда. Показано различие между последовательным управлением и параллельным управлением. Статья доказывает, что сети Петри можно использовать при многоцелевом управлении транспортом и транспортной инфраструктурой. Приведено практическое моделирование ситуации приема поезда на станционный путь и моделирование параллельного движения поездов. Алгоритмы на основе сети Петри можно использовать в автоматизированных и кибер-физических системах.
- Ключевые слова:** транспорт, управление, сети Петри, ситуационное управление, многоцелевое управление, параллельное движение.

Application of Petri nets in control of mobile objects

- Dzuba Yu.V.** Head of Strategic analysis and development center, JSC «NIIAS», E-mail: u.dzuba@vniias.ru, Moscow, Russia
- Pavlovskiy A.A.** Deputy Director, JSC «NIIAS», E-mail: A.Pavlovskiy@vniias.ru, Moscow, Russia
- Annotation.** In article is discussed The article analyses transportation management system using Petri net method. The content of Petri net is observed from the modelling and management perspectives. It is shown that Petri net can be used for discrete objects management. Such objects include rail transport facilities in particular , trains. The article shows the difference between sequence-type and parallel control. It is proved that Petri nets can be used for transportation and transport infrastructure management. The article demonstrates practical situation modelling of train acceptance on inbound yard track and modelling of parallel train traffic. Algorithm on Petri net basis can be used in automated systems and cyber-physical systems.
- Keywords:** transport, management, Petri net, situation modelling, multipurpose management, parallel traffic.

Введение.

Теория сетей Петри первоначально использовалась для управления дискретными информационными процессами [1, 2]. Как показал опыт развития логистики [3], в современном управлении движением информационные потоки и материальные потоки тесно связаны. Это делает возможным междисциплинарный перенос методов информационного управления на методы управления материальными потоками или дискретными объектами. Такие дискретные

объекты широко представлены на железных дорогах, что дает возможность применять сети Петри для моделирования ситуаций на железных дорогах [4, 5]. В работе [4] рассмотрено применение сетей Петри для управления дискретными потоками транспортных объектов. В работе [5] рассмотрен пример применения сетей Петри для управления информационными потоками (документооборот) для последующего применения в управлении дискретными потоками. Каждый поезд можно рассматривать как дискретный объект. Теория сетей Петри делает возможным моделирование управляемого объекта или потока графическим и аналитическим представлением в виде сети. Это особенно удобно для сетевых объектов, к числу которых принадлежит транспортная сеть. Теория сетей Петри представляет собой механизм графической формализации процесса моделирования дискретных процессов. Сети Петри впервые описаны Карлом Петри в 1962 году [6]. Они связаны со взаимодействием событий в параллельных асинхронных дискретных системах, которые имеют сложную динамическую структуру.

Применение сетей Петри возможно для систем разного уровня сложности, например для информационных процессов, включая информационные взаимодействия. Информационные взаимодействия [7] описываются просто, если указывать не непосредственные связи между событиями, а те информационные ситуации [8, 9], при которых данное событие может реализоваться. Информационные ситуации делятся на локальные и глобальные. Глобальные ситуации в системе формируются с помощью локальных операций, называемых условиями реализации событий. Предусловия события разрешают реализоваться некоторому событию, а реализация события изменяет некоторые условия и создает постусловия события. В этом механизме события взаимодействуют с условиями, а условия взаимодействуют с событиями. Такая простая модель позволяет для решения задач и моделирования представить структуры систем из элементов двух типов – событий и условий. Удобный формальный механизм для этого, предложенный Петри, был развит А. Холтом, который назвал его сетью Петри [10]. В работе [11] сеть Петри связана с тензорным анализом. В данной работе показан более подход применения данного формализма для моделирования дискретных задач.

Формализм сетей Петри.

Будем исходить из того, что данный подход используется для рассуждения [12], анализа и интегрального управления [13]. Этим существенно отличается данный подход от подхода в вычислительной технике, где основная задача – вычисление и синхронизация вычислений. В этой области сеть Петри – параметрическая модель. В области управления транспортом сеть Петри описывает пространственную модель и пространственную информационную ситуацию [14, 15].

Сеть Петри называют граф, имеющий два типа вершин: *позиции* и *переходы*. Можно сказать, что данная модель имеет три типа информационных единиц. [17, 18]. Дуги, выходящие из позиций, могут идти только в переходы, а дуги, выходящие из переходов, могут идти только в позиции. Множество всех позиций сети есть множество $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, а множество всех переходов – множество $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $P \cap T = \emptyset$. Мощность множества $|P| = n$, а мощность множества $|T| = m$. Произвольный элемент P обозначается p_i , $i = 1, \dots, n$, а произвольный элемент T – t_j , $j = 1, \dots, m$.

На графе позиции изображаются кругами, а переходы – линиями. На рисунке 1 приведен пример графического представления сети Петри.

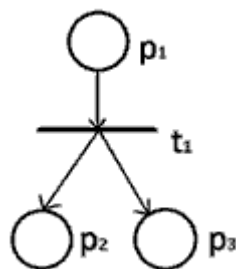


Рисунок 1. Простейшая сеть Петри

У каждого перехода есть входные и выходные позиции. Входными позициями перехода будем называть позиции, ребра из которых ведут в переход, а выходными позициями перехода – позиции, к которым ребра выходят из перехода. Опишем входную функцию $I: T \rightarrow P$, такую что, $p_i \in I(t_j)$, если p_i является входной позицией перехода t_j .

Опишем выходную функцию $O: T \rightarrow P$, такую, что $p_i \in O(t_j)$, если p_i является выходной позицией перехода t_j . Тогда любую сеть Петри можно описать как $S = (P, T, I, O)$, где: P – множество позиций; T – множество переходов; I – множество входных функций; O – множество выходных функций.

В позициях могут находиться маркеры. Состояние, в котором может находиться сеть Петри, называется маркировкой – это присвоение меток позициям сети Петри. На графе сети Петри метки изображаются точкой в кружке, представляющем позицию сети Петри.

Определение. Маркировка определяется как n -вектор $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$, где $n = |P|$, $n \geq 0$, $\mu_i \in \mathbb{N}$, $i = 1, 2, \dots, n$. Вектор μ определяет количество маркеров в p_i -ой позиции. Сеть, в позициях которой есть метки, называется маркированной.

Определение. Маркированная сеть Петри $M = (S, \mu)$ есть совокупность структуры сети Петри $S = (P, T, I, O)$ и маркировки μ и может быть записана в виде $M = (P, T, I, O, \mu)$. Так, для сети Петри на рисунке 2: $\mu = (2, 0, 1)$.

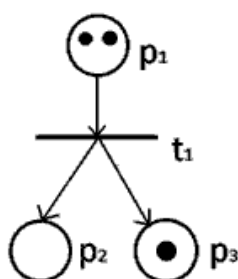


Рисунок 2. Маркированная сеть Петри. Маркировка (2, 0, 1)

Выполнением сети Петри управляют количество и распределение меток в позициях сети. Сеть Петри выполняется за счет срабатывания переходов. Переход может сработать только в том случае, когда он возбужден (разрешен). Переход называется разрешенным, если каждая из его входных позиций имеет число меток, не меньше, чем число дуг из позиции в переход. Кратные метки необходимы для кратных входных дуг. Метки во входных позициях, разрешающие переход, назовем разрешающими метками. Кратные метки создаются для кратных выходных дуг. Переход срабатывает: метки из его входных позиций удаляются, образовывается по одной новой метке для каждой дуги в его выходных позициях. Рассмотрим пример на рисунках 3,4.

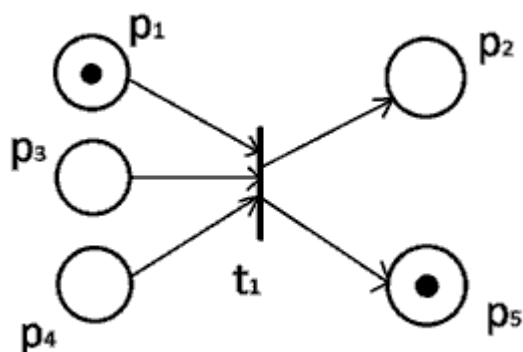


Рисунок 3. Маркированная сеть Петри. Переход t_1 не разрешен

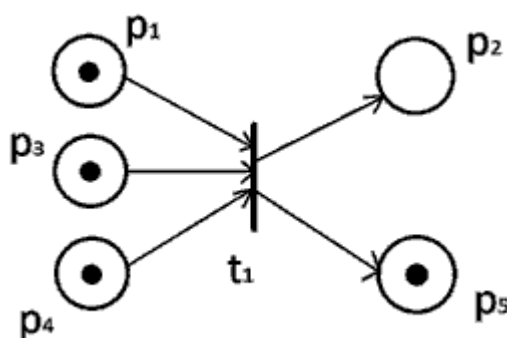


Рисунок 4. Маркированная сеть Петри. Переход t_1 разрешен

Запуск перехода заменяет маркировку μ сети Петри на новую маркировку μ' . При срабатывании перехода количество меток в каждой позиции всегда остается неотрицательным, так как можно запустить только разрешенный переход. Запуск перехода никогда не удалит метку, отсутствующую во входной позиции. Если какая-либо входная позиция перехода не обладает достаточным количеством меток, то переход не разрешен и не сработает. Заметим также, что сеть Петри обладает свойством недетерминированности, т.е. мы не знаем, какой из разрешенных переходов сработает. Срабатывания переходов могут осуществляться до тех пор, пока существует хотя бы один разрешенный переход. Когда не останется ни одного разрешенного перехода, выполнение прекращается.

Рассмотрим маркированную сеть Петри на рисунке 5 для анализа срабатывания переходов. Начальная маркировка $\mu_0 = (1,0,0,1,1,1,0)$. При такой маркировке разрешен только переход t_1 .

Переход t_2 не разрешен, так как ни позиция p_2 , ни позиция p_3 , являющиеся входами перехода t_2 не содержат ни одного маркера. Переход t_3 не разрешен, т.к. входная позиция p_3 не содержит маркера.

Переход t_4 тоже не разрешен, не смотря на то, что обе входные позиции содержат по одной метке – причина в том, что позиция p_5 и переход t_4 соединены двумя дугами, значит, для срабатывания перехода в позиции p_5 должно быть две метки. При срабатывании перехода t_1 получим маркировку $\mu_1 = (0,1,1,2,1,1,0)$ (Рис. 6). Теперь разрешены переходы t_2 и t_3 . Сработать может любой из них, рассмотрим оба варианта.

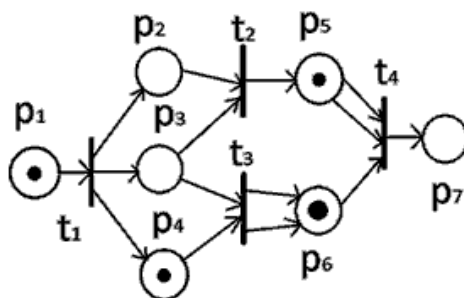


Рисунок 5. Маркированная сеть. Переход t_1 разрешен

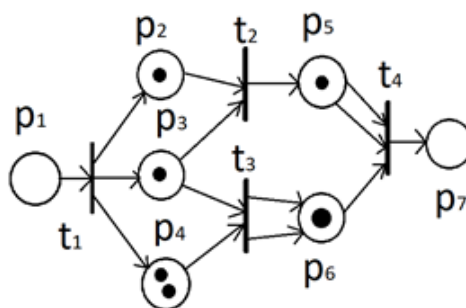


Рисунок 6. Маркированная сеть. Переходы t_2 и t_3 разрешены

Предположим, что сработает переход t_2 , тогда метки из позиций p_2 и p_3 удаляются и добавляется одна метка в выходную позицию p_5 . Полученная маркировка $\mu_2 = (0,0,0,2,2,1,0)$ (Рис. 7).

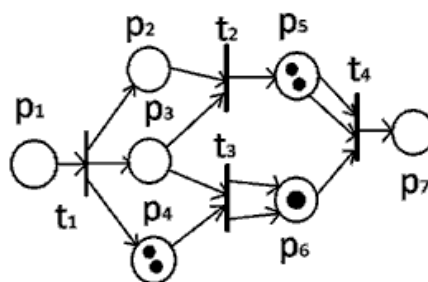


Рисунок 7. Маркированная сеть Петри после срабатывания перехода t_2

Теперь переход t_4 разрешен. Результатом срабатывания перехода t_4 является маркировка $\mu_3 = (0,0,0,2,0,0,1)$ (Рис. 8).

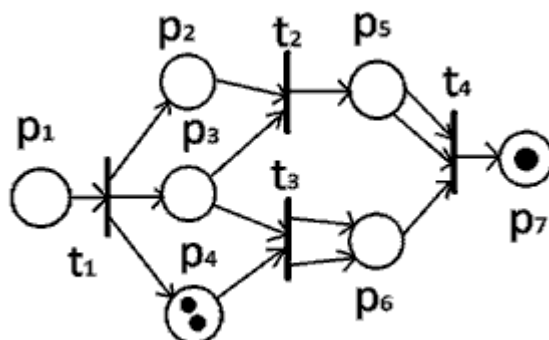


Рисунок 8. Маркированная сеть Петри. Переход от маркировки μ_2 к маркировке μ_3

Предположим, что события сложились иначе, и в маркированной сети Петри на рисунке 6 сработал переход t_3 . Тогда из позиций p_3 и p_4 удалятся по одной метке, а в выходной позиции p_6 появится 2 метки. Полученная маркировка $\mu_4 = (0,1,0,0,1,3,0)$ (Рис. 9).

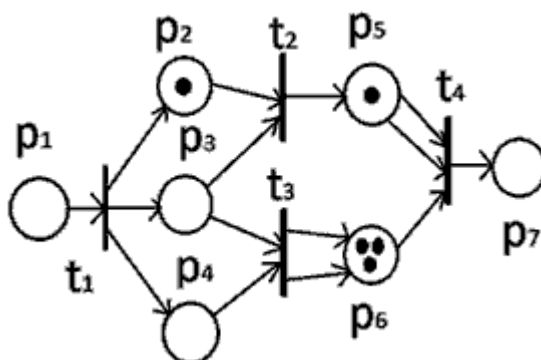


Рисунок 9. Маркированная сеть Петри после срабатывания перехода t_3

Будем считать, что нам повезло, потому что выход t_4 вновь разрешен. После срабатывания перехода t_4 получим маркировку $\mu_5 = (0,1,0,0,0,2,1)$ (Рис. 10).

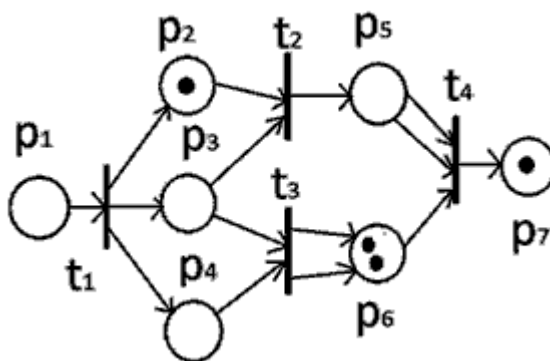


Рисунок 10. Маркированная сеть Петри. Переход от маркировки μ_4 к маркировке μ_5

Состояние сети Петри определяется ее маркировкой. Срабатывание перехода изменяет состояние сети Петри изменяя маркировки сети Петри. Пространство состояний сети Петри, состоящей из n позиций, есть множество всех маркировок, т.е. N^n .

Введем функцию, определяющую изменение в состоянии, вызванное срабатыванием перехода - $b(\mu, t_j)$, которую назовем *функцией следующего состояния*. Когда эта функция применяется к маркировке μ (состоянию) и переходу t_j , она образует новую маркировку (состояние), которая получается при запуске перехода t_j в маркировке μ . Т.к. переход t_j может сработать только когда он разрешен, то функция $b(\mu, t_j)$ не определена, если t_j не разрешен в маркировке μ . Если же переход t_j разрешен, то $b(\mu, t_j) = \mu'$, где μ' - маркировка, полученная в результате удаления меток из входных позиций перехода t_j и добавления меток в выходные позиции перехода t_j .

Пусть некоторый переход в маркировке μ разрешен и, следовательно, может сработать. Результат срабатывания перехода в маркировке μ - новая маркировка μ' . Говорят, что μ' является *непосредственно достижимой* из маркировки μ , если существует переход $t_j \in T$, такой, что $b(\mu, t_j) = \mu'$.

Определение. Для сети Петри $C = (P, T, I, O, \mu)$ маркировка μ' называется непосредственно достижимой из μ , если существует переход $t_j \in T$, такой, что $b(\mu, t_j) = \mu'$. Тогда определим множество всех достижимых маркировок μ' , достижимых из μ .

Определение. Множество достижимости $R(C, \mu)$ для сети Петри $C = (P, T, I, O, \mu)$ есть наименьшее множество маркировок, определенных следующим образом:

$$\mu \in R(C, \mu);$$

Если $\mu' \in R(C, \mu)$ и $\mu'' \in b(\mu', t_j)$ для некоторого $t_j \in T$, то $\mu'' \in R(C, \mu)$.

Рассмотрим сеть Петри $C = (P, T, I, O, \mu_0)$, $\mu_0 = (1, 1, 0, 0)$ (Рис. 11), тогда множество достижимости $R(C, \mu_0)$ включает в себя две маркировки:

$\mu_1 = (0, 1, 1, 0)$ – достигается при срабатывании перехода t_1 ;

$\mu_2 = (0, 0, 0, 1)$ – достигается из маркировки μ_1 путем срабатывания перехода t_2 .

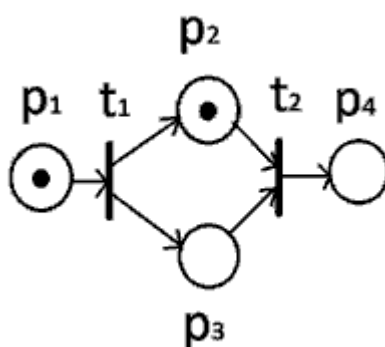


Рисунок 11. Маркированная сеть Петри. Маркировка $\mu_0 = (1,1,0,0)$

Формализация алгоритма моделирования движения железнодорожного транспорта при помощи сетей Петри.

В настоящее время делаются попытки применять механизм Сетей Петри для управления транспортом [18, 19]. По аналогии с работой [19], которая направлена на анализ и управление автотранспорта, можно использовать этот же механизм для железнодорожного транспорта. Постановка задачи такова - алгоритм движения включает три варианта:

- алгоритм обычного последовательного движения;
- алгоритм выполнения маневра перестроения;
- алгоритм выполнения маневра обгона.

Напрашивается простая аналогия с движением поездов или иных средств. Немаркированная вершина - свободный участок пути. Маркированная вершина означает наличие поезда на данном участке. Проведем формализацию алгоритма движения транспорта с применением сетей Петри. Следует начать с определения информационных ситуаций, которые происходят с поездом при подъезде к станции. *Пункт обслуживания*

Рассмотрим фрагмент сети Петри, иллюстрирующий некий пункт обслуживания, начальная маркировка $\mu_0 = (1, 0, 1, 0)$ (Рис. 12). Здесь p_2 – место обслуживания, p_1 – объект обслуживания, а p_3 – сигнал разрешения на обслуживание. Для большей наглядности представим эту сеть как модель поезд — станционный путь.

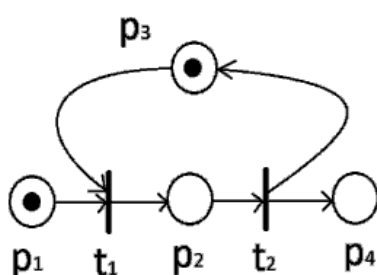


Рисунок 12. 1Фрагмент сети Петри, интерпретирующий некий пункт обслуживания

Обозначим входную позицию p_1 как поезда, пришедшего к станции y : если p_1 помечена — поезд пришел и ждет разрешения войти. Разрешение войти станционный путь, сигнал, что путь свободен — позиция p_3 – если она помечена — вход разрешен. Обе входные позиции перехода t_1 разрешены — поезд перемещается станционный путь — метка перемещается в позицию p_2 , маркировка $\mu_1 = (0, 1, 0, 0)$ (Рис. 13).

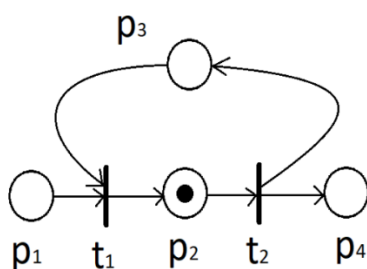
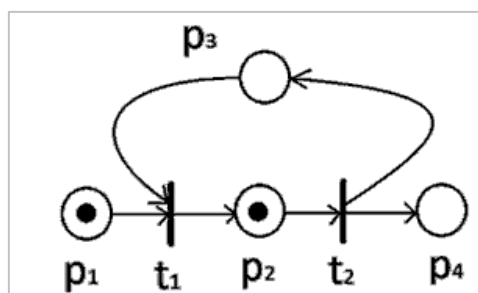
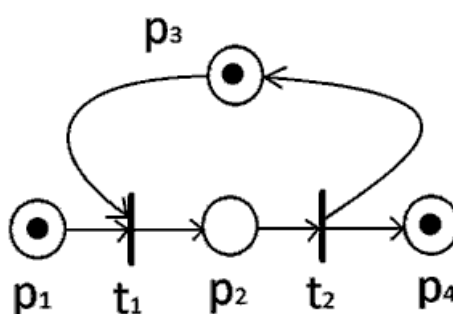


Рисунок 13. 2Фрагмент сети Петри, переход от маркировки μ_0 к маркировке μ_1

Позиция p_2 помечена — поезд на станционном пути. Допустим, что сработал некий переход t_0 , для которого p_1 является выходной позицией, значит в ней появилась метка — пришел новый поезд, маркировка $\mu_3 = (1, 1, 0, 0)$. Но станционный путь не сможет попасть другой поезд, пока не выйдет предыдущий, т.к. вход запрещен - позиция p_3 сможет получить маркер только после срабатывания перехода t_2 (Рис. 14).

Рисунок 14. Фрагмент сети Петри, переход t_1 не разрешен

После срабатывания перехода t_2 метки перемещаются в выходные позиции p_3 и p_4 — поезд вышел, вход на станционный путь снова разрешен, маркировка сети $\mu_4 = (1, 0, 1, 1)$ (Рис. 15).

Рисунок 15. Фрагмент сети Петри, переход от маркировки μ_3 к маркировке μ_4

Рассмотрим следующую интерпретацию. На реальной станции существует несколько параллельных путей, в силу чего ситуация должна быть рассмотрена как возможность параллельных входов выходов.

Параллельный запуск. Сеть Петри на рисунке 16 изображает запуск двух параллельных процессов или движения поездов по параллельным путям. При срабатывании перехода t_1 метки перейдут в позиции p_2 и p_3 — происходит инициализация двух процессов, далее в произвольном порядке будут срабатывать переходы $t_2 - t_{m-1}$. Синхронизация параллельных процессов — срабатывание перехода t_m возможно только тогда, когда оба параллельных процесса завершат свое выполнение — позиции p_{n-2} и p_{n-1} будут помечены (рисунки 17-20).

Синхронизация параллельных процессов означает параллельное согласованное движение поездов по параллельным путям.

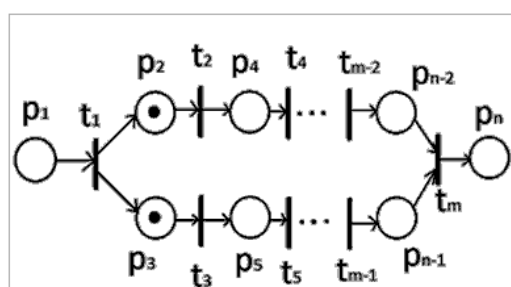


Рисунок 16. 3Фрагмент сети Петри, схема параллельных процессов

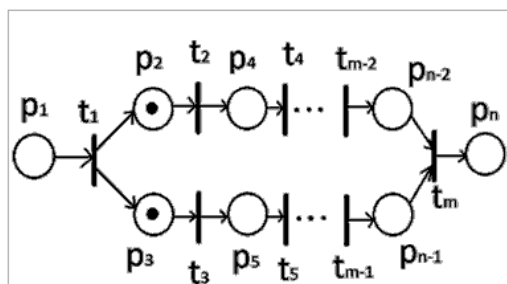


Рисунок 17. Инициализация параллельных процессов

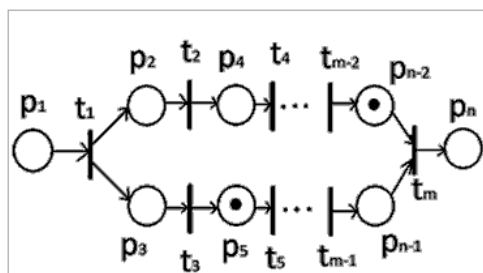


Рисунок 18. Независимое протекание параллельных процессов

Схемы на рис. 16 и рис.17 характеризуют синхронное движение поездов. Схема на рис. 18 характеризует несинхронное движение.

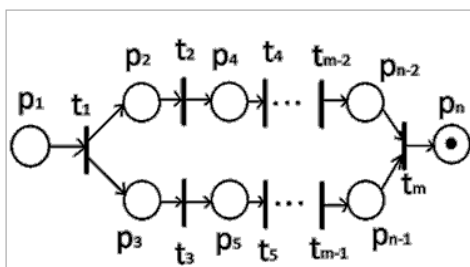


Рисунок 19. Синхронизация параллельных процессов

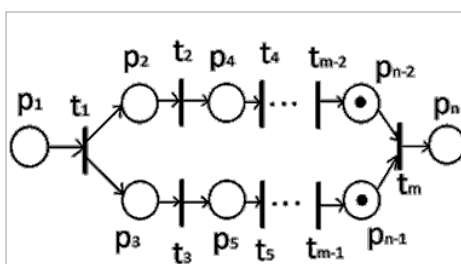


Рисунок 20. Выход из блока параллельных процессов

Схема на рис.19 может характеризовать формирование состава. Схема на рис.20 характеризует завершение формирования состава. Таким образом, сеть Петри позволяет полностью моделировать ситуацию на станционных путях и контролировать ее с помощью эффективного механизма.

Сеть Петри как информационная ситуация.

Автоматизированное и интеллектуальное управление требует создания новых методов и алгоритмов для решения постоянно усложняющихся задач управления. В качестве основы

анализа целесообразно использовать модель информационной ситуации [8, 9], которая фиксирует положение объекта в пространстве и его состояние. Одним из методов описания информационной ситуации является сеть Петри. Общая схема сети Петри отражает ситуацию. Маркировка показывает состояние движения в зоне движения. Элементы сети представляют собой информационные единицы, которые имеют свой язык описания и свой синтаксис.

Сеть Петри позволяет управлять несколькими объектами, в силу чего такая модель управления является многоцелевой моделью [20, 21] управления подвижными объектами. При оптимизации движения на борту подвижного средства важны простые алгоритмы анализа информационной ситуации, состояния и выработки следующего шага управления движением. Такие алгоритмы реализуемы в киберфизических системах [22]. Как модель, сеть Петри отражает состояния и переходы, она отражает только целесущественные воздействия. В этих условиях построение модели перемещения транспортных средств возможно пошаговым методом. Это позволяет относить механизм к дискретным системам управления. В качестве основы анализа такой ситуации и получения пошагового решения движения в транспортной сети [23] можно использовать взвешенные графы. Технически такие решения можно получать с применением искусственных нейронных сетей или интеллектуальных мультиагентных систем. Кроме того, по мере накопления опыта, можно использовать матричные наборы стереотипных решений [24] и тогда полиматрица может давать эффективное решение при многоцелевом управлении. Пока не исследован широкий круг вопросов в этой области. Это требует развития теории многоцелевого управления. Особо важны развития методов, направленных на расширение многоцелевой модели. Требуется развитие теории нелинейных систем с адаптивной перенастройкой алгоритмов в режиме реального времени.

Заключение.

Формализация алгоритма моделирования движения железнодорожного транспорта с помощью сетей Петри позволяет построить программный алгоритм для его обработки как в центре управления, так и на борту подвижного объекта. Это создает возможность управления и контроля движения независимо. Предложенный формальный алгоритм позволяет наглядно представить возможные состояния транспортного средства с помощью сети Петри и разметок. Использование алгоритмов перестроения и обгона в качестве активаторов соответствующих переходов, позволяет полностью определить движение транспортного средства, его пространственную конфигурацию и состояние других участников движения. Недостатком данного варианта моделирования является не учет стохастических воздействий на объект управления. Это является этапом моделирования более высокого уровня.

Список литературы

1. Peterson J. L. Petri nets // Computing Surveys, Vol 9, No. 3, September 1977. - pp.223-252.
2. Ghanem N. et al. Representation and recognition of events in surveillance video using petri nets //Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2004. CVPRW'04. Conference on. – IEEE, 2004. – С. 112-114.
3. Цветков В.Я. Интеллектуализация транспортной логистики // Железнодорожный транспорт -2011. - №4. – С.38-40.
4. Потехин А. И., Браништов С. А., Кузнецов С. К. Дискретно-событийные модели железнодорожной сети //Проблемы управления. – 2014. – №. 1. – С.73-81.

5. Арипов Н. М., Баратов Д. Х. Перспективы развития высокоскоростного движения и вопросы внедрения электронного оборота технической документации на железных дорогах Узбекистана // Инновационный транспорт. – 2016. – №. 2. – С. 10-14.
6. Petri, C. (1962), Kommunikation mit Automaten, PhD thesis, University of Bonn, Germany. (In German).
7. Tsvetkov V. Ya. Information interaction // European Researcher, 2013, Vol.(62), № 11-1 , p.2573- 2577.
8. Павловский А.А., Охотников А. Л. Информационная транспортная ситуация // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 2(6). – С.16-24.
9. Tsvetkov V. Ya. Information Situation and Information Position as a Management Tool // European Researcher, 2012, Vol.(36), № 12-1, p.2166- 2170.
10. Meldman J. A., Holt A. W. Petri nets and legal systems //Jurimetrics journal. – 1971. – С. 65-75.
11. Кулагин В.П., Цветков В.Я. Философия сетей Петри // Российский технологический журнал. - 2014 - № 4 (5) - С.18-38.
12. Ghanem N. et al. Representation and recognition of events in surveillance video using petri nets //Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2004. CVPRW'04. Conference on. – IEEE, 2004. – С. 112-112.
13. Цветков В.Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью // Мир транспорта. - 2013. - № 5 (49). - С.6-9.
14. Павлов А.И. Пространственная информационная ситуация // Славянский форум, 2016. - 4(14). – С.198-203.
15. Павловский А.А., Охотников А. Л. Информационная транспортная ситуация // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 2(6). – С.16-24.
16. Tsvetkov V. Ya. Information Units as the Elements of Complex Models // Nanotechnology Research and Practice, 2014, Vol.(1), № 1. p57-64.
17. Ozhereleva T. A. Systematics for information units // European Researcher, 2014, Vol.(86), № 11/1, pp. 1894-1900.
18. Ершов Н. М. Задача распределения нагрузки при параллельной реализации расширенных сетей Петри в задаче микроскопического моделирования дорожного движения //Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров. – 2014. – С. 66-70.
19. Парамонов А. М., Томашевский В. Н. Формализация алгоритма моделирования движения автомобильного дорожного транспорта. // Вісник НТУУ «КПІ» Інформатика, управління та обчислювальна техніка – 2008.- №48 . - С.7-12.
20. Tsvetkov V. Ya. Multipurpose Management// European Journal of Economic Studies 2012, Vol.(2), № 2 p.140-143.
21. Дзюба Ю.В. Многоцелевое управление подвижными объектами // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 1(9). – С.53 -60.
22. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Киберфизические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. - 2018. Т. 16. № 2 (75). - С. 138-145.
23. Дышленко С.Г. Модели построения маршрутов в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 4(8). – С.48 -56.
24. Цветков В. Я., Дзюба Ю. В. Стереотипное управление // Государственный советник. – 2018. - №2. – С.34-38.