

# Имитационное моделирование дорожного трафика с помощью сетей Петри

И. В. Мартынова<sup>1,a</sup>, Н. М. Ершов<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ ВО Московской области "Университет "Дубна"  
141980, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, 19

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет ВМК  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 52

E-mail: <sup>a</sup> armantic17@gmail.com, <sup>b</sup> ershov@cs.msu.ru

Работа посвящена проблеме построения низкоуровневых моделей дорожного трафика на основе расширенных сетей Петри. Актуальность предлагаемого подхода к моделированию движения городского трафика заключается в том, что в последнее время наблюдается значительный рост интереса к низкоуровневому моделированию разнообразных систем. Этот интерес, не в последнюю очередь, обусловлен широким развитием высокопроизводительных систем для массивных параллельных вычислений. Сети Петри, обладают значительным внутренним параллелизмом, что и делает их перспективными с точки зрения реализации на современных многопроцессорных вычислительных системах с использованием практически любой технологии параллельного программирования.

В работе рассматриваются принципы построения моделей дорожных систем на основе сетей Петри. Анализируется проблема преобразования исходной графовой схемы дорожной системы в соответствующую ей сеть Петри. Предлагается алгоритм такого автоматического преобразования. Рассматриваются несколько подходов к обработке конфликтных ситуаций, которые должны разрешаться на основе тех или иных правил дорожного движения. Нетривиальной задачей для моделирования дорожного трафика является построение самой сети Петри, так как даже для небольших фрагментов дорожных схем такого рода сети будут состоять из большого числа элементов (мест и переходов). Это делает невозможным построение сетей Петри вручную, требуется некоторая автоматизация данного процесса. Под автоматизацией понимается решение проблемы классификации переходов, от которой зависит движение объектов в модели. В данной работе рассматривается один из подходов к решению такой задачи. Исходными данными для алгоритма преобразования является описание схемы дорожного движения в виде ориентированного графа. Алгоритм выполняет нормализацию этой схемы и обрабатывает все конфликтные ситуации. Выходом алгоритма является искомая сеть Петри.

В качестве примера приложения разработанной программной системы проводится численное исследование пропускной способности нескольких стандартных типов дорожных развязок (перекрестков) в зависимости от частоты появления машин на их входах. Также в работе рассматриваются вопросы параллельной крупноблочной реализации построенной модели на основе технологии MPI.

Ключевые слова: имитационное моделирование, сети Петри, транспортные модели, параллельные вычисления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-07-00628 А).

© 2016 Ирина Викторовна Мартынова, Николай Михайлович Ершов

## Введение

Рассматривается следующая имитационная модель дорожного движения [Hoogendoorn, Bovy, 2001]. Предполагается, что схема движения транспорта представляет собой набор линейных участков дорог (с односторонним и однополосным движением), каждый участок характеризуется максимально возможной скоростью движения машин. Точками соединения различных дорог являются узлы–перекрестки.

Отличительным свойством рассматриваемой модели является поддержка ею не только качественного, но и количественного описания поведения различных конфигураций. В частности, речь идет о скоростных и временных характеристиках дорожного движения. Модель поддерживает реальную геометрию той местности, в которой осуществляется движение транспорта.

Предполагается, что схема дорожного движения представляет собой набор дорог. Каждая дорога представляет собой некоторую кривую (известно ее расположение на местности), которая делится на несколько участков с фиксированной максимально разрешенной скоростью движения транспорта. Точки соединения нескольких дорог будем называть узлами (перекрестками).

Заданная схема движения преобразуется в сеть Петри [Dotoli, Fanti, 2006]. Для этого каждый линейный участок дороги делится на короткие сегменты (примерно по три метра, предполагается, что на каждом сегменте может располагаться не более одной машины), каждому сегменту ставится в соответствие свое место сети Петри. Машины в такой модели представляются метками, таким образом, любое место содержит не более одной метки, т. е. сеть Петри является безопасной. За логику движения машин отвечают переходы, которые в предлагаемой модели могут быть нескольких типов: переходы-источники, переходы-развилки, переходы-стоки, простые переходы.

## Задача построения сети Петри

Предполагается, что исходная схема дорожного движения задана в виде ориентированного графа, дуги которого соответствуют прямолинейным участкам дорог. Этот граф привязан к некоторой системе координат, все вершины в нем имеют свои соответствующие координаты. Для введения определенного представления входных данных, рассмотрим простейший пример участка дорожной системы (рис. 1-а).

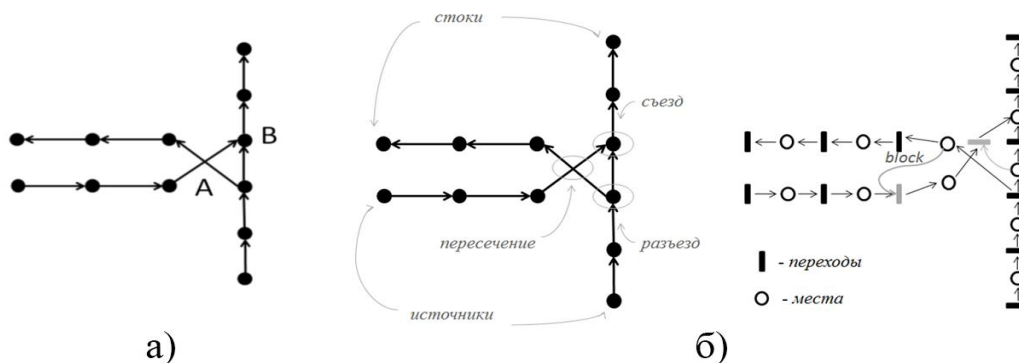


Рис. 1. Преобразование исходной модели (а) в сеть Петри (б)

Задача заключается в автоматическом преобразовании графового описания в описание сети Петри [Питерсон, 1984]. При этом основной проблемой такого преобразования является обработка различных конфликтных мест в рассматриваемой дорожной системе. Некоторое место будем называть конфликтным, если оно является частью сразу двух траекторий движения

транспорта, т.е. появление машины в таком месте с одной траектории блокирует появление машин с других траекторий.

Таким образом, требуется обнаружить все конфликтные места в заданной графовой схеме и корректно преобразовать их во фрагменты сети Петри с учетом приоритетности движения. Приоритеты определяются либо явным образом – одна траектория соответствует главной дороге, другая второстепенной, либо неявным, когда обе траектории являются равнозначными (при движении транспорта действует правило «помеха справа»).

Преобразование исходного графа в сеть Петри состоит из нескольких этапов (рис. 1-б). Первый этап – поиск пересечений ребер графа и их обработка. Поиск пересечений осуществляется двумя способами: с помощью векторного произведения (реальные пересечения траекторий) и на основе вычисления близости ребер. Второй этап включает диагностирование всех узлов исходного графа. Каждая вершина относится к одному из четырех типов: источник, сток, съезд, разъезд. Также определяются блокирующие узлы, с помощью которых можно установить блокировку на вершинах второстепенной дороги. Это позволит при моделировании приостановить движение транспорта на второстепенной дороге, пока все машины, находящиеся в окрестности узла слияния на главной дороге, не пройдут через данный узел.

## Численный эксперимент

На основе приведенных выше входных данных было построено несколько моделей стандартных перекрестков (рис. 2).

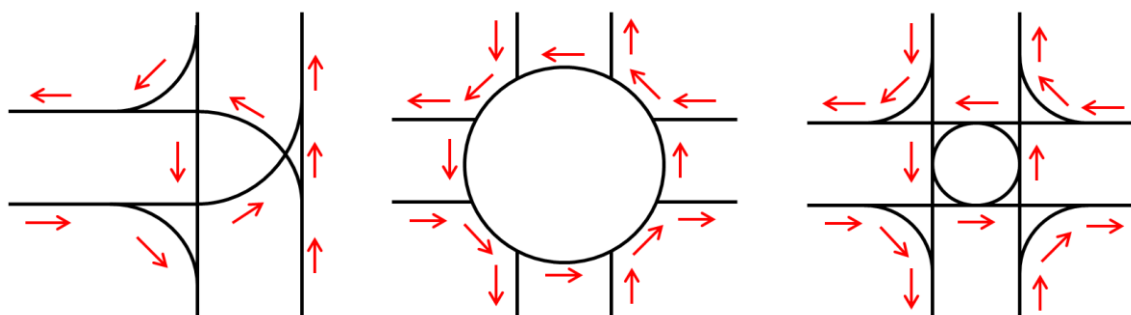


Рис. 2. Схемы стандартных перекрестков

Было проведено моделирование и численное исследование перекрестка с круговым движением. Пусть  $f_1$  и  $f_2$  – частоты появления машин на въездах, располагающихся на вертикальных и горизонтальных линиях соответственно. Для данной модели имеем два варианта распределения приоритетов: приоритет имеет движение на кольце (современный подход) или приоритет определен на въездах. Требуется провести анализ изменения средней скорости всех машин и пропускной способности данной круговой развязки при изменении частот  $f_1$  и  $f_2$ . Пусть частота  $f_1$  фиксирована ( $f_1 = 2$ ), а частота  $f_2$  изменяется. Результаты моделирования при таких параметрах приведены на рисунках 3 и 4.

На рисунке 3 показана зависимость средней скорости машин (проехавших развязку) от частоты  $f_2$ . Видно, что графики немного отличаются друг от друга. В случае, когда главной дорогой считается кольцо, средняя скорость машин равномерно снижается. В ситуации, когда преимущество определено на въездах, происходят скачки скорости. Наличие скачков характеризует возникновение перегрузок на каких-либо участках системы. Это подтверждается графиком, представленным на рисунке 4. Из него можно сделать вывод, что на перекрестке с приоритетом на въездах на кольцо при частоте  $f_2 \approx 2.5$  возникает пробка, так как резко сокращается число машин, проехавших данный перекресток. Фактически происходит полная остановка

движения. При этом в модели с приоритетом на кольце движение не прекращается даже при больших значениях частоты  $f_2$ .

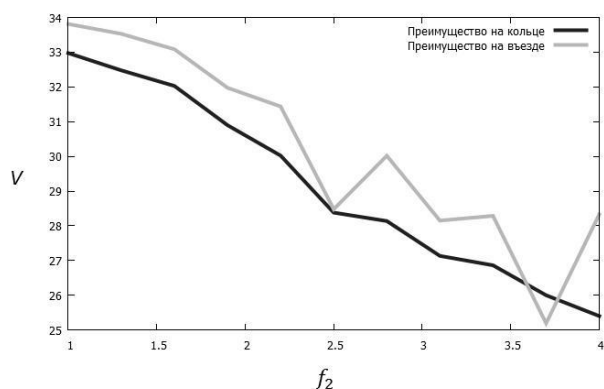


Рис. 3. Зависимость средней скорости проехавших машин от частоты  $f_2$

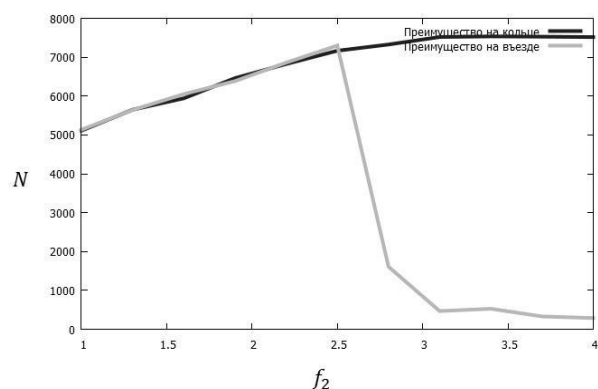


Рис. 4. Зависимость количества проехавших машин от частоты  $f_2$

## Параллельная реализация модели

Была рассмотрена схема крупноблочного распараллеливания предложенной модели, когда вся сеть делится на фрагменты (число которых определяется числом имеющихся процессоров). Предлагается следующая схема разделения сети: каждый переход сети оказывается принадлежащим ровно одной подсети; если входной и выходной переходы данного места принадлежат одной подсети, то это место помещается в эту же подсеть, в противном случае, данное место дублируется в каждой из двух соответствующих подсетей. Каждый процессор получает только свою часть общей сети Петри и детальный план синхронизации со своими соседями. Все планы синхронизации составляются таким образом, чтобы гарантировать бесконфликтное взаимодействие процессоров системы. Проблемным местом в такой схеме оказывается разделение сети Петри на заданное число частей, которое сводится к задаче поиска оптимального разбиения графа сети на несколько подграфов одинакового размера с минимизацией числа разрезаемых ребер. Эта оптимизационная задача решается с помощью иерархического подхода к выравниванию нагрузки [Ершов, 2014].

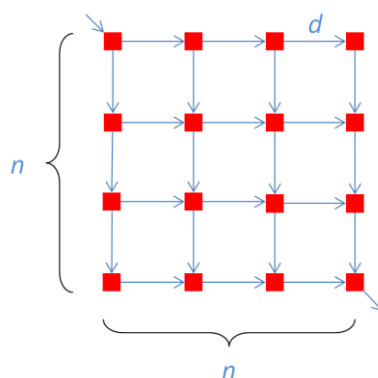


Рис. 5. Схема дорожного движения для тестирования параллельной реализации модели

Численное исследование эффективности распараллеливания модели проводилось на квадратной схеме с односторонним движением (рисунок 5). На рисунке 6 показаны зависимости времени расчетов и достигнутого при этом ускорения при параллельной реализации сети Петри

с числом переходов, равным 33580. Исследования проводились на системе Intel Core i7-3630QM @ 240GHz.

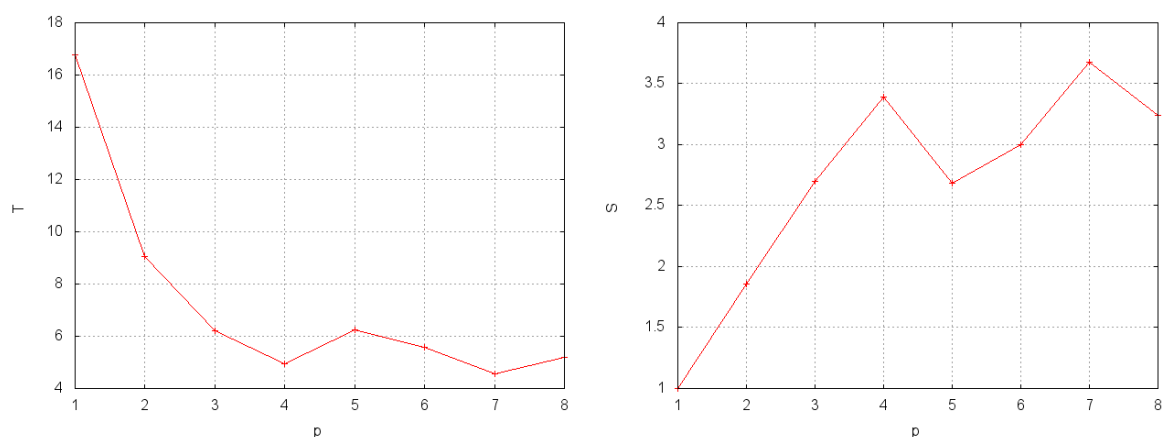


Рис. 6. Зависимость времени  $T$  и ускорения  $S$  от числа процессов  $p$  при фиксированном размере сети Петри (33580 переходов)

## Заключение

В результате проведенных исследований были решены следующие задачи:

- разработан формат описания схемы дорожного движения;
- реализованы алгоритмы поиска пересечений, сравнительный анализ которых показал, что эффективным является метод, основанный на вычислении близости дорог;
- разработан комплекс программ на языке Python для автоматического преобразования заданной графовой схемы описания дорожной системы в расширенную сеть Петри;
- проведено численное исследование модели для нескольких стандартных типов перекрестков, в том числе перекрестков с круговым движением.
- рассмотрены вопросы крупноблочной параллельной реализации модели на основе технологии параллельного программирования MPI.

В дальнейшем предполагается расширить входное описание дорожной сети, которое позволит учитывать такие объекты, как парковки, светофоры, пешеходные переходы и т. д. Также планируется расширить модель для учета многополосного движения.

## Список литературы

- Dotoli M., Fanti M.* An urban traffic network model via coloured timed Petri nets // Control Engineering Practice. — 2006. — Vol. 14, Issue 10. — P. 1213-1229.
- Hoogendoorn S.P., Bovy P.H.L.* State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling // J. Syst. Cont. Eng. — 2001. — Vol. 215, Issue 4. — P. 283-303.
- Ершов Н.М.* Задача распределения нагрузки при параллельной реализации расширенных сетей Петри в задаче микроскопического моделирования дорожного движения // Научный сервис в сети Интернет: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (22-27 сентября 2014 г., г. Новороссийск). — 2014. — С. 66–70.
- Ershov N.* Zadacha raspredeleniya nagruzki pri paralelnoy realizacii rasshirenykh setey Petri v zadache mikroskopicheskogo modelirovaniya dorozhnogo dvizhenia [Balancing of extended Petri nets for parallel realization in the traffic simulation problem] // Naucnyj servis v seti Internet: Trudy Mezhdunarodnoy superkomputernoy konferencii (22-27 sentyabrya 2014 g., g. Novorossiysk). — 2014. — P. 66-70 (in Russian).
- Петерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем. — М.: Мир. 1984.
- Peterson J.* Teorya setey Petri i modelirovanie system [Petri net theory and the modeling of systems]//М.: “Mir”, 1984 (in Russian).

# City traffic simulation by extended Petri nets

I. V. Martynova<sup>1,a</sup>, N. M. Ershov<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup> Moscow Region State Educational Institution for higher professional education University “Dubna”  
19, Universitetskaya str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics  
1-52, Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup> armantic17@gmail.com, <sup>b</sup> ershov@cs.msu.ru

The present work is devoted to the construction of low-level models of city traffic based on extended Petri nets. The relevance of the proposed approach to the modeling of urban traffic movement in particular is determined by extensive development of high-performance systems for massively parallel computing. Petri nets have significant internal parallelism, which makes them promising object for implementation on modern multiprocessor computer systems using any parallel programming technology.

The paper describes the principles of construction of the city traffic models based on Petri nets. We analyze the problem of conversion of the original graph scheme of the road system to corresponding Petri net. The algorithm of the automatic conversion is suggested. We consider several approaches to handling conflicts that must be resolved on the basis of certain traffic laws. Nontrivial problem with microscopic traffic simulation is building of the Petri net model, as even for small fragments of roads such Petri nets will consist of a very large number of items (places and transitions). This makes it impossible to construct Petri nets by hand. We need some kind of the automation of this process. In this paper we consider one approach to solving this problem. Initial data for the conversion algorithm is graph description of the given traffic scheme. The algorithm performs normalization of the scheme and handles all conflict situations. The output of the algorithm is desired Petri net.

As an example of the developed application we consider a numerical study of the capacity of several standard types of road junctions (intersections) depending on the frequency of vehicles on their inputs. Also we describe our approach to coarse-grained parallel implementation of Petri net model using MPI technology.

Keywords: simulation, Petri nets, traffic modeling, parallel computing

The work was supported by Russian Foundation for Basic Research (RFBR Project 14-07-00628)

© 2016 Irina V. Martynova, Nikolay M. Ershov