

УДК 519.673, 004.414.23

И. В. Мартынова, Н. М. Ершов

Имитационное моделирование дорожного трафика с помощью сетей Петри

Рассматриваются вопросы автоматического построения сетей Петри в задаче моделирования транспортных потоков, основные аспекты моделирования дорожного трафика, проводится анализ изменений параметров транспортного потока под воздействием различных факторов. За основу представления трафика была взята микроскопическая модель, т.к. она учитывает особенности и характеристики транспортных средств, что позволяет более точно описать движение объектов в дорожной системе.

Ключевые слова: автоматическое преобразование, сеть Петри, низкоуровневое моделирование, транспортный поток, модели перекрестков, дорожная сеть.

Об авторах

Ершов Николай Михайлович — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Государственного университета «Дубна», старший научный сотрудник факультета ВМК МГУ им. Ломоносова.

Мартынова Ирина Викторовна — студент-магистр кафедры прикладной математики и информатики Государственного университета «Дубна».

Настоящая работа посвящена задаче микроскопического моделирования городского дорожного движения транспорта [4]. Инструментом моделирования были выбраны сети Петри — классическое средство низкоуровневого моделирования распределенных систем [1—3]. Актуальность микроскопического подхода [5] к моделированию дорожного трафика не в последнюю очередь связана с широким развитием параллельных систем программирования. Нетривиальной задачей при таком моделировании является построение самой сети Петри, потому что 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 этого процесса. В данной работе рассматривается один из подходов к решению такой задачи.

Модель дорожного движения на основе сети Петри

Рассматривается следующая имитационная модель дорожного движения. Предпо-

лагается, 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.

Заданная схема движения преобразуется в сеть Петри. 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 в 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 (рис. 1).

Например, переходы-источники обеспечивают поступление новых машин в систему. Переходы-стоки служат для удаления машин из системы. Простые переходы выполняют перемещение машин из входного места в выходное место. Переходы-развилки перемещают случайным образом машины в

одно из своих выходных мест. Для реализации правил типа «уступи дорогу» в модель вводятся специальные блокирующие (ингибиторные) дуги.

После перемещения машины в новое место она на некоторое время (определяемое

длиной соответствующего сегмента дороги и скоростью движения машины) становится неактивной для последующего переноса. Такой прием позволяет моделировать движение транспорта с заданным скоростным режимом.

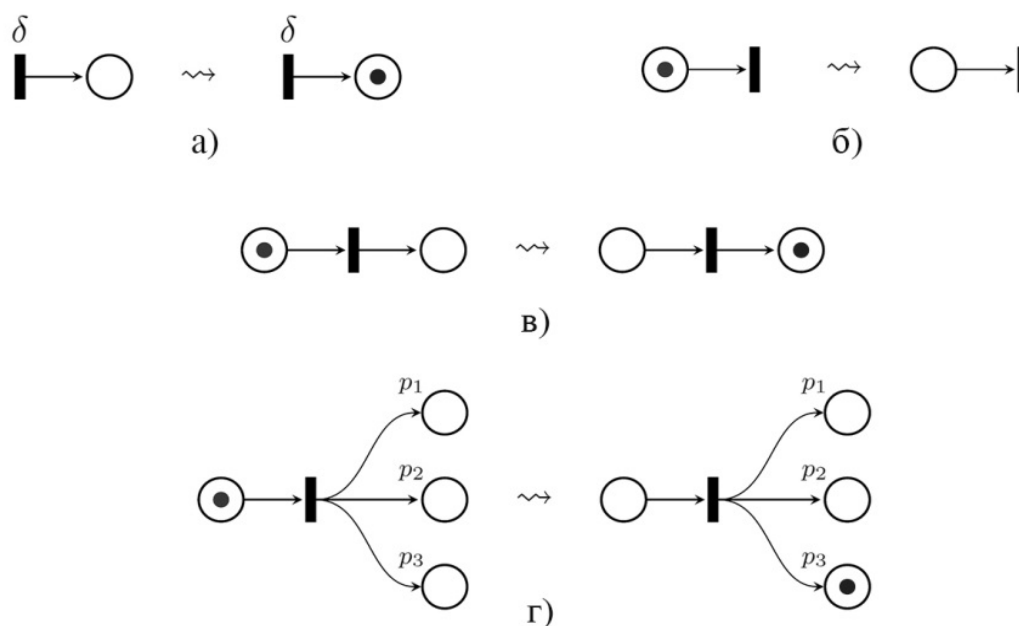


Рис. 1. Различные типы переходов: а) источник; б) сток; в) простой; г) развилка

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. 2).

Вся информация о графе дорожной системы хранится в отдельном файле в формате *JSON*.

Задача заключается в автоматическом преобразовании такого графового описания в описание сети Петри. При этом основной проблемой такого преобразования является обработка различных конфликтных мест в рассматриваемой дорожной системе. Некоторое место (участок дороги) будем называть конфликтным, если оно является частью сразу двух (или более) траекторий

движения транспорта, т.е. появление машины в таком месте с одной траектории блокирует появление машин с других траекторий. На рис. 2 таких конфликтных мест два. Одно из них (А) находится на пересечении двух траекторий, второе (В) — в точке слияния двух траекторий. Таким образом, требуется обнаружить все конфликтные места в заданной графовой схеме и корректно преобразовать их в фрагменты сети Петри с учетом приоритетности движения по каждой из траекторий, участвующих в данном конфликте. Сам приоритет определяется либо явным образом — одна траектория соответствует главной дороге, другая второстепенной, либо неявным, когда обе траектории являются равнозначными. В последнем случае применяется правило «уступи дорогу помехе справа», больший приоритет получает траектория, для которой другая траектория оказывается слева (с учетом направления движения).

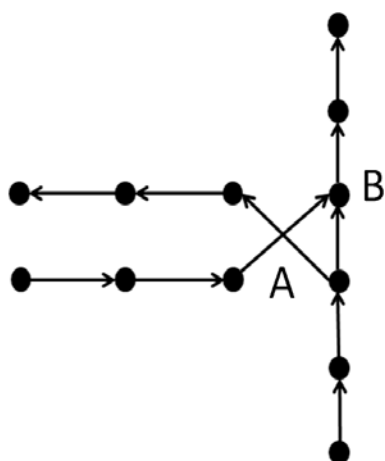


Рис. 2. Входное описание дорожной сети

Преобразование графовой модели в сеть Петри

Преобразование исходного графа в сеть Петри состоит из нескольких этапов. Первый этап — поиск пересечений ребер

графа и их обработка. Поиск пересечений осуществляется двумя способами: с помощью векторного произведения (настоящие пересечения) и с помощью вычисления близости ребер. Векторное произведение позволяет найти знаки относительно каждой дуги, участвующей в конкретном пересечении. Ребра образуют пересечение в том случае, когда знаки разные. Определение близости дорог включает в себя поиск дуг, расстояние между центрами которых меньше расстояния полсуммы их длин. Суть этого способа состоит в том, что помимо пересекающихся векторов пересекающимися будут являться и те, которые располагаются близко друг к другу (т.е. наличие машины на одном ребре запрещает появление машины на близком к нему ребре). Это позволит правильно смоделировать движение машин не только на перекрестках, но и на участках, где происходит слияние дорог.

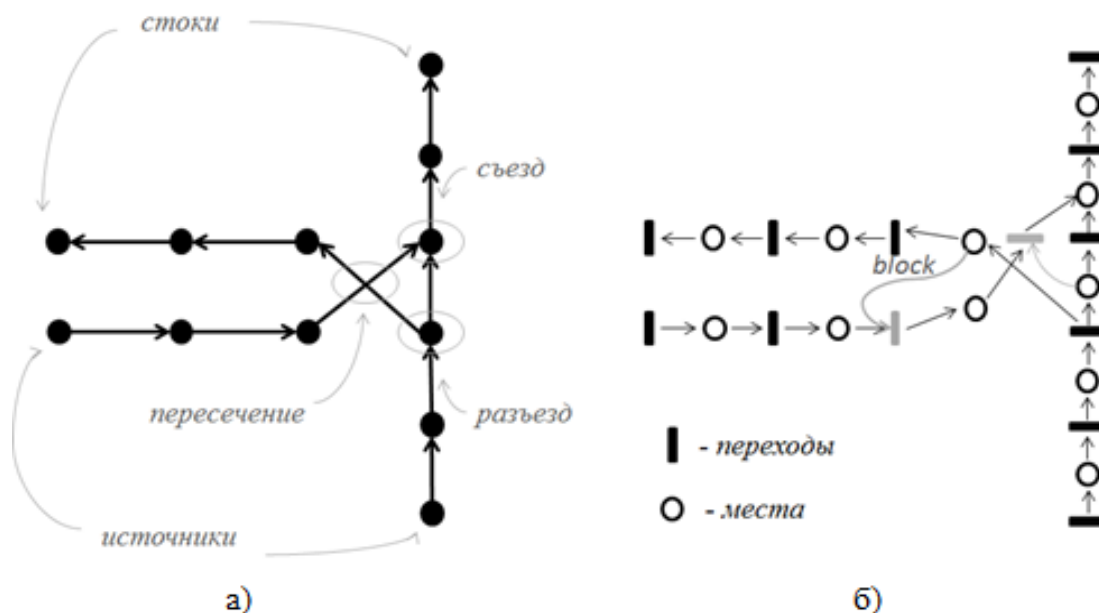


Рисунок 3. Преобразование модели в сеть Петри:

а) исходный граф; б) сеть Петри

Второй этап включает диагностирование всех узлов исходного графа. Каждая вершина относится к одному из четырех типов: источник, сток, съезд, разъезд (рис. 3а). Также определяются блокирующие узлы. Они необходимы для регулирования движе-

ния машин по различным участкам дорожной сети. Например, в случае слияния путей, с помощью этого типа можно установить блокировку на вершинах второстепенной дороги (рис. 3б). Это позволит при моделировании приостановить движение транспор-

та на второстепенной дороге, пока все машины, находящиеся в окрестности узла слияния на главной дороге, не пройдут через данный узел. В случае, когда есть перекресток и известны приоритеты, все происходит аналогично, как описано выше. Если же приоритеты неизвестны, то по правилам дорожного движения дорогу уступают помехе справа.

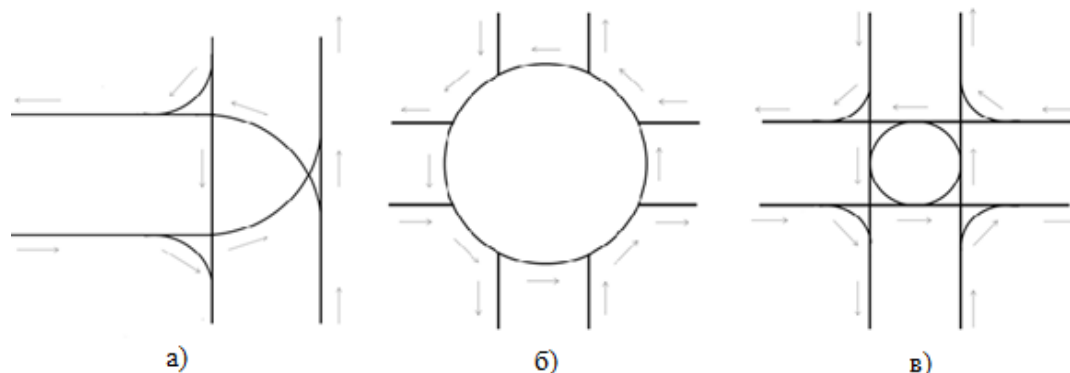


Рисунок 4. Виды перекрестков: а) Т-образный, б) с круговым движением, в) крестообразный

Было проведено моделирование и численное исследование перекрестка с круговым движением (рис. 5).

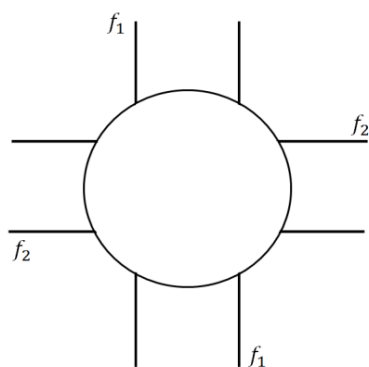


Рис. 5. Схема кругового движения

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 .

Численный анализ данных для перекрестка с круговым движением

На основе приведенных выше входных данных были смоделированы следующие типы перекрестков (рис. 4): Т-образный, стандартный крестообразный и перекресток с круговым движением.

Пусть частота f_1 фиксирована ($f_1 = 2$), а частота f_2 изменяется. Результаты моделирования при таких параметрах приведены на рис. 6 и 7.

Рис. 6 показывает зависимость средней скорости машин от частоты f_2 . Здесь можно увидеть, что графики друг от друга немного отличаются. В случае, когда главной дорогой считается кольцо, средняя скорость машин равномерно снижается. В ситуации, когда преимущество располагается на въездах, происходят скачки.

Наличие скачков характеризует возникновение перегрузок на каких-либо участках системы. Это утверждение подтверждает график, который представлен на рис. 7. Из него можно сделать вывод, что на перекрестке с приоритетом на въездах при частоте $f_1 \approx 2,5$ возникает пробка, т.к. резко сокращается число машин, проехавших данный перекресток. Фактически происходит полная остановка движения. При этом в модели с приоритетом на кольце движение не останавливается даже при больших значениях частоты f_1 .

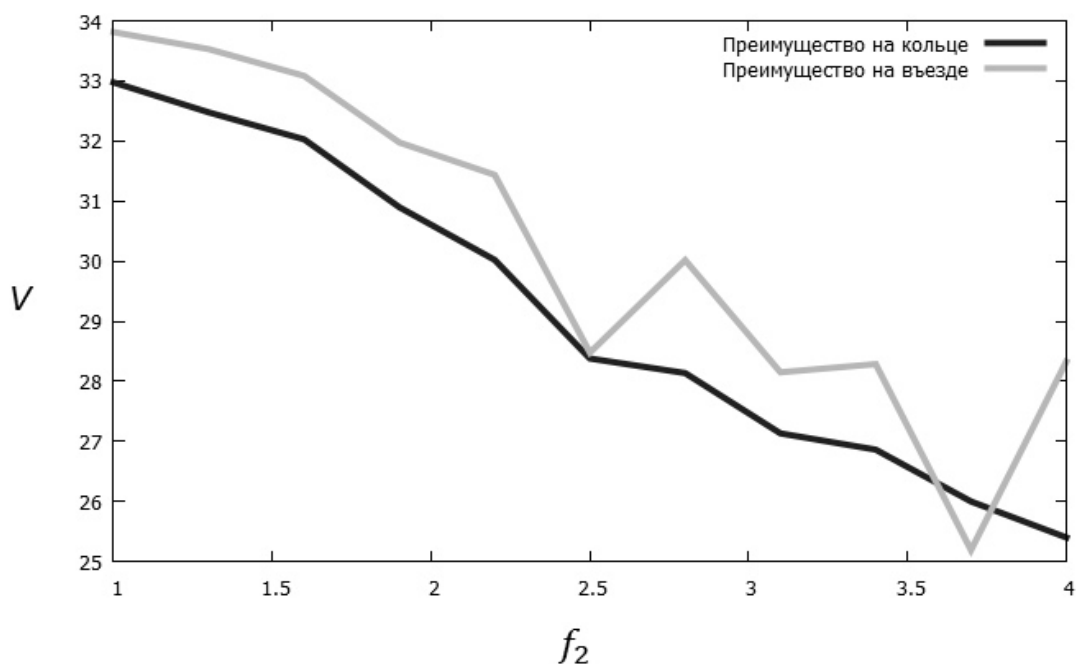


Рис. 6. Зависимость средней скорости всех машин от частоты f_2

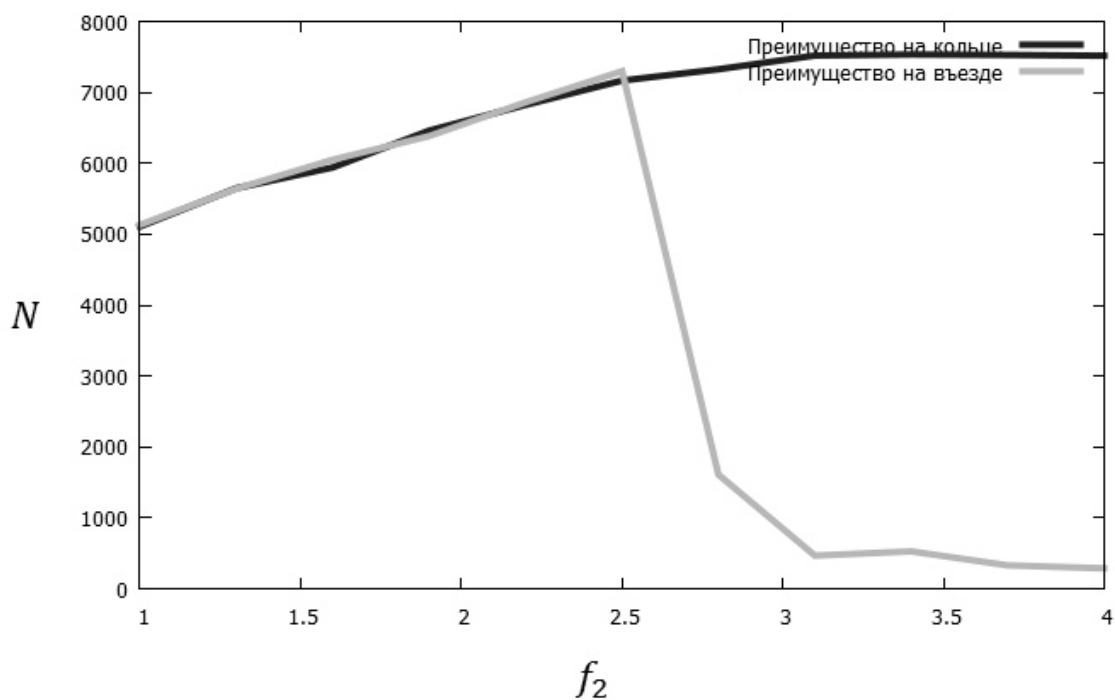


Рис. 7. Зависимость количества машин от изменения частоты f_2

Заключение

Для достижения поставленной цели данной работы 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 нескольких стандартных типов перекрестков, в том числе перекрестков с круговым движением.

В дальнейшем предполагается изменить входное описание дорожной сети, которое позволит учитывать такие объекты, как парковки, светофоры, различные пешеходные переходы и т.д. Также планируется расширить модель для учета многополосного движения. Работа будет вестись и над реализацией алгоритмов, описывающих поведение водителей транспортных средств и выбора ими различных маршрутов движения.

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

Библиографический список

1. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. – Москва : Мир, 1984.
2. Розенблюм, Л. Я. Сети Петри / Л.Я. Розенблюм // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1983. – № 5. – С. 12–40.
3. Dotoli, M. An urban traffic network model via colored timed Petri nets. Dipartimento di Elettrotecnica ed Elletronic / M. Dotoli, M.P. Fanti // Politecnico di Bari. – P. 4–15.
4. Hoogendoorn, S. P. State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling / S.P. Hoogendoorn, P.H. Bovy // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering. – 2001. – V. 215, № 4. – P. 283–303.
5. Lighthill, M. H. On kinematic waves: A theory of traffic flow on long crowded roads / M. H. Lighthill // Proc. Royal. Soc. Ser. A. – 1995. – V. 229, № 1178. – P. 317–345.

*Поступила в редакцию
15.08.2016*