

УДК 711.11

А.В. Астапенко, В.Л. Швецов, А+С Консалт,  
к.т.н., професор Н.Н. Осетрин, Д.А. Беспалов,  
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

## МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

*В статье приводятся наиболее распространенные математические модели транспортного потока, их сравнение и перспективы использования.*

В ходе проектирования какого-либо дорожно-транспортного узла (пересечения городских магистралей в одном или в разных уровнях), у проектировщика всегда возникают вопросы, как-то: какой режим движения сформирует выбранная геометрия на запроектированном узле?; будет ли обеспечена пропускная способность точек слияния (примыкания съездов), а следовательно и всей развязки в целом?; будет ли должным образом обеспечена безопасность и комфортное движение по будущей развязке? Или же другая ситуация: каждый проект реконструкции или нового строительства дорожно-транспортного узла требует согласований на многих уровнях власти. Задача проектной организации - должным образом, объективно и доступно представить свой проект, донести его суть до людей, которые, возможно, не разбираются во всех тонкостях и специфике данной отрасли. Кроме того, любое крупное строительство в городе непременно вызывает огромный интерес у его горожан, которые также должны быть проинформированы об изменениях, которые их, возможно, ждут на улично-дорожной сети города, в котором они проживают.

Получить достоверные ответы на вышеперечисленные вопросы чрезвычайно сложно. Однако, с того момента, как на улично-дорожной сети городов начали появляться развязки в разных уровнях и другие сложные узлы, многие исследователи поставили перед собой задачу - получить более-менее достоверные данные о специфике функционирования будущего дорожно-транспортного сооружения еще на стадии проектирования или даже предпроектных предложений (концепции). Так начал развиваться раздел «Теории транспортных потоков», посвященный их математическому моделированию.

Отечественные ученые столкнулись с данной проблематикой гораздо позже зарубежных коллег, очевидно, в силу невысокого уровня автомобилизации в бывшем СССР и плановости его экономики. В связи с этим, в данной статье не будут рассматриваться какие-либо модели, созданные отечественными исследователями Теории транспортных потоков.

Между тем, зарубежные ученые столкнулись с совершенно противоположной ситуацией. Еще Дональд Дрю (Donald Drew), в своей книге «Теория транспортных потоков и управление ими» (Traffic Flow Theory And Control) описал проблему следующего рода: многие молодые исследователи, приступающие к работе в области Теории транспортных потоков, ставят себе задачей создание «идеальной» математической модели, способной описать стохастическое движение транспортного потока языком формул. Это в конечном итоге привело к нагромождению огромного количества всякого рода моделей, начиная от одной формулы, заканчивая целыми массивами, которые способна обработать лишь вычислительная машина. Между тем, как бы там ни было, Теория транспортных потоков уже давно располагает нужным инструментарием в области моделирования транспортных потоков и «изобретать велосипед» здесь нет никакого смысла. Нужно лишь правильно использовать доступные ресурсы.

Итак, рассмотрим все ныне известные подходы к моделированию транспортных потоков.

Для начала: что же из себя представляет, собственно, процесс моделирования? Моделирование является по существу построением рабочей аналогии. Оно представляет собой построение рабочей модели, отражающей подобие свойств или соотношений с рассматриваемой реальной задачей. Моделирование позволяет изучать сложные задачи движения транспорта не в реальных условиях, а в лаборатории. В более общем смысле моделирование можно определить как динамическое отображение некоторой части реального мира путем построения модели на компьютере и продвижении ее во времени.

За последние 50 лет было создано множество математических вероятностных моделей, которые на микро и макро уровнях моделируют транспортные потоки. Некоторые из них, такие как, например, VISSIM, имеют коммерческую основу. Другие же, появились и развиваются в учебных заведениях и проектных институтах (конечно, речь идет о западных ВУЗах) в обучающих целях. Первые держатся в строжайшем секрете, а вторым недостает удобства, простоты использования и визуализации.

Модели симулирования (имитирования) движения транспортных потоков чаще всего делят на 4 класса, согласно подходу к уровню моделирования деталей. Первый уровень – это обычные макроскопические модели, где транспортный поток представляется как поток частиц, которые подчиняются законам гидрогазодинамики. Вторым уровнем выделяют наиболее часто используемые модели - микроскопические, которые сосредотачиваются на индивидуальных транспортных средствах и их поведении. В то время как макроскопические модели используют меньше вычислительных ресурсов и,

поэтому, позволяют моделирование больших дорожных сетей, результаты часто менее точны по сравнению с микроскопическим моделированием. Модели третьего уровня, мезоскопические, напротив, пытаются заполнить промежуток между макроскопическим и микроскопическим моделированием при использовании индивидуальных транспортных средств, которые приводятся в действие через контролирующие макроскопические переменные. Подмикроскопические модели - это четвертый уровень, обеспечивают самый высокий уровень детализации. Поэтому они чаще всего используются для моделирования поведения одиночного транспортного средства в автомобильной промышленности.

Как правило, во всех программах, моделирование транспортного потока происходит на микроуровне. Поэтому, начнем наш обзор именно с него. Рассмотрим 6 самых распространенных вероятностных моделей.

**Кинематическая модель** использует в своей основе элементарное кинематическое уравнение, для того чтобы определить максимальную степень ускорения либо замедления, которое транспортное средство должно проявить, чтоб избежать столкновения с другим транспортным средством, движущимся впереди. В каждом временном отрезке (time-step) новое значение  $a_{n+1}$  должно быть достаточно высоким для того, чтоб избежать столкновения в выбранном часовом промежутке, который называется временем до столкновения -  $t_c$ . Кроме того, необходимо постоянно изменять расстояние  $Dx$ , чтоб достичь определенного оптимального значения следующего отрезка  $dx$ . Скорость корректируется таким образом, чтобы оставаться в пределах  $[0 \dots V_{max}]$ .

$$a_{n+1} = a_n + (Dx - dx) \cdot \frac{2}{t_c^2} + dv \cdot \frac{2}{t_c}$$

Так как модель опирается лишь на 2 параметра, усилия по ее калибровке будут достаточно невысокими. Но моделирование, очевидно, не достигнет высоких уровней правдоподобности также. Из-за ее ограничений, кинематическая модель имеет крайне малый вес в современном моделировании транспортных потоков и не рекомендована к применению с целью установления ширины проезжей части магистрали. Она включена в учебный процесс во многих ВУЗах Европы лишь с образовательной целью.

**Вероятностная модель BANDO.** В 1995 году Бандо и его коллеги презентовали так называемую «оптимальную скоростную модель» (Optimal Velocity Model). Она представляет собой скоростную модель плотности, которая относится к группе детерминированных ведущих моделей и связывает целевую скорость транспортных средств с макроскопической плотностью

транспортного потока. Бандо вывел оптимальную скорость таким образом, чтобы каждое транспортное средство старалось следовать следующему отношению:

$$a_{n+1} = \alpha(v_{opt}(dx) - v_n)$$

где:

$a_{n+1}$  - ускорение для следующего отрезка времени;

$\alpha$  - фактор чувствительности (значение, обратное времени реакции водителя);

$v_{opt}$  - оптимальная скоростная функция;

$dx$  - изменение расстояния к предыдущему автомобилю;

$v_n$  - текущая скорость транспортного средства.

Команда Бандо предложила оптимальную скоростную функцию, которая монотонно увеличивается, с верхней границей в  $v_{max}$ .

$$v_{opt}(dx) = \frac{v_{max}}{2} (\tanh(0,086 \cdot (dx - 25)) + 0,913) \leq v_{max}$$

Со временем, модель была модифицирована еще несколькими оптимальными скоростными функциями. Например, используя разные функции ускорения или дифференцируя между свободной скоростью транспортного средства (ненасыщенный транспортный поток) и скоростью на пределе пропускной способности (speed-at-capacity) (насыщенный транспортный поток) с уравнением с 4-мя параметрами (Van Aerde, 1995).

**Вероятностная модель GAZIS.** Так называемая теория следования за автомобилем («гонка за лидером»), основана на исследованиях Gazis, Herman і Rothery (1961), старается следовать поведению транспортного средства, детерминируя расстояние, рассматривая время реакции водителя к определенным стимулам (например, разные скорости впередиидущего автомобиля), согласно формулы:

$$a_{n+1} = \alpha_0 \cdot \frac{v_{n+1}^m}{dx^l} \cdot dv$$

где:

$a_{n+1}$  - ускорение после времени реакции  $t_p$ ;

$\alpha_0$  - фактор чувствительности;

$m, l$  - параметры калибровки (коэффициенты);

$dx$  - разница скорости с предыдущим транспортным средством.

Для немецких магистралей значения параметров  $m$  і  $l$  были установлены в исследованиях Noefs (1972) для различных сценариев (отдаление или приближение автомобиля спереди, с тормозными сигналами или без них).

Однако, из-за стабильного увеличения автомобилей на европейских магистралях, в ходе развития пакета моделирования VABSIM была выполнена перекалибровка эталонных параметров, что привело к получению новых наборов параметров и более реалистичным результатам моделирования.

**Вероятностная модель смены полосы движения Sparmann.** Опираясь на работы Вайдемана, Спарман развивал алгоритм изменения полосы движения для двухполосного шоссе (Sparmann, 1978). Принимая во внимание все шесть потенциальных партнеров для взаимодействия (то есть каждое транспортное средство спереди, сзади на текущей полосе, а так же на двух соседних), транспортное средство могло бы изменить полосу движения, используя параметры Вайдеманна. Как только появилась потребность в изменении полосы движения, осуществляется проверка - подвергнет ли такой переход опасности или его или его так называемого “партнера взаимодействия”. Если обеспечивается безопасность всех транспортных средств, начинается процесс перестроения и транспортное средство оказывается на соседней полосе. Одно неудобство модели Спармана - нехватка более упреждающего стратегического подхода. Рассматриваются только соседствующие транспортные средства, игнорируя потребность других транспортных средств сменить полосу движения.

Вероятностная модель смены полосы движения THEIS. Тейс (1997) добавил стратегический компонент к модели Спармана: если транспортное средство пытается перестроиться на определенную полосу, оно должно для начала “просить” помощь у соседних транспортных средств. И наоборот, участвующее во взаимодействии транспортное средство должно решить, ускориться ли или замедлиться, чтобы создать интервал для меняющего полосу транспортного средства, или самому сменить полосу, чтобы создать ему место.

**Модель WIEDEMANNa в составе программного комплекса PTV Vision VISSIM.** Имитационное моделирование. Система имитации VISSIM состоит из двух отдельных программ, которые взаимодействуют друг с другом с помощью интерфейса, в котором происходит обмен данными измерений детекторов и данными о состояниях систем регулирования. Результат имитации - это анимация движения транспорта в виде графики в режиме реального времени и последующая выдача всевозможных транспортно-технических параметров, таких как, например, распределение времени в пути и времени ожидания, дифференцированных по группам пользователей.

В модель транспортного потока заложены модель следования за впереди идущим транспортным средством (ТС) с целью отображения движения в колонне за впереди идущим ТС по одной полосе движения и модель смены полосы движения. Зависящая от транспортного движения логика

регулювання моделюється з допомогою зовнішніх програм регулювання світосигнальних установок. Програма для логічного управління запитиває параметри детекторів в такте от 1 секунды до 1/10 секунды (в зависимости от настройки и типа светофорных установок). Из полученных значений и временных интервалов программа определяет состояние всех систем регулювання для следующего шага имитации и вносят их в имитацию транспортного потока.

Существенным для точности системы имитации является качество модели потока транспортного движения, т.е. метода, с помощью которого рассчитывается передвижение транспортных средств в сети. В отличие от более простых моделей, в которых за основу берутся постоянные скорости и неизменное поведение следования за впереди идущими транспортными средствами, **PTV Vision® VISSIM** использует психофизиологическую модель восприятия Вайдеманна (1974 г., 1999 г.). Основная идея модели заключается в том, что водитель транспортного средства, движущегося с более высокой скоростью, начинает тормозить при достижении своего индивидуального порога восприятия относительно удаленности от впереди идущего транспортного средства, когда дистанция до впереди идущего транспортного средства начинает восприниматься им как слишком маленькая. Так как он не может точно оценить скорость впереди идущего транспортного средства, то его скорость будет падать ниже скорости впереди идущего транспортного средства до тех пор, пока он не начнет снова немного ускоряться после достижения своего порога восприятия, когда он начнет воспринимать возникшую между ним и впереди идущим ТС дистанцию как слишком большую. Это ведет к постоянному легкому ускорению и замедлению. С помощью функций распределения для скорости и дистанции имитируется различное поведение водителей.

Имитационные модели этого типа относятся к семейству car- following:

- Gazis-Herman-Rothery(GHR)
- CollisionAvoidancemodel(CA)– Модели Kametani и Sasaki, Гиппс, Лейцбаха, Крауса
- PsychophysicalorActionPointmodel(AP) – Модель Видеманна
- Linearmodel– Модели Helly, Hanken и Rockwell, Burnham и Seo, Aron Xing
- Fuzzylogic-basedmodel28.06.2010 – Модели Rekersbring, Henn, McDonald и Wu.

Модели семейства car-following ориентируются на характеристики индивидуального транспортного средства. Модель Вайдеманна класса PSM выигрывает по количеству учитываемых факторов в моделировании

транспортного трафіка на мікроуровні. Модель Вайдеманна включає в себе характеристики водія, самого транспортного засобу і представляє золоту середину між клітинними автоматами і іншими класами моделей сімейства car-following.

Після численних емпіричних досліджень, проведених технічним університетом міста Карлсрує, ця модель слідування за впереді йдущим ТС стала еталонною. Більш актуальні вимірювання доводять, що змінившася за останні роки манера їзди і технічні можливості транспортних засобів коректно відображаються в даній моделі.

На багатополосних проїжджих частинах водій в VISSIM-моделі враховує не тільки впереді йдучі транспортні засоби, але і транспортні засоби на обох сусідніх смугах. Особливу увагу у водія додатково викликає світлофор в 100 м перед досягненням стоп-лінії.

В VISSIM так звані одиниці водія - транспортні засоби рухаються по мережі. Кожен водій зі своїми індивідуальними параметрами поведінки порівнюється з певним транспортним засобом. При цьому манера їзди збігається з технічними можливостями транспортного засобу.

Імітаційне моделювання, на даному етапі представляється потужним інструментом для оцінки і аналізу руху транспортних і пішохідних потоків. Крім того, програма рівня PTV Vision® VISSIM дозволяє в значительній мірі спростити роботу проєктувальника і створює надійну платформу для проєктування як дорожно-транспортних, так і будь-яких градостроительних об'єктів.

### Література

1. Дрю А. Теорія транспортних потоків і управління ними. "Транспорт", 1972 г., стр. 1-424
2. Метсон Т. Організація руху. Научно-технічне видавництво міністерства автомобільного транспорту і шосейних доріг РСФСР, - Москва, 1960. - 462 с.
3. Bando, M., Hasebe, H., Nakayama A., Shibata, A. and Sugiyama, Y. (1995) "Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation". Physical Review E 51.
4. Brilon, W. and Hartmann, D. (2004) "Fortentwicklung und Bereitstellung eines bundeseinheitlichen Simulationsmodells für Bundesautobahnen". Research project FE01/157/2001/IRB for the Bundesanstalt für Straßenwesen (Federal

- Highway Research Institute, Germany), in cooperation with the Ruhr-University Bochum. Germany.
5. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVWB). (2004) "Neubau von Bundesautobahnen", Sept. 2004, <http://www.bmvbw.de/Neubau-von-Autobahnen-.377.htm>
  6. Gazis, D.C., Herman, R. and Rothers, R.W. (1961) "Non-linear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow". Operations Research 9, No.4
  7. Hoefs, D.H. (1972) "Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen". Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 140.
  8. Michaels, R. M. (1963). "Perceptual factors in car following." Proceedings of the Second International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow. Paris: OECD, 44-59.
  9. Sparmann, U. (1978) "Spurwechselfvorgänge auf zweispurigen BAB- Richtungsfahrbahnen". Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 263.
  10. Theis, C. (1997) "Modellierung des Fahrverhaltens an Autobahnanschlussstellen". PhD-thesis. University of Karlsruhe. Germany.
  11. Van Aerde, M. and Rakha, H. (1995). "Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationships". Proceedings of the Vehicle Navigation and Information Systems (VNIS) Conference. Seattle. Washington.
  12. Wiedemann, R. (1974) "Simulation des Straßenverkehrsflusses". PhD-thesis. University of Karlsruhe. Germany.

### **Анотація**

У статті наводяться найпоширеніші математичні моделі транспортного потоку, їх порівняння і перспективи використання.

### **Annotation**

This article describes the most common mathematical models of traffic flow, comparison and prospects.