

ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

М.М. Ахмадинуров

OPTIMIZATION OF TRAFFIC LIGHT CONTROL USING THE PROGRAM OF TRAFFIC FLOW MODELING

М.М. Ahmadinurov

Рассмотрен метод, позволяющий повысить пропускную способность перекрестков дорожной сети города за счет оптимальной настройки цикла светофора. Метод, нахождения оптимального цикла светофора, базируется на разработанной автором программе. С помощью программы моделируется движение автомобильного потока через один регулируемый перекресток и путем перебора определяются наилучшие параметры светофора. В программе применяется микроскопическое моделирование, входные потоки автотранспорта моделируются как простейшие; используется упрощенная модель движения умного водителя (The Intelligent Driver Model, IDM).

Ключевые слова: транспортный поток, управление транспортными потоками, транспортная сеть, перекресток, светофор, микромоделирование, дорожный затор, автомобильная пробка, программа моделирования транспортных потоков.

The research work is directed to the solving for optimum traffic light parameters under the given car flow intensity. The method of solving an optimal cycle of traffic lights, is based on the author's developed the compute program. The program uses a microscopic simulation, applying a simplified version of the Intelligent Driver Model (IDM). The flow of cars is distributed under the exponential law.

Keywords: traffic flow, control of traffic flows, transport network, intersection, traffic light, microscopic models, traffic jam, program of traffic flow modeling.

Введение

Стремительный рост автопарка негативно сказывается на пропускной способности дорожной сети городов. Необходимо предпринимать меры, нацеленные на решение проблемы дорожных заторов. Мероприятия могут иметь как административный характер, так и заключаться в строительстве новых и реконструкции существующих дорог. Компьютерное моделирование позволяет оценивать эффективность планируемых работ, а также выявлять потенциально проблемные участки для принятия оперативных мер по их устранению.

В зарубежных странах достигнуты значительные успехи в разработке и применении современных программных комплексов, помогающих эффективно управлять транспортной сетью города. Примерами таких программных продуктов явля-

ются VISSIM (PTV 2003), AIMSUN/2, Paramics, MITSIMLab, CORSIM (US-DoT 1995).

В России ведутся научно-исследовательские работы, направленные на изучение транспортных потоков и на разработку программного обеспечения. Транспортная лаборатория ИргТУ является разработчиком программы оптимизации светофорного регулирования «Светофор». Специалистами Института Системного Анализа РАН была разработана программа «TransNet» - программа моделирования транспортных потоков в сети крупного города. Специалистами компаний Solaris Development и AGA Group, Inc. разработан программный комплекс «Артерия 3.0».

Автор данной работы подошел к решению задачи моделирования транспортных потоков с изучения природы входящего потока автомобилей

[5, 6, 7], а затем на основе полученных данных была разработана имитационная компьютерная модель (программа моделирования) [1, 2], которая позволяет задавать входящий поток, максимально приближенный к реальному потоку автомобилей. С помощью программы можно изменять входящий поток, и фиксировать, как меняются выходные параметры системы: среднее время ожидания в очереди, средняя длина очереди и т. д. Полученные данные способствуют нахождению оптимального режима работы светофора. В статье будут подробно описаны возможности программы, а также рассмотрен пример нахождения оптимального цикла светофора.

1. Постановка задачи

Рассмотрим перекресток с равным числом пересекающихся полос. С каждой стороны перекрестка, на определенном расстоянии от него, начинают движение автомобили с известными интенсивностями $\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \lambda'_4$. Причем, направления движения 1 и 3 являются перпендикулярными по отношению к направлениям 2 и 4.

Введем следующие обозначения: T - продолжительность цикла светофора, τ_1 - продолжительность красного сигнала для первого направления движения (λ'_1, λ'_3), τ_2 - продолжительность красного сигнала для противоположного направления движения (λ'_2, λ'_4). Продолжительность желтого сигнала τ_0 установим равной 3 секундам, согласно [6].

Таким образом, продолжительность цикла светофора равна

$$T = (\tau_1 + \tau_0) + (\tau_2 + \tau_0) = \tau_1 + \tau_2 + 2\tau_0.$$

Необходимо определить, как нужно настроить параметры светофора τ_1 и τ_2 , чтобы пропускная способность во всех четырех направлениях была оптимальной.

Цикл светофора настроен оптимально, если $T_{\text{простой}} \rightarrow \min$ и $Q_{\text{очередь}} \rightarrow \min$. Приняты следующие обозначения $T_{\text{простой}}$ - среднее время простоя автомобилей, т. е. сколько времени в среднем автомобиль не двигается (скорость равна нулю) на данном дорожном участке. Другими словами, это временные потери водителей, возникшие с момента начала движения автомобиля до полного пересечения перекрестка. $Q_{\text{очередь}}$ - средняя длина очереди автомобилей, т. е. среднее количество автомобилей, скапливающихся перед перекрестком на красный сигнал светофора.

2. Описание программы

Разработанная автором программа [1,2] предназначена для выполнения имитационного моделирования движения автотранспорта. Программа создана в среде разработки Borland Delphi 7. Программа позволяет конструировать небольшую дорожную сеть (несколько кварталов) с регулируемые перекрестками и «прогонять» по ней авто-

мобилю. В качестве входных параметров задаются местоположения генерации автомобилей, интенсивность автомобильных потоков, параметры светофоров. На выходе программа возвращает пропускную способность каждого дорожного участка, вероятность возникновения пробки на участке, среднюю длину очереди на участке и другие параметры.

3. Функциональные возможности программы

Ниже перечислены основные функциональные возможности программы:

— загрузка карты с изображением дорог и перекрестков через файл, подготовленный в графическом редакторе;

— задание входного потока автомобилей в любом месте карты (имитация мест рождения транспортного потока: магазины, места работы и учебы и т. д.);

— моделирование проезда автомобилей через регулируемый перекресток. На входе задаются: интенсивность движения, границы красного и зеленого сигналов светофора. Программа вычисляет все варианты сигналов светофора и для каждого варианта выполняет прогон автомобилей. Все выходные параметры (длина очереди, среднее время задержки и т. д.) фиксируются в таблице;

— получение объединенных результатов для перекрестка в целом. Если задать четыре интенсивности (как на перекрестке), то программа вычислит объединенные результаты (среднеарифметические значения параметров: пропускная способность, длина очереди, среднее время задержки);

— ускорение вычислений. Программа позволяет смоделировать десятичасовой прогон автомобилей за 30 секунд реального времени (вычисления проводились на процессоре Intel Core Duo 1,6 Ghz);

— нахождение оптимальных режимов светофорного регулирования для одного перекрестка. Можно указать ограничения на ряд выходных параметров, программа отобразит только те результаты, которые удовлетворяют заданным условиям;

— сохранение результатов вычислений в MS Excel;

— вставка результатов вычислений из MS Excel в программу моделирования.

4. Входной поток автомобилей

Входной поток автомобилей задается с помощью, так называемых, *генераторов* (имитация мест рождения транспортного потока). Можно создать любое количество генераторов, у каждого указываются параметры: место создания автомобилей (x, y), интенсивность (*авто/мин*), направление движения и максимальная скорость автомобилей (*км/ч*). После чего генератор с заданной интенсивностью создает автомобили в указанном месте.

Результаты, полученные в работе автора [5], свидетельствуют о том, что реальный поток авто-

мобилей имеет показательное или близкое к нему распределение. Поэтому в программе временные интервалы между созданием автомобилей генерируются случайным образом по показательному распределению, интенсивность потоков задается через параметр λ . Ниже подробно описано как в программе задается показательное распределение.

Функция показательного распределения имеет вид [7]

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0. \end{cases}$$

Рассмотрим случай $x \geq 0$ и обозначим $y = F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$, из данной формулы найдем x , получим

$$x = -\frac{\ln(1-y)}{\lambda},$$

где y - случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0, 1]$; χ - случайная величина, имеющая показательное распределение с параметром λ .

Используя данную формулу, можно получать выборочную совокупность, имеющую показательное распределение. Значение параметра y генерируется с помощью датчика случайных чисел - функции Random, которая возвращает непрерывную случайную величину, равномерно распределенную на заданном отрезке. В нашем случае $y \in [0; 1]$.

С помощью параметра λ задается интенсивность потока автомобилей, единица измерения измерения авто/с. Для удобства использования в интерфейсе программы интенсивность автомобильного потока задается в авто/мин.

5. Модель движения автомобилей

В программе используется микроскопическая модель [1,2] движения автомобилей. За основу взята модель умного водителя (The Intelligent Driver Model, IDM) [3, 4], в которую внесены некоторые упрощения.

Уравнение движения состоит из двух частей:

$$\dot{v} = \dot{v}_{speed} + \dot{v}_{brake},$$

где \dot{v}_{speed} - функция ускорения, \dot{v}_{brake} - функция торможения.

Уравнение ускорения автомобиля задается в виде

$$\dot{v}_{speed}(v_\alpha) = a \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^4 \right],$$

где a - максимальное ускорение, v_α - текущая скорость, v_0 - желаемая скорость (скорость, с которой автомобиль перемещался бы в свободном потоке).

Уравнение торможения автомобиля задается в виде

$$\dot{v}_{brake}(s_\alpha, v_\alpha) = \begin{cases} -a \left(\frac{s_0 + v_\alpha T}{s_\alpha} \right)^2, & s_\alpha \in [1, 10]; \\ 0, & s_\alpha > 10, \end{cases}$$

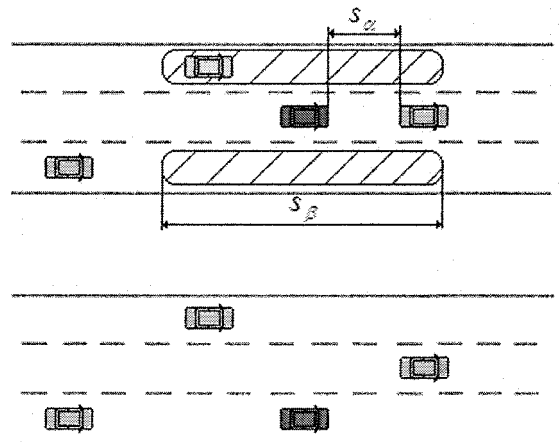
где s_α - дистанция до впереди едущего автомобиля (измеряется в метрах), s_0 - минимальное расстояние между автомобилями, которое сохраняется даже в пробке, T - желаемый временной интервал - время движения автомобиля со скоростью v_α до столкновения с впереди едущим автомобилем, v_α - текущая скорость.

Таким образом, автомобиль плавно набирает скорость от 0 до желаемой v_0 с вычисляемым ускорением \dot{v}_{speed} , которое зависит от скорости v_α в данный момент времени и от заданного максимального ускорения a . Снижение скорости в случае возникновения препятствия перед автомобилем осуществляется с помощью функции \dot{v}_{brake} , которая зависит от расстояния до препятствия s_α , скорости автомобиля v_α , от параметров T и s_0 .

Стохастичность моделирования достигается за счет того, что параметры, характеризующие индивидуальные особенности стиля вождения водителя, вычисляются отдельно для каждого автомобиля случайным образом в соответствии с равномерным распределением с разбросом 20%. В качестве исходных значений принимаются $T = 1,5$ с, $s_0 = 1,5$ м, $a = 2$ м/с².

6. Модель обгона

Каждый автомобиль при необходимости может менять полосу движения, при этом проверяется возможность безопасного осуществления перестроения. На рисунке изображена схема перестроения автомобиля.



Перестроение автомобиля в правый ряд

Как только расстояние s_α до впереди едущего автомобиля становится меньше допустимого,

предпринимается попытка сменить ряд. Сначала проверяется можно ли перестроиться в левый ряд, если нельзя (маневр приведет к резкому торможению других транспортных средств или к аварии), тогда проверяется возможность перестроиться в правый ряд. Параметр s_β означает дистанцию безопасности, которая проверяется перед осуществлением перестроения автомобилем. Также s_β отвечает за целесообразность перестроения в новый ряд, так как проверяется наличие в новом ряду места для движения вперед.

7. Метод нахождения оптимального цикла светофора

Перейдем к задаче определения оптимальных параметров светофора. Решать задачу будем с помощью описанной выше программы моделирования транспортных потоков, для этого нужно выполнить следующие действия.

1. Задать в программе входные параметры:

- габариты перекрестка, количество полос движения;

- интенсивности транспортных потоков $\lambda'_1, \lambda'_2, \lambda'_3, \lambda'_4$;

- минимальные и максимальные значения сигналов светофора и шаг изменения.

2. Запустить прогон автомобилей через перекресток. На этом шаге программа будет моделировать движение автомобилей через перекресток, изменяя при этом значения параметров светофора. В результате прогона будет выполнен перебор всех заданных значений сигналов светофора (см. 1-й шаг). Выходные параметры (пропускная способность перекрестка, среднее время жизни автомобиля, среднее время задержки автомобиля, длина очереди, общее количество автомобилей в системе в единицу времени) для каждого значения параметров светофора фиксируются в таблице.

3. Задать условия оптимальности. Чтобы найти оптимальные значения сигналов светофора τ_1 и τ_2 , нужно задать допустимые значения для параметров $T_{\text{простой}}$ и $Q_{\text{очередь}}$:

- $Q_{\text{очередь}}$, средняя по всем направлениям;

- $Q_{\text{очередь}}$, максимальная в одном из направлений;

- $T_{\text{простой}}$, среднее по всем направлениям;

- $T_{\text{простой}}$, максимальное в одном из направлений.

При этом программа произведет фильтрацию выходных параметров, полученных на шаге 2, и отобразит только те, результаты, которые удовлетворяют заданным условиям.

- Выбрать оптимальные значения параметров светофора. На данном шаге необходимо самостоятельно выбрать значения τ_1 и τ_2 из таблицы оп-

тимальных значений, предложенных программой на шаге 3.

Рассмотрим пример нахождения оптимального цикла светофора для заданных интенсивностей транспортных потоков. Пусть нам известны четыре интенсивности входных потоков (авто/мин): $\lambda'_1 = 10, \lambda'_2 = 12, \lambda'_3 = 8, \lambda'_4 = 15$. Упростим вычисления - из представленных четырех интенсивностей выберем две максимальные $\lambda_1 = \max\{\lambda'_1, \lambda'_3\} = 10, \lambda_2 = \max\{\lambda'_2, \lambda'_4\} = 15$. λ_1 и λ_2 являются интенсивностями конкурирующих (перпендикулярных) направлений движения.

С помощью программы найдем оптимальные значения параметров светофора: τ_1, τ_2 — продолжительность красного и зеленого сигналов. Для этого выполним описанные выше шаги.

1. Введем в программу входные параметры. Рассмотрим перекресток с равным числом пересекающихся полос, количество полос в каждом направлении равно двум. Тип перекрестка: простой - без левых поворотов и с двухфазным управлением. Определение такой разновидности перекрестка представлено в работе [8]. Расстояние от места генерации автомобилей до перекрестка будет равным 170 метрам. Максимальная скорость движения автомобилей равна 60 км/ч. Габариты автомобилей: длина 4 м, ширина 2 м. Зададим интервалы изменения длин фаз от 10 до 60 с, с шагом 5 с.

2. Запустим прогон автомобилей. Для каждого значения сигналов светофора программа будет моделировать движение автомобилей через перекресток в течение 10 часов. За счет ускорения десятичасовой прогон автомобилей выполняется за 30 секунд реального времени (зависит от процессора компьютера). После выполнения всех вычислений в результирующей таблице сохраняются выходные параметры для 121-го варианта настройки светофора.

3. Зададим условия оптимальности. После выполнения всех вычислений программа выдает диапазоны изменения выходных параметров, проанализировав которые можно задать ограничения или оптимальные значения для необходимых выходных параметров. Ниже в квадратных скобках указаны интервалы изменения параметров, полученные после прогона автомобилей. Задача исследователя указать значения из предлагаемых диапазонов. Например, укажем следующие значения:

- $Q_{\text{очередь}}$, средняя по всем направлениям = 7 авто/мин [от 5,99 до 33,61];

- $Q_{\text{очередь}}$, максимальная в одном из направлений = 10 авто/мин [от 6,13 до 63,90];

- $T_{\text{простой}}$, среднее по всем направлениям = 12 с [от 7,05 до 288,76];

- $T_{\text{простой}}$, максимальное в одном из направлений = 13 с [от 8,60 до 575,45].

4. После ввода параметров оптимизации, из 121-го варианта останется только 2. С учетом других выходных параметров (пропускная способность автомобилей в цикл, среднее количество автомобилей находящихся в системе) выбираем оптимальные параметры светофора: $\tau_1=30$ с, $\tau_2=25$ с (для направлений с интенсивностями λ'_1, λ'_3).

8. Практическое приложение результатов

Созданная имитационная компьютерная модель позволяет анализировать работу реального перекрестка при различных значениях входных параметров и находить оптимальный режим работы светофора.

Особенность программы заключается в том, что программа позволяет загружать перекресток любого размера и с любым количеством полос движения. В программе используется микроскопическая модель транспортного потока, что позволяет моделировать транспортные средства любых размеров (мотоциклы, легковые автомобили, автобусы и грузовые машины). Автомобили соблюдают безопасную дистанцию и способны при необходимости обгонять друг друга.

В программе вычисление изменения состояния системы выполняется с высокой точностью - 10 раз в секунду. В программе реализован механизм ускорения вычислений, который позволяет увеличить скорость моделирования движения автомобилей в 1000 раз. Полученные результаты можно скопировать в файл MS Excel и при необходимости вновь загрузить в программу для выполнения анализа.

Выводы

Цель данной работы была поставлена следующим образом: разработать метод нахождения оптимальных параметров светофора для заданных значений интенсивности входных потоков на перекрестке. В ходе выполнения работы была разработана программа моделирования транспортных потоков, которая позволяет задавать входные параметры (габариты перекрестка, число полос движения, интенсивности движения автомобилей) и получать все необходимые выходные параметры.

Также в программе можно задать параметры оптимизации, после чего программа выполнит отбор значений, соответствующих заданным параметрам. Все результаты можно скопировать в MS Excel, где построить необходимые графики, провести дальнейший анализ и выбрать оптимальный цикл светофора.

Следует отметить, что автомобили при пересечении перекрестка не совершали левый поворот, и на перекрестке не было пешеходов. Интенсивность потока подъезжающих автомобилей предполагалась распределенной по показательному закону. Перечисленные условия в значительной степени повлияли на полученные результаты.

Литература

1. Ахмадинуров, М.М. *Обзор методов моделирования транспортных систем* / М.М. Ахмадинуров // *Транспорт Урала*. - 2009. - № 3 (22). - С. 39-44.
2. Ахмадинуров, М.М. *Метод оптимальной настройки параметров светофора* / М.М. Ахмадинуров, Г.А. Тимофеева // *Молодые ученые - транспорту-2009: сб. науч. тр.: в 3 ч.* — Екатеринбург: Изд-во УРГУПС. - 2009. - Ч.1. - С. 254-261.
3. Treiber, M. *Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations* / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // *Physical Review*. - 2000. - E62.- P. 1805-1824.
4. Resting, A. *Agents for Traffic Simulation* / A. Resting, M. Treiber, D. Helbing // *Multi-Agent Systems: Simulation and Applications*, 2008.
5. Ахмадинуров, М.М. *Определение типа распределения входящего потока автомобилей* / М.М. Ахмадинуров // *Информационно-математические технологии в экономике, технике и образовании*. - 2009. - Вып. 5. - С. 86-92.
6. Кременец, Ю.А. *Технические средства организации дорожного движения: учеб. для вузов* / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. - 279 с.
7. Гмурман, В.Е. *Теория вероятностей и математическая статистика* / В.Е. Гмурман. — М.: Высш. шк., 1998. - 479 с.
8. Капитанов, В. Т. *Управление транспортными потоками в городах* / В. Т. Капитанов, Е.Б. Хилажеев. — М.: Транспорт, 1985. — 94 с.

Поступила в редакцию 21 марта 2010 г.