

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СВЕТОФОРНОГО ОБЪЕКТА В УСЛОВИЯХ НАСЫЩЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

Власов А.А.¹, Орлов Н.А.¹, Портов Д.В.¹, Скрипкин П.Б.²

¹ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» (440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28), e-mail: obd@pguas.ru

² ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет» (390044, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), e-mail: p_scripkin@mail.ru

Статья посвящена разработке методики расчета длительности фаз изолированного светофорного объекта в условиях насыщенного движения. Показано, что в условиях насыщенного движения традиционные методы расчета не применимы. Предложена формулировка задачи оптимизации длительности фаз регулирования. Она предусматривает минимизацию задержки автомобилей при ограничениях на длину очередей на подходах к регулируемому перекрестку. В статье приведена математическая модель задержки автомобилей на регулируемом пересечении, позволяющая проводить оценку задержки в условиях насыщенного движения, приведены зависимости для оценки длины очереди в анализируемом периоде. Для решения задачи оптимизации длительности фаз регулирования предложен алгоритм итерационного перебора по сетке решений с переменным шагом. Показана его эффективность для решения указанной задачи, в том числе в режиме реального времени.

Ключевые слова: светофорное регулирование, задержка транспорта, длина очереди.

DESIGN PROCEDURE TO TRAFFIC LIGHT CONTROL INTERSECTION IN THE CONDITIONS OF THE SATED MOVEMENT

Vlasov A.A.¹, Orlov N.A.¹, Portov D.V.¹, Skripkin P.B.²

¹Penza State University of the Architecture and Building (440028, Penza, street Hermann Titov, 28), e-mail: obd@pguas.ru

² Ryazan State Agrotechnological University Named After P.A. Kostychev (390044, Ryazan, Kostychev Str., 1), e-mail: p_scripkin@mail.ru

The paper is devoted to design procedure of phase's duration on isolated traffic light control intersection in the conditions of the sated movement. It is shown, that traditional methods of calculation in the conditions of the sated movement are not applicable. A problem of phase's duration optimization to control is formulated and offered. It provides minimization of traffic delay at length of turn's limitations on approaches to a light control intersection. In paper the mathematical model of traffic delay on the light control intersection is reduced. It allow to estimating a delay in the conditions of the sated movement. Also, equations for length of turn estimation in analyzed period are reduced. For a solution of phase's duration optimization problem to control the algorithm of iterative search on solutions net with a variable step is offered. Its efficiency for a solution of the specified problem, including conditions of real time, is shown.

Keywords: traffic light control, traffic delay, length of turn.

Введение

В настоящее время улично-дорожные сети крупных российских городов функционируют в условиях повышенной загрузки. Для многих городских улиц характерным становится возникновение систематических транспортных заторов. Используемая в отечественной и зарубежной практике методика расчета режимов работы светофорных объектов определяет длительность светофорного цикла C по следующей формуле:

$$C = \frac{1.5 \cdot T_n + 5}{1 - Y}; \quad (1)$$

где T_n – суммарное потерянное время за цикл, с; Y – суммарный фазовый коэффициент $Y = \sum_{i \in N} \max(v_{i,j}/s_j)$; N – множество фаз регулирования на пересечении; j – группа полос движения, $j \in J$; J – множество смежных полос, движение по которым регулируется отдельными сигналами светофоров; $v_{i,j}$ – интенсивность движения в i фазе по j полосе движения, авт./ч; s_j – поток насыщения по j полосе движения, авт./ч.

Полученная длительность светофорного цикла распределяется между фазами пропорционально критическим фазовым коэффициентам:

$$g_i = \frac{(C - T_p) \cdot \max(v_{i,j}/s_j)}{Y}; \quad (2)$$

где g_i – длительность i фазы регулирования.

Очевидно, что при достаточно высокой интенсивности движения $v_{i,j}$ устанавливается недопустимое значение знаменателя формулы (1):

$$1 - Y \leq 0.$$

С учетом приведенного выше можно констатировать, что разработка методики расчета режимов работы светофорных объектов в условиях насыщенного движения является одной из актуальных задач управления транспортными системами городов.

Постановка задачи оптимизации работы светофорного объекта

Процесс управления предполагает наличие цели, к достижению которой направлено функционирование систем управления. При этом под качеством функционирования (критерием эффективности) системы управления будем понимать степень ее приспособленности к выполнению стоящей перед ней задачи – обеспечение безопасного пропуска транспортных средств с минимальными задержками. Соответственно задачу оптимального управления изолированным светофорным объектом можно записать следующим образом:

$$\sum (d_j(g_i, v_{i,j}) \cdot v_{i,j}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

при ограничениях

$$g_{\min} \leq g_i \leq g_{\max}; \quad (4)$$

$$Q_j \cdot l_{\text{veh}} \leq L_j; \quad (5)$$

где $d_j(g_i, v_{i,j})$ – функция средней задержки транспортных средств; g_i – длительность разрешающего сигнала в i фазе, с; g_{\min} и g_{\max} – соответственно минимальная и максимальная длительность разрешающего сигнала, с; Q_j – положение фронта очереди, авт.; l_{veh} – средняя длина автомобиля, м; L_j – длина группы полос движения j , м.

Введение ограничения на длину очереди (5) связано с образованием остаточной очереди в цикле регулирования в условиях насыщенного движения [3; 4].

Функция $d_i(g_i, v_{i,j})$ должна обеспечивать вычисление задержки как в условиях свободного, так и насыщенного движения. Воспользуемся моделью задержки, приведенной в Highway Capacity Manual [5]. Модель задержки включает три слагаемых:

$$d = d_1 PF + d_2 + d_3.$$

где d_1 – постоянная составляющая задержки, с/авт.; PF – фактор прогрессии; d_2 – случайная задержка, с/авт.; d_3 – задержка перенасыщения, с/авт.

Постоянная составляющая задержки вычисляется как:

$$d_1 = 0.5 \cdot C \frac{(1 - g/C)^2}{1 - (\min(1, X) \cdot g/C)},$$

где X – степень насыщенности группы полос движения (v/c); c – пропускная способность группы полос движения $c = s \cdot g/C$, авт./ч.

Случайная задержка определялась с учетом нестационарности процесса формирования очереди:

$$d_2 = 900T \left\{ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right\}, \quad (6)$$

где T – продолжительность периода анализа в часах; k – коэффициент корректировки, учитывающий способ управления (для прерасчитанного управления принимается равным 0,50); I – коэффициент корректировки, учитывающий влияние соседних перекрестков (для изолированных регулируемых пересечений равен 1.0).

Задержка перенасыщения определяется величиной остаточной очереди на анализируемом периоде T по формуле:

$$d_3 = \frac{1800 \cdot Q_b (1 + u) \cdot t}{cT}; \quad (7)$$

$$t = \begin{cases} 0 & \text{при } Q_b = 0 \\ \min \left(T, \frac{Q_b}{c(1 - \min(1, X))} \right) \end{cases};$$

$$u = \begin{cases} 0 & \text{при } t < T \\ 1 - \frac{cT(1 - \min(1, X))}{Q_b} \end{cases};$$

где Q_b – величина остаточной очереди, авт.; t – продолжительность неудовлетворения спроса, ч.

Постоянная составляющая задержки d_1 в период наличия остаточной очереди будет вычисляться при $X=1.0$, для периода $(T-t)$ отсутствия остаточной очереди будет использоваться актуальное значение X :

$$d_1 = 0.5 \cdot C \frac{(1-g/C)^2}{1-g/C} \cdot \frac{t}{T} + 0.5 \cdot C \frac{(1-g/C)^2}{1-(\min(1, X) \cdot g/C)} \cdot PF \cdot \frac{T-t}{T}. \quad (8)$$

Положение фронта очереди Q_j ограничения (5) в Highway Capacity Manual определяется формулой:

$$Q = Q_1 + Q_2; \quad (9)$$

$$Q_1 = PF_2 \frac{\frac{v_L C}{3600} \left(1 - \frac{g}{C}\right)}{1 - \min(1, X_L) \frac{g}{C}}; \quad (10)$$

$$Q_2 = 0.25 \cdot c_L T \left[(X_L - 1) + \sqrt{(X_L - 1)^2 + \frac{8k_B X_L}{c_L T} + \frac{16k_B Q_{bL}}{(c_L T)^2}} \right]; \quad (11)$$

где v_L – интенсивность движения по полосе движения, авт./ч; s_L – поток насыщения по полосе движения, авт./ч; c_L – поток по полосе движения, авт./ч; Q_{bL} – остаточная очередь по полосе движения, авт.; X_L – загруженность полосы движения (v_L/c_L); PF_2 – коэффициент прогрессии; k_B – коэффициент, связанный с сокращением времени прибытия к фронту очереди.

Как видим, поставленная задача оптимизации работы светофорного объекта (3–5) с учетом выражений (6–8) и (9–11) является задачей нелинейного целочисленного программирования с ограничениями как линейного (4), так и нелинейного (5) вида. Введем функцию штрафа:

$$F_{pen}(x) = \begin{cases} \text{inf если } x > 0 \\ 0 \text{ иначе} \end{cases}, \quad (12)$$

где inf – достаточно большое число, эквивалентное бесконечности.

Модифицируем задачу (3–5) путем введения функции штрафа (12) в целевую функцию:

$$\sum (d_j (g_i, v_{i,j}) \cdot v_{i,j} + F_{pen}(Q_j \cdot l_{vech} - L_j)) \rightarrow \min. \quad (13)$$

Алгоритм решения задачи оптимизации работы светофорного объекта

Для решения поставленной задачи могут быть использованы численные методы оптимизации, такие как эволюционные алгоритмы, метод роя частиц, имитация отжига и др., при этом наиболее широкое применение при расчете режимов работы светофорных объектов получили генетические алгоритмы [1; 2].

При расчете режимов работы изолированного светофорного объекта размер области возможных решений P определен количеством фаз регулирования N и размахом возможных значений длительности разрешающих сигналов:

$$P = \left(\frac{g_{\max} - g_{\min}}{\Delta g} \right)^N, \quad (14)$$

где Δg – шаг приращения длительности разрешающих сигналов, с.

На практике схемы движения с числом фаз регулирования N более 4 не используются, а длительность разрешающего сигнала по условиям безопасности определена на диапазоне значений $7 \leq g_i \leq 90$ с. С учетом указанных особенностей области возможных решений целесообразно решение задачи (13) методом перебора по сетке возможных решений с шагом Δg .

Существенно сократить количество вычислений можно путем использования итерационной процедуры поиска оптимального решения с переменным шагом Δg :

- 1) установить начальные значения $\Delta g = 10$, $g_{\min} = 10$, $g_{\max} = 90$;
- 2) сгенерировать сетку решений *SolveGrid* по каждой фазе в диапазоне значений $g_{\min} \leq g_i \leq g_{\max}$ с шагом Δg ;
- 3) для каждого узла решения из *SolveGrid* по формуле (13) вычислить значение целевой функции;
- 4) решение $green \in SolveGrid$, имеющее минимальное значение целевой функции, является оптимальным;
- 5) модифицировать начальные значения $\Delta g = 2$, $g_{\min} = green - 10$, $g_{\max} = green + 10$;
- 6) выполнить пункты 2 – 4.

Количество вычислений целевой функции при использовании метода перебора по сетке возможных решений с постоянным шагом и при использовании итерационного перебора с переменным шагом приведено на рисунке 1.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма составлена программа, выполняющая расчеты режимов работы светофорного объекта по приведенной выше методике на языке программирования Python 2.7.

В результате выполнения программы получено совпадение решения, при этом время решения задачи для двухфазной схемы разезда при использовании метода перебора по сетке возможных решений с постоянным шагом составило 0,757 с, а при использовании итерационного перебора с переменным шагом – 0,044 с.

Тестирование производилось на персональном компьютере с процессором Intel Core i3 и 4,00 Гб оперативной памяти под управлением операционной системы Windows 7.

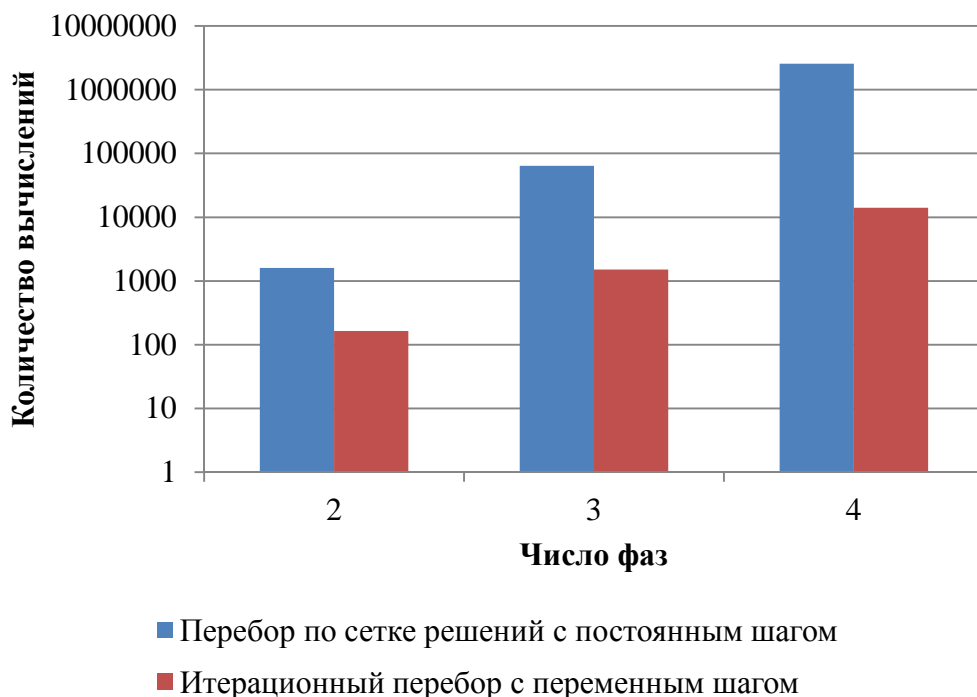


Рисунок 1. Количество вычислений целевой функции

Заключение

В условиях насыщенного движения задача расчёта режимов работы светофорных объектов может быть сформулирована как задача минимизации задержки движения с ограничениями на длину очереди. Для ее решения, в том числе в режиме реального времени, целесообразно использование предложенного алгоритма итерационного перебора по сетке решений с переменным шагом.

Список литературы

1. Адаптивные системы управления дорожным движением в городах / А.А. Власов: монография. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2012. – 162 с.
2. Власов А.А., Акимова В.Ю., Широков М.В. Эволюционный метод расчета режимов работы светофорной сигнализации // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2009. – № 47. - С. 97-99.
3. Власов А.А., Орлов Н.А., Чушкина К.А. Методика расчета режимов работы светофорных объектов в условиях насыщенного движения // Наукоедение: интернет-журнал. – 2014. - № 2 (21) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/02TVN214.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. - Яз. рус., англ. (дата обращения: 03.04.2014).

4. Орлов Н.А., Власов А.А., Чушкина К.А. Синхронизация работы светофорных объектов в условиях насыщенного движения // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. - URL: <http://www.science-education.ru/116-12572> (дата обращения: 03.04.2014).
5. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington, D.C. 2010. ISBN 978-0-309-16077-3.

Рецензенты:

Родионов Ю.В., д.т.н., профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г.Пенза.

Бажанов А.П., д.т.н., профессор кафедры «Геотехника и дорожное строительство» ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г. Пенза.