

ИНФОРМАТИКА И ПРОГРАММИРОВАНИЕ

УДК 519.876.5:004.94

А.В. Приступа

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕКРЕСТКА С ДВУХФАЗНЫМ СВЕТОФОРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Рассматривается задача поиска оптимального режима работы светофоров на регулируемом перекрестке двух автомобильных дорог при управлении потоками транспортных средств с заданными интенсивностями. В качестве критерия оптимальности выбрано минимальное время проезда перекрестка.

Ключевые слова: *имитационная модель, перекресток, светофор.*

Постоянно растущее количество автомобилей на городских улицах, а также плотная застройка, не позволяющая расширять дорожное полотно и добавлять новые полосы движения, заставляет регулярно задумываться над оптимизацией движения потоков автомобильного транспорта в условиях имеющихся в распоряжении ресурсов. Правильная настройка циклов работы светофоров на перекрестках является одним из способов решения этой проблемы. В качестве метода исследования чаще всего выбирают имитационное моделирование, поскольку наличие светофорного регулирования со своими схемами пофазного разъезда и другими параметрами существенно затрудняет построение аналитических моделей. Однако и в имеющихся компьютерных моделях многие факторы зачастую не учитываются: например, не рассматривается особенность поворота налево по сравнению с другими направлениями движения на перекрестке [1, с. 232, 233; 2] либо выбирается такой режим работы светофоров, при котором никакие транспортные потоки при выполнении маневров на перекрестке не пересекаются [3]. В данной статье предлагается учесть особенность левого поворота, связанную с необходимостью уступить дорогу транспортным средствам встречного направления, а также принять во внимание ограниченность размера пространства на перекрестке, на котором автомобили могут дожидаться возможности завершения маневра. Задача будет состоять в построении соответствующей имитационной модели средствами системы GPSS World и проведении над построенной моделью ряда экспериментов с целью определения оптимального режима работы светофоров при управлении потоками транспортных средств с заданными интенсивностями. В качестве целевой функции, которую будем минимизировать, выберем среднее время проезда перекрестка.

Имитационная модель перекрестка

Рассмотрим пересечение двух автомобильных дорог. Пусть каждая дорога состоит из двух проезжих частей, а каждая проезжая часть, в свою очередь, имеет 2 полосы движения: одна – для поворота налево, другая – для движения прямо и на-

право. Предположим, что на перекрестке разрешен проезд в любом из направлений (прямо, налево, направо), а светофоры работают в двухфазном режиме (рис. 1).

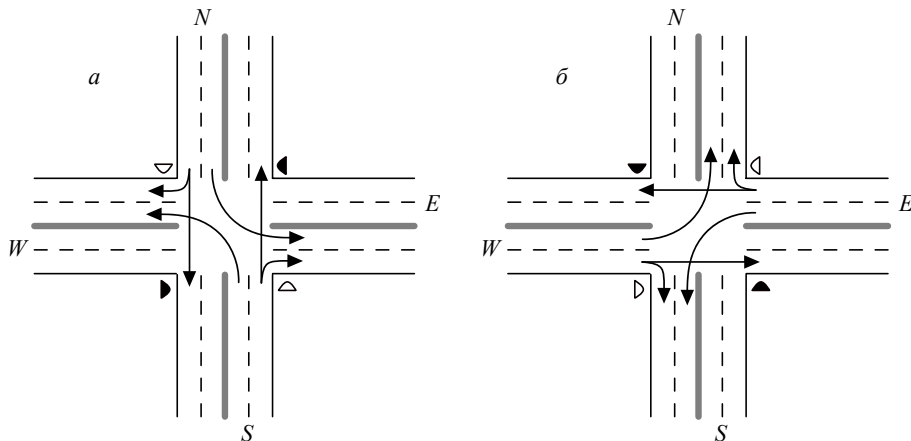


Рис. 1. Режимы работы светофоров на перекрестке: *a* – 1-я фаза; *б* – 2-я фаза

Во время работы светофоров в первой фазе (рис. 1, *a*) движение разрешено по проезжим частям *S* и *N*. При этом автомобили, двигающиеся по правой полосе, могут беспрепятственно продолжать движение прямо или направо, а те, кто едет по левой полосе, могут повернуть налево, уступив дорогу транспортным средствам встречного направления, едущим прямо. Во время работы светофоров во второй фазе (рис. 1, *б*) движение разрешено по проезжим частям *W* и *E*. Направления движения по полосам и правила проезда перекрестка аналогичны первому случаю.

Моделирование начинается в момент времени равный 0. При этом светофоры работают в первой фазе. Пусть все входящие потоки являются простейшими, известны интенсивности потоков по каждой полосе, при этом для правых полос движения каждой проезжей части известно также процентное соотношение между автомобилями, двигающимися прямо и поворачивающими направо. Убедившись в том, что горит разрешающий сигнал светофора, будем разрешать выезд автомобилей на перекресток. Если автомобиль, стоящий первым на светофоре, начинает выезд на перекресток, то в течение времени *CrossTme1* все остальные автомобили в этой полосе должны оставаться на месте. Это соответствует этапу «трогания с места». Далее при отсутствии помех автомобиль в течение времени *CrossTime2* завершает маневр и покидает перекресток. Для осуществления временной задержки на время *CrossTme1* и *CrossTme2* будем использовать одноканальные устройства обслуживания (ОКУ).

Для автомобилей, поворачивающих налево, необходимо еще учесть тот факт, что их траектории пересекаются с траекториями автомобилей встречного направления, двигающихся прямо. Поэтому будем разрешать им выезд на перекресток в свой накопитель (многоканальное устройство ограниченной емкости, например, 3), а для завершения левого поворота будем проверять, свободно или занято соответствующее ОКУ встречного направления, обеспечивая тем самым выполнение требования «Уступить дорогу». В течение времени *CrossTime1* автомобиль сможет выехать на перекресток (занимая при этом ОКУ и МКУ), а в течение времени *CrossTime2* завершить маневр при отсутствии встречных помех.

При генерации транзактов будем также назначать им различные приоритеты: 1 – для автомобилей, двигающихся прямо или направо; 0 – для автомобилей, поворачивающих налево. Использование приоритетов также обусловлено требованием «Уступить дорогу», поскольку при смене сигналов светофора перед перекрестком уже имеется некоторая очередь, которая образовалась, пока горел запрещающий сигнал. И приоритет в ней имеют те автомобили, которые собираются проехать прямо, по сравнению с машинами встречного направления, поворачивающими налево.

Программная реализация на GPSS

Рассмотрим программную реализацию сегмента, отвечающего за смену сигналов светофорных объектов.

GENERATE 0,,,1	SAVEVALUE TrafficSN,999
Label1 SAVEVALUE TrafficSN,0	SAVEVALUE TrafficWE,0
SAVEVALUE TrafficWE,999	ADVANCE GreenTimeWE
ADVANCE GreenTimeSN	TRANSFER ,Label1

В момент времени равный 0 создается единственный транзакт, инициирующий первую фазу работы светофоров. Переменная *TrafficSN* принимает значение 0, что соответствует зеленому сигналу светофора на проезжих частях *S* и *N*, а переменная *TrafficWE* принимает значение 999, что соответствует красному цвету на проезжих частях *W* и *E*. По истечении времени, заданного константой *GreenTimeSN*, осуществляется переход ко второй фазе: значения переменных меняются местами, и производится задержка на время равное *GreenTimeWE*. Далее следует переход на первую фазу и т.д. Задача заключается в том, чтобы подобрать такие значения длительности сигналов светофоров, которые обеспечат минимальное средневзвешенное время ожидания автомобилей на перекрестке.

Теперь перейдем к рассмотрению сегментов, которые отвечают за движение автомобилей. Для поворота налево (на примере проезжей части *S*) имеем следующую программную реализацию:

GENERATE (Exponential(1,0,meanS_L)),,,,0	TEST E X\$TrafficSN,F\$WayN_F
QUEUE LineS_L	LEAVE WayS_Left
TEST E X\$TrafficSN,SF\$WayS_Left	SEIZE WayS_L2
ENTER WayS_Left	ADVANCE CrossTime2
SEIZE WayS_L1	RELEASE WayS_L2
ADVANCE CrossTime1	DEPART LineS_L
RELEASE WayS_L1	TERMINATE

Машины прибывают на перекресток по левой полосе через случайные промежутки времени, имеющие экспоненциальный закон распределения со средним значением *meanS_L*. Приоритет равен 0. Далее они поступают в соответствующую очередь *LineS_L* для того, чтобы по окончании моделирования можно было оценить среднее время ожидания автомобиля, собирающегося выполнить поворот налево. Если горит разрешающий сигнал светофора и число машин в накопителе для левого поворота не превысило заданной емкости (проверка в первом блоке TEST), то автомобиль в течение времени *CrossTime1* выезжает на перекресток и ожидает возможности завершения маневра, т.е. отсутствия встречных машин (проверка во втором блоке TEST). Если условие истинно, то автомобиль в течение времени *CrossTime2* завершает проезд перекрестка и освобождает все соответствующие очереди и устройства обслуживания.

Рассмотрим теперь сегмент, который отвечает за движение машин прямо и направо (на примере проезжей части S), программная реализация которого выглядит следующим образом:

GENERATE (Exponential(2,0,meanS_F_R)),...,1	ADVANCE CrossTime2
QUEUE LineS_F_R	RELEASE WayS_F
TEST E X\$TrafficSN,F\$WayS_F_R	TRANSFER ,S_EndLabel
SEIZE WayS_F_R	S_RightLabel SEIZE WayS_R
ADVANCE CrossTime1	;движение прямо
RELEASE WayS_F_R	ADVANCE CrossTime2
TRANSFER S_RightPart,,S_RightLabel	RELEASE WayS_R
S_ForwardLabel SEIZE WayS_F	S_EndLabel DEPART LineS_F_R
;движение прямо	TERMINATE

По правой полосе машины прибывают на перекресток через случайные промежутки времени, имеющие экспоненциальный закон распределения со средним значением $meanS_F_R$. Приоритет равен 1. Далее они поступают в соответствующую очередь $LineS_F_R$ для того, чтобы по окончании моделирования можно было оценить среднее время ожидания автомобиля, собирающегося проехать прямо или повернуть направо. Если горит разрешающий сигнал светофора и впереди стоящая машина завершила этап «трогания с места», то автомобиль в течение времени $CrossTime1$ выезжает на перекресток. После этого в блоке TRANSFER определяется дальнейший маршрут движения (прямо или направо) и осуществляется передача управления в соответствующий блок обработки, где автомобиль в течение времени $CrossTime2$ завершает проезд перекрестка. Направление, в котором поедет автомобиль после того, как заедет на перекресток, интересует нас лишь потому, что машины, поворачивающие направо, не мешают никому, а двигающиеся в прямом направлении мешают встречным машинам поворачивать налево, и это обстоятельство необходимо учитывать.

Таким образом, нами рассмотрен 1 сегмент модели, отвечающий за смену сигналов светофоров, а также 2 сегмента, имитирующих проезд перекрестка машинами, прибывшими с направления S . Оставшиеся 6 сегментов (для проезжих частей N , W и E) аналогичны рассмотренным. Можно также отметить, что при увеличении числа полос движения или количества фаз светофорного регулирования модель может быть адаптирована для работы в новых условиях: для этого достаточно дописать несколько подобных сегментов.

Рассмотрим полученные результаты на примере одного из наборов значений входных параметров. Предположим, что полная длительность светофорного цикла составляет 80 с, время проезда перекрестка составляет 4 с ($CrossTime1 = 2$; $CrossTime2 = 2$), а емкость накопителя для машин, желающих повернуть налево, равна 3. Пусть $Green.SN$ и $Green.WE$ – продолжительность разрешающего сигнала на направлениях SN и WE соответственно. При условии, что все интенсивности прибытия автомобилей к перекрестку известны, будем искать такие значения $Green.SN$ и $Green.WE$, которые обеспечат нам минимальное средневзвешенное время проезда перекрестка (столбец TIME).

Для заданных интенсивностей были проведены имитационные эксперименты с различными значениями продолжительностей сигналов светофоров. В данных условиях наилучшим режимом работы оказался такой, когда длительность первой фазы (46 с из 80) составил 57,5 % полного цикла, а продолжительность второй (34 с из 80) – 42,5 %. В этих условиях средневзвешенная временная задержка оказалась минимальной и составила 27,378 с. Аналогичным образом можно смоделировать работу перекрестка при других интенсивностях входящих потоков.

Проезжая часть	τ_1 (с)	τ_2 (с)	$\%_{Right}$ (%)	<i>Green.SN</i> (с)	<i>Green.WE</i> (с)	<i>Time.L</i> (с)	<i>Time.F_R</i> (с)	TIME (с)
<i>S</i>	4,5	6	20	40	40	120,451	20,035	43,752
<i>N</i>	6	6	25			37,712	20,028	
<i>W</i>	8	8	15			22,133	17,888	
<i>E</i>	7	6	50			28,348	20,028	
Описание: τ_1 – среднее время между прибытиями машин по левой полосе; τ_2 – среднее время между прибытиями машин по правой полосе; $\%_{right}$ – % машин, которые из правой полосы поворачивают направо (остальные – прямо)				46	34	31,939	15,665	27,378
						25,127	15,664	
						28,047	22,296	
						41,953	26,077	
				50	30	23,988	13,215	31,529
						20,442	13,210	
						33,960	25,816	
		77,652	33,919					

Заключение

Для регулируемого перекрестка двух автомобильных дорог разработана имитационная модель движения транспортных средств, которая при заданных интенсивностях входящих потоков позволяет определить такой режим работы светофоров, который обеспечит минимальное средневзвешенное время проезда перекрестка для автомобилей, прибывающих с различных направлений. Особенность модели состоит в том, что в ней учтена специфика маневра левого поворота, заключающаяся в необходимости уступить дорогу транспортным средствам встречного направления, а также в ограниченности пространства на перекрестке, на котором автомобили могут дожидаться возможности завершения маневра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения* / А.П. Буслаев [и др.]; под ред. чл.-корр. РАН В.М. Приходько. М.: Мир, 2003. 368 с.
2. *Anfilets S.V., Shut V.N.* The creation of models of adjustable crossroads on GPSS // Proc. 9th Int. Conf. «Reliability and Statistics in Transportation and Communication» (21–24 October 2009, Riga, Latvia). Riga: Transport and Telecommunication Institute, 2009. P. 433–438.
3. *Зольников В.А.* Модель движения машин на Т-образном перекрестке // Имитационное моделирование. Теория и практика: сб. докл. Пятой Всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2011. Т. 2. СПб.: ОАО «ЦТСС», 2011. С. 104–108.

Приступа Андрей Викторович
Томский государственный университет
E-mail: pristupa@sibmail.com

Поступила в редакцию 23 апреля 2013 г.

Pristupa Andrey V. (Tomsk State University). **Crossroad simulation model with the two-phase traffic signal control.**

Keywords: simulation model, crossroads, traffic light.

One considers the problem of finding the optimal mode of traffic signal control at the crossroad while managing the traffic flow with given intensities. Simulation is chosen as a research method. Feature of the model is the explicit allocation of left turns from all possible directions at the crossroad, associated with the necessity to give way to cars traveling in opposite direction.