

УДК 681.513.3, 007.51

М.В. Черноморец, А.А. Галькевич

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПЕРЕКРЕСТКЕ

*В данной работе рассматривается одно из перспективных направлений автоматизации – автоматизация управления транспортными потоками на перекрестке. Проводится исследование средств регулирования транспортных потоков на перекрестке, предлагается новый метод регулирования с помощью так называемого «умного светофора».*

**Ключевые слова:** «умный светофор», АСУД, АСУТП, адаптивное регулирование движения, СМО, интенсивность, математическое ожидание.

### Введение

С ростом количества автомобилей в последние годы остро встает вопрос об эффективности регулирования дорожного движения, основным инструментом которого остается светофор. Зачастую даже не специалисту в области регулирования движения становится ясно, что светофоры не справляются с возросшими транспортными потоками, не оптимально пропускают их на перекрестках, тем самым, способствуя образованию пробок. В связи с этим в экономически развитых странах проводятся эксперименты по удалению с улиц светофоров. Так в 1999 году в Европе с улиц голландского города Драхтена началось удаление светофоров [1]. В 2006 году светофоры убрали из города Бомт (Германия) [2], в 2007 – из Норрчепинга (Швеция) [3], в 2008 – из Эшфорда (Великобритания) [3]. Подобную инициативу поддержали даже в Лондоне в 2009 г. передает ИТАР-ТАСС [4]. Сама идея убрать светофоры (и даже дорожные знаки) принадлежит голландцу Хансу Мондерману и активно поддерживается Европейским

союзом. Программа называется Shared Space («Общее пространство»). «Типичная ошибка дорожных инженеров состоит в том, что когда с дорогой начинаются проблемы, они всегда пытаются что-нибудь добавить, – поясняет Мондерман. – На мой взгляд, в таких ситуациях гораздо лучше что-нибудь убрать» [1].

Другой распространенной тенденцией являются попытки заменить светофоры с фиксированными тактами фаз световой сигнализации, которые работают еще с 60-х годов, на светофоры с гибким чередованием фаз разной длительности в зависимости от интенсивности транспортных потоков. Последние называют «умными» или адаптивными. Такие «умные» светофоры уже действуют с 2001 года в Эдинбурге (Великобритания) [5], с 2002 в Токио (Япония) [6], с 2006 в Варне (Болгария) [7], с 2007 в Ингольштадте / Мюнхене (Германия) [8] и т.д. Эти системы, по сути, экспериментальные, и вследствие этого еще не являются распространенными и унифицированными. Поэтому, в свете вышеизложенных проблем с регулированием дорожного трафика, разработка такой системы является актуальной и

представляет интерес для разработчиков. В рамках исследовательской работы решена задача разработки автоматизированной системы управления движением на перекрестке как комплекса аппаратно-программных средств, предназначенного для поочередного пропуска участников движения через определенный участок улично-дорожной сети. Физически комплекс состоит из блока управления на основе контроллера, исполнительных устройств (сигнальных огней светофора, многопозиционных дорожных знаков, вызывных пешеходных табло) и

детекторов транспорта. Контроллер реализует следующие функции: поддержка 5 режимов (программ) движения; переключение режимов работы светофоров с выделением для каждого режима определённого времени сигнала (время свечения); контроль времени суток и изменение времени свечения ламп для каждого режима; осуществление контроля перегорания ламп; отключение светофоров [9, 10, 14]. Обобщенная схема автоматизированной системы управления транспортными потоками на перекрестке приведена на рис. 1.



Рис. 1. Обобщенная схема автоматизированной системы управления транспортными потоками на перекрестке

Описание модели дорожного движения возможно средствами разных математических аппаратов – среди них метод целевого поиска управляющих параметров (используется АСУТП в Ингольштадте, Германия), где в качестве критерия эффективности управления используется значение транспортной задержки на перекрестке [11, 14]; метод моделирования работы светофора с нечеткой логикой (используется АСУТП Токио, Япония) [12], согласно которому для каждой переменной задаются лингвистические термы, соответствующие некоторым диапазонам четких значений.

Для решения задачи адаптивного регулирования движения на перекрестке выбрано семейство методов линейного программирования, т.к. именно для решения линейных задач оптимизации целесообразно использовать микропроцессорные средства, на основе которых планируется создание автоматизированной системы управления движением на перекрестке.

Мы остановимся на поиске решений средствами той части теории линейного программирования, которая охватывается «задачами о потоках в сетях» [11]. При этом также используются понятия теории массового обслуживания [13]. Что дает право ис-

пользовать эти понятия? Рассмотрим поток автомобилей через перекресток. Автомобили в потоке движутся с различными скоростями и на различных расстояниях друг от друга, так, что скорости автомобилей и временные интервалы между ними, зафиксированные в случайный момент времени, являются случайными величинами. Поэтому автомобильное движение можно рассматривать как процесс, по своей физической природе имеющий вероятностный характер. Поток автомобилей является простейшим потоком однородных событий.

Предположим, что когда для одной полосы загорается красный свет, зеленый свет для второй полосы загорается спустя некоторое время, чтобы «проскочивший» автомобили успели проехать. Автомобили, поступающие в систему, либо пересекают перекресток (получают обслуживание как запросы), если проезд свободен и горит зеленый свет, либо становятся в очередь у перекрестка. Предположим, что водители не едут на красный свет, даже если на пересекающей полосе пусто.

Обслуживание автомобиля представляет собой проезд через перекресток. В рамках данной модели примем это время одинаковым для всех автомобилей и равным  $T$ . Исходя из вышеизложенного, сле-

дует вывод, что поведение транспортного потока на перекрестке можно описать с помощью одноканальной (или многоканальной) системы массового обслуживания (СМО) с неограниченным временем ожидания по методу особых состояний.

Используя данный метод, можно оценить среднюю длину очереди, т.е. выяснить образуются ли пробки на данном участке дороги. А также регулировать продолжительность цикла и длительность зеленого света в рамках одного цикла. Тогда такая СМО будет иметь следующие характеристики:

1) интенсивность заявок  $\lambda$  – интенсивность движения транспортных средств  $N$ , авт/с;

2) дисциплина очереди – первый пришел – первый обслуживаешься;

3) четкий механизм обслуживания – при структуре цикла регулирования:

$$T_c = t_{O1} + t_{P1} + t_{O2} + t_{P2} + \dots + t_{Ok} + t_{Pk}$$

интенсивность обслуживания определится:

$$\mu = t_{Oi} / (T_c t_{obsl}),$$

где  $t_{obsl}$  – время обслуживания одного автомобиля, с;  $t_{Oi}$  – продолжительность разрешающего сигнала для  $i$ -го направления, с.

Стационарный режим функционирования данной системы массового обслуживания существует при  $t \rightarrow \infty$  для любого  $n = 0, 1, 2, \dots$  и когда  $\lambda < \mu$ . Система алгебраических уравнений, описывающих работу данной СМО, имеет вид:

$$\begin{cases} \lambda \cdot P_0 + \mu \cdot P_1 = 0, & n = 0; \\ \lambda \cdot P_{n-1} + \mu \cdot P_{n+1} - (\lambda + \mu)P_n, & n = 0, \end{cases}$$

где  $P_0$  – вероятность того, что перекресток свободен для движения и заявок не поступает;  $P_1$  – вероятность того, что перекресток обслуживает один автомобиль, очереди нет;  $P_2$  – вероятность того, что перекресток обслуживает один автомобиль, очередь – один автомобиль;  $P_n$  – вероятность того, что перекресток обслуживает один автомобиль, очередь –  $n - 1$  автомобилей.

Решение данной системы уравнений имеет вид:

$$P_n = (1 - v) \cdot v^n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

где  $v = \lambda / \mu < 1$ .

Среднее число находящихся в системе заявок на обслуживание:

$$L_S = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P_n = \frac{v}{1-v}.$$

Среднее число заявок в очереди на обслуживание:

$$L_Q = L_S - \frac{\lambda}{\mu} = \frac{v^2}{1-v}.$$

Средняя продолжительность пребывания автомобиля в очереди:

$$W_Q = \frac{L_Q}{\lambda} = \frac{1}{\mu(1-v)}.$$

Средняя продолжительность пребывания заявки в системе:

$$W_S = \frac{L_S}{\lambda} = \frac{1}{\mu(1-v)}.$$

Решение задачи оптимизации циклов светофорного регулирования сводится к линейному программированию. Ограничения, накладываемые на структуру цикла регулирования, следующие:

$$\begin{cases} t_{O1} > 7; \\ t_{O2} > 7; \\ t_{O1} > t_{pesh1}; \\ t_{O2} > t_{pesh2}; \\ t_{O1} + t_{O2} < 120 - T_p; \\ (1 - \lambda_1 t_{obsl})t_{O1} - \lambda_1 t_{obsl}t_{O2} > \lambda_1 t_{obsl} T_C; \\ (1 - \lambda_2 t_{obsl})t_{O2} - \lambda_2 t_{obsl}t_{O1} > \lambda_2 t_{obsl} T_C. \end{cases}$$

Последние 2 неравенства учитывают тот факт, что интенсивность обслуживания должна быть меньше интенсивности движения.

Целевая функция – минимальная средневзвешенная задержка на перекрестке:

$$\frac{\lambda_1^2}{\mu_1^2 (1 - \lambda_1 / \mu_1)} + \frac{\lambda_2^2}{\mu_2^2 (1 - \lambda_2 / \mu_2)} = \bar{t} \rightarrow \min.$$

После описания перекрестка как СМО и определения характеристик данной СМО средствами САПР MathCAD написана моделирующая программа, описывающая работу «проблемного» в плане автомобильных заторов перекрестка на пересечении улиц Сумской и переулка Мечникова – Бурсацкого спуска.

В результате моделирования работы перекрестка согласно статистическим данным [15] в течение получаса подсчитано число машин, проследовавших в каждом направлении, определены средняя и максимальная длины очередей машин для каждого направления движения:

**k** – кол-во имитаций;

**count\_X** – кол-во машин, преодолевших перекресток в сторону улицы X;

**sred\_X\_Y** – средняя длина очереди машин, движущихся по направлению X-Y;

**max\_X\_Y** – максимальная длина очереди машин, движущихся по направлению X-Y.

Результаты моделирования приведены в табл. 1.

По результатам моделирования видно, что направление А-С является «проблемным» в плане образования заторов в рамках функционирующего жесткого цикла светофорного управления, т.к. очередь порядка 30 автомобилей не может быть обслужена в течение 20 секунд.

Решением проблемы видится использование адаптивного светофорного управления с подстраиваемыми циклами регулирования.

Ниже (рис. 2) приводится общий алгоритм регулирования движения на перекрестке, использующий гибкую схему управления, с «подстройкой» красного сигнала.

Результаты моделирования

	k=100	k=200	k=300	k=400	k=500	k=1000
count_A	176,95	176,73	177,133	177,047	177,042	176,949
count_B	246,25	245,645	244,98	245,055	244,36	246,085
count_C	290,73	291,41	290,757	290,925	290,996	290,934
count_D	176,73	176,41	177,527	177,163	177,358	176,646
sred_A_D	2,023	2,022	2,043	2,051	2,043	2,039
sred_A_C	6,181	6,246	6,236	6,298	6,142	6,166
sred_A_B	1,452	1,455	1,443	1,446	1,434	1,45
sred_C_A	1,969	1,976	1,986	1,979	1,985	1,977
sred_C_B	1,366	1,363	1,351	1,353	1,354	1,357
max_A_D	7	8	9	10	9	10
max_A_C	36	28	33	30	37	31
max_A_B	7	9	9	9	8	9
max_C_A	5	5	5	5	5	5
max_C_B	5	5	5	5	5	5

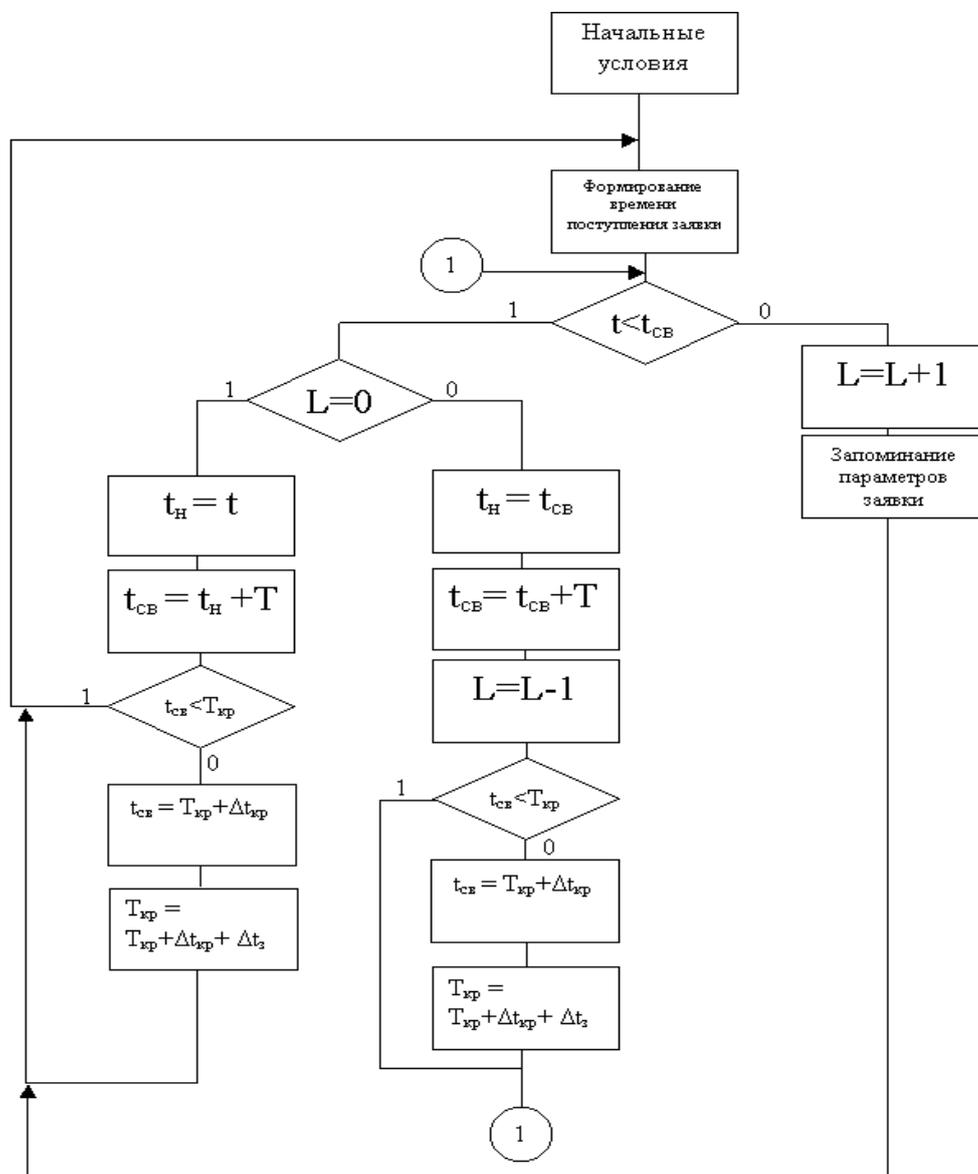


Рис. 2. Общий алгоритм регулирования движения на перекрестке, использующий гибкую схему управления, с «подстройкой» красного сигнала

Условные обозначения на рис. 2:

$t$  – время поступления заявки;

$T_{кр}$  – начальная длительность красного сигнала;

$\Delta t_{кр}$  – длительность «подстройки» красного сигнала;

$\Delta t_3$  – длительность зеленого сигнала;

$t_{св}$  – время освобождения проезда на перекрестке;

$t_{н}$  – время выезда автомобиля на перекресток (начало обслуживания);

$T$  – время обслуживания (время проезда через перекресток – для всех автомобилей принимается одинаковым);

$L$  – длина очереди автомобилей перед светофором;

$n$  – количество циклов светофора.

Проиллюстрированный алгоритм может быть реализован в качестве программы средствами САПР MATLAB, MathCAD, ЯВУ и др.

В итоге, согласно поставленной задаче разработана общая модель «умного светофора», как аппаратно-программного комплекса, перспективного для разработки в современных реалиях и интересно для разработчика.

### Список литературы

1. Электронный журнал «Мембрана». [Электронный ресурс]. – Режим доступа к журналу: <http://www.membrana.ru/articles/global/2006/11/14/202800.html>.
2. Информационное агентство «Бета». [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [http://beta.aif.ru/news/detail\\_prnid\\_dta83045.html](http://beta.aif.ru/news/detail_prnid_dta83045.html).
3. Электронная энциклопедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [http://en.wikipedia.org/wiki/Shared\\_space](http://en.wikipedia.org/wiki/Shared_space).
4. Информационное агентство «Канал НТВ». [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.ntv.ru/novosti/174909>.
5. Информационное агентство «Утро.ру». [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.utro.ru/articles/2004/05/18/309173.shtml>.

6. Электронный журнал «Мембрана». [Электронный ресурс]. – Режим доступа к журналу: <http://www.membrana.ru/lenta/?5062>.

7. Электронный журнал «Тревел». [Электронный ресурс]. – Режим доступа к журналу: <http://www.travel.ru/news/2007/04/16/108541.html>.

8. Электронная газета «Stern». [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.stern.de/wissen/technik/feldversuch-travolution-nie-mehr-ander-ampelwarten-586646.html>.

9. Кременец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения / Ю.А. Кременец. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2005.

10. Черноморец М.В. Организация автоматизированной системы управления движением в городе Харькове / М.В. Черноморец, А.А. Галькевич // Міжнародна науково-технічна конференція "Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2008": Тези доповідей. Т. 2. – Х.: Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2008. – 288 с.

11. Вытяжков Д.В. Целевой поиск управляющих параметров светофорной сигнализации в автоматизированной системе управления дорожным движением / Д.В. Вытяжков // Сборник научных трудов. Серия "Естественнонаучная". – Ставрополь: СевКавГТУ, 2004. – №1 (7). – С. 24-27.

12. Вовк О.Л. Исследование трудноформализуемых алгоритмов нечёткого управления в системах управления объектами / О.Л. Вовк. – Донецк: ДНГУ, 2002.

13. Форд Л.Р. Поток в сетях / Л.Р. Форд, Д.Р. Фалкерсон. – М.: Мир, 1966.

14. Кликовитейн Г.И. Организация дорожного движения: учеб. для вузов / Г.И. Кликовитейн, М.Б. Афанасьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 2001.

15. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.gai.kharkov.ua/shema/index.htm>.

Поступила в редколлегию 19.11.2009

**Рецензент:** канд. техн. наук, доц. М.И. Сидоренко, Национальный аерокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА ПЕРЕХРЕСТІ

М.В. Черноморець, А.А. Галькевич

У даній роботі розглядається один з перспективних напрямів автоматизації – автоматизація управління транспортними потоками на перехресті. Проводиться дослідження засобів регулювання транспортних потоків на перехресті, пропонується новий метод регулювання за допомогою так званого «розумного світлофора».

**Ключові слова:** «розумний світлофор», АСУД, АСУТП, адаптивне регулювання руху, СМО, інтенсивність, математичне очікування.

### RESEARCH OF FACILITIES OF AUTOMATION OF TRANSPORT ADJUSTING STREAMS ON CROSSING

M.V. Chernomorets, A.A. Gal'kevich

In this work one of perspective directions automation is examined is automation of management transport streams on crossing. Research of facilities of adjusting of transport streams is conducted on crossing, the new method of adjusting is offered by the so-called «clever traffic-light».

**Keywords:** «clever traffic-light», data automatic control system, industrial control, adaptive traffic regulation, queue system, intensity, expected value.