

## Список использованных источников

1. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: Справочник. Пер. с англ. / В. У. Рэнкин, П. Клафи, С. Халюерт и др. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.
2. Бадд Т. Объектно-ориентированное программирование в действии / Пер. с англ. – СПб.: 1997. – 464 с.
3. Клинковштейн Г.И. Организация дорожного движения. – М.: Транспорт, 1975. – 192 с.
4. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. М.: МЦНМО, 2001. – 960 с.
5. Кремснец Ю.А. Технические средства организации дорожного движения. – М.: Транспорт, 1999. – 255 с.
6. Михеева Т.И., Михеев С.В. Модели наследования в системе управления дорожным движением // «Информационные технологии» 2001 г.

УДК 681.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ

Михеев С.В., Михеева Т.И.

При описании организации управления транспортными потоками можно выделить несколько уровней, на каждом из которых решаются определенные задачи. *На первом*, самом нижнем, решаются задачи локального управления, *на втором и третьем* - задачи координированного управления с выработкой управляющих воздействий для сети перекрестков через длительные, по сравнению с локальными, промежутки времени (15-20 мин).

Задачи системного управления транспортными потоками (ТП) взаимосвязаны между собой. В результате решения задачи высокого уровня определяется область ограничений для задач нижнего уровня. На задачи локального управления накладываются ограничения, определяемые на втором уровне переключения светофорных сигналов. На задачи второго уровня накладываются ограничения по циклу, определяемые в результате решения задач синхронизации программ координации. В свою очередь, задачи второго и третьего уровней решаются с учетом ограничений, выработываемых на верхних уровнях.

Конечная задача локального управления - переключение светофорных сигналов в зоне одного перекрестка - может быть разделена на несколько частных задач, решаемых в следующей последовательности /1, 4/:

✓ фазообразование - формирование фаз управления, т.е. совокупностей неконфликтующих направлений, по которым могут двигаться ТС на перекрестке;

✓ компоновка фаз - формирование последовательности включения фаз управления;

- ✓ коррекция длительностей - формирование длительностей фаз управления;
- ✓ формирование переходных интервалов, в течение которых происходит смена фаз управления.

**Фазообразование.** Данная задача является первой в общей структуре локального управления, и оценить качество ее решения по конечному показателю функционирования ТП (например, по длительности задержки) без решения остальных задач затруднительно. Поэтому за критерий оценки качества фазообразования целесообразно принять показатели, косвенно связанные с конечными, но оптимизируемые в процессе фазообразования. Такими показателями могут быть общее число фаз управления на перекрестке и уровень загрузки фазы транспортными средствами. Естественными являются минимизация первого показателя и максимизация второго. Сократив число фаз, можно уменьшить число переходных интервалов, а увеличение загрузки фазы повышает пропускную способность перекрестка. Это обеспечивает качество управления ТП.

**Компоновка фаз.** Простейшим примером компоновки фаз является пропуск фазы в цикле управления при отсутствии на соответствующих направлениях движения транспортных средств (ТС) или пешеходов. Возможны включения в цикл специальных фаз, рассчитанных на пропуск отдельных видов ТС - трамвая, специального автомобиля. Более редким является изменение последовательности фаз в цикле в зависимости от характера поступления ТС по отдельным направлениям. Увеличение числа фаз значительно увеличивает число промежуточных тактов. Для свободной компоновки заранее предусмотренных фаз и необходима реализация  $n*(n-1)$  промежуточных тактов.

**Формирование длительностей фаз управления.** Алгоритмы адаптивного формирования длительностей фаз в пределах установленных ограничений относятся к наиболее разработанным. Можно выделить следующие группы алгоритмов /2, 3/:

1. использующие «библиотеку» сигнальных программ;
2. корректирующие базовую сигнальную программу в соответствии с изменением транспортной ситуации;
3. поиска разрывов в транспортных потоках;
4. основанные на анализе характеристик ТП.

Алгоритмы первой группы периодически выбирают из «библиотеки» и включают на перекрестке сигнальную программу, наилучшим образом соответствующую ситуации. Выбор программы производится по результатам анализа изменений реальной ситуации на перекрестке. Эти алгоритмы рационально использовать для перекрестков с мало изменяющейся ситуацией или с ситуацией, изменяющейся по времени суток.

Алгоритмы второй группы корректируют сигнальные программы достаточно редко (1 раз за несколько циклов управления). Корректируют

ся времена горения зеленых сигналов фаз сигнальной программы. При этом схема организации движения не изменяется. Перераспределение времен горения зеленых сигналов производится на основе формулы Вебстера /8/ с учетом средних (за несколько предыдущих циклов управления) интенсивностей поступления ТС на направления перекрестка. Адаптивность этой группы алгоритмов выше, чем адаптивность алгоритмов первой группы, но ограничена невозможностью корректировки в реальном масштабе времени. Эти алгоритмы целесообразно использовать лишь на изолированных перекрестках, достаточно удаленных от близлежащих, т.к. поступления автомобилей на перекрестки не имеют выраженных периодических максимумов.

Алгоритмы третьей группы осуществляют переключение светофорной сигнализации при нахождении заданного (или рассчитываемого в процессе управления) интервала между ТС на включенных направлениях. Эти алгоритмы эффективнее алгоритмов двух первых групп, особенно в диапазоне малых интенсивностей движения и для перекрестков простой геометрии. В интервале от  $g_{\min}$  до  $g_{\max}$  ( $g_{\min}$  и  $g_{\max}$  — ограничения времени горения зеленого сигнала) решение о переключении принимается ежесекундно, т.е. управление ведется в реальном масштабе времени. Недостатком алгоритмов третьей группы является резкое падение их эффективности при увеличении интенсивности поступления ТС, т.е. при уменьшении дисперсии интервалов прибытия автомобилей на направления перекрестка.

Алгоритмы четвертой группы используют больший, чем у алгоритмов предыдущих групп, набор управляющих воздействий. Для всех контролируемых направлений перекрестка регистрируются и анализируются разрывы в транспортных потоках, запросы закрытых направлений и текущие задержки ТС на закрытых направлениях. Основное отличие алгоритмов четвертой группы от предыдущих состоит в том, что при корректировке сигнальной программы анализируются характеристики транспортной ситуации, зависящие от управления. Показателем эффективности может служить отношение числа автомобилей, пересекающих стоп-линии за время горения зеленого сигнала, к времени горения зеленого сигнала.

Большой интерес представляют алгоритмы четвертой группы, управляющие в реальном масштабе времени, когда решение о необходимости переключения принимается ежесекундно. При управлении по этому алгоритму (для двух конфликтных направлений) решение о переключении принимается в том случае, когда это переключение минимизирует суммарную задержку ТС на перекрестке для следующего малого интервала времени. К недостаткам алгоритмов четвертой группы, управляющих в реальном масштабе времени, следует отнести то, что ТП анализируются только на текущий момент времени.

Даже краткий обзор существующих в настоящее время алгоритмов адаптивного формирования длительностей фаз управления дает представление о многообразии этих алгоритмов. Следует отметить, что в рамках системного координированного управления данные алгоритмы функционируют в достаточно малых интервалах времени. Однако их усложнение, требующее увеличения аппаратных и вычислительных мощностей, может не обеспечить улучшение показателей функционирования.

**Оценка эффективности локального управления.** Структурная схема модуля локального управления транспортными потоками автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД) /5, 6, 7/ представлена на рисунке, где состояние транспортного потока характеризуется вектором  $\bar{Y}$ , управляющее воздействие - вектором  $\bar{U}$  и возмущающее воздействие среды - вектором  $\bar{Z}$ .

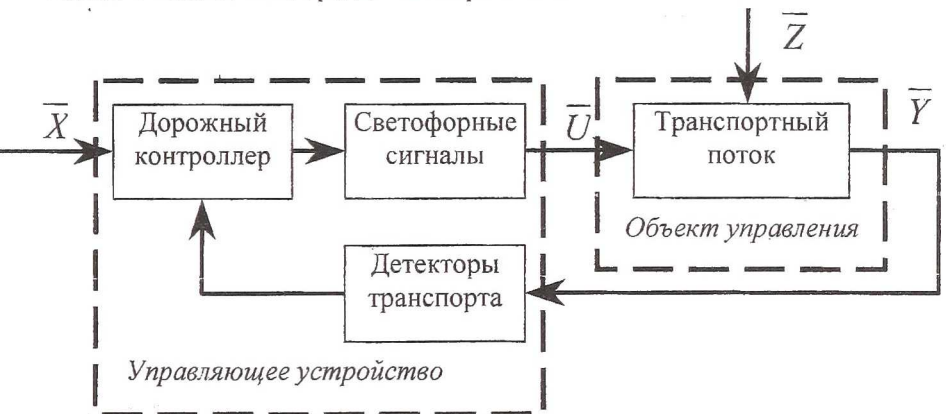


Рисунок 1 - Структурная схема модуля локального управления ТП АСУДД

На вход управляющего устройства задается воздействие, содержащее информацию о цели управления, т.е. требуемом значении  $\bar{Y}^*$ . При задании цели управления  $\bar{X} = \bar{Y}^*$  под воздействием управляющих сигналов  $\bar{U}$  транспортный поток преобразуется:

$$\bar{Y} = f'(\bar{U}, \bar{P}), \quad (1)$$

где  $f'$  – функция объекта управления;

$\bar{P}$  – параметры транспортного потока, определяющие конкретный вид связи между входом и выходом. Управляющее устройство реализует преобразование:

$$\bar{U} = f''(\bar{Y}^*), \quad (2)$$

которое определяется алгоритмом управления.

Если требуемое состояние  $\bar{Y}^*$  и полученное  $Y$  достаточно близки друг к другу, т.е.

$$\bar{Y}^* \approx \bar{Y}, \quad (3)$$

то в общем случае система локального управления транспортными потоками работает удовлетворительно.

Очевидно, что для выполнения условия (3) необходимо обеспечить равенство

$$Y = f'[f''(\bar{Y}^*), \bar{P}].$$

Эффективность локального управления ТП оценивается степенью приближения  $\bar{Y}$  к  $\bar{Y}^*$ , предельное значение эффективности определяется равенством этих значений. Широко используемые в настоящее время алгоритмы программного управления рассчитаны на стабильность ТП, т.е. на постоянство  $f'$  и  $\bar{P}$ . Поэтому, изменение любого из них приводит к нарушению условия (3) и, в связи с этим, к резкой потере эффективности управления. В то же время, существующие алгоритмы адаптивного управления носят, как правило, эмпирический характер и построены на элементарных принципах, что приводит в ряде случаев к грубому равенству  $\bar{Y}$  и  $\bar{Y}^*$ .

В настоящее время в связи с развитием элементной базы появились дополнительные возможности в повышении эффективности управления ТП за счет перехода к реальному масштабу времени, позволяющему в рамках существующих ограничений приблизить значения  $\bar{Y}$  к  $\bar{Y}^*$ .

**Оптимизация процесса локального управления.** Функционирование перекрестка описывается следующими характеристиками:

- ✓ скоростью изменения переменных состояния  $dY_n / dt$ ;
- ✓ множеством допустимых состояний ТП  $Y_n$ ;
- ✓ множеством допустимых управлений  $U_n$ ;
- ✓ алгоритмом перехода из одного состояния в другое в соответствии с выбранным методом управления  $\bar{Y}(n+1) = f\{\bar{Y}(n), U(n)\}$ ;
- ✓ функцией цели  $F(Y)$ .

Система дифференциальных уравнений, позволяющая связать перечисленные данные управляемого перекрестка и, следовательно, являющаяся его аналитической моделью, записывается следующим образом:

$$\forall_i t: N_i(t) \geq 0 \quad \frac{dN_i(t)}{dt} = V_i(t) - S_i(t)U_i(t); N_i(0) = N_i^0, \quad (4)$$

где  $N_i(t)$  - число ТС в очереди;

$V_i(t)$  - число прибывающих ТС;

$S_i(t)$  - поток насыщения по  $i$ -му направлению;

$U_i(t)$  - управляющая функция, принимающая в момент времени  $t$  значение 1 при зеленом сигнале и 0 - при красном.

На основе полученной модели управляемого перекрестка, руководствуясь поставленной задачей по определению областей оптимального применения управляющих алгоритмов, необходимо найти такой метод управления транспортными потоками, который обеспечивал бы оптимум функции цели, т.е. в соответствии с выбранным критерием оценки эффективности управления, - минимум средней задержки  $d$ .

Функция цели может быть задана суммой оценочных функций  $d_n\{\bar{Y}(n), \bar{Y}(n+1)\}$ , получаемых при каждом переходе из состояния  $\bar{Y}(n)$  в состояние  $\bar{Y}(n+1)$

$$F(Y) = \sum_{n=0}^{T-1} d_n\{\bar{Y}(n), \bar{Y}(n+1)\}. \quad (5)$$

Функцию цели можно считать функцией от управления, поскольку любой допустимый алгоритм управления полностью определяет последовательность допустимых управлений  $U = (U_0, U_1, \dots, U_{T-1})$ .

**Сформулируем задачу оптимизации:** необходимо определить последовательность управлений  $U = (U_0, U_1, \dots, U_{T-1})$  минимизирующую функцию цели

$$F\{Y(U)\} = \sum_{n=0}^{T-1} d_n\{\bar{Y}(n), \bar{Y}(n+1)\} \quad (6)$$

при выполнении условий:

$$Y(n+1) = f\{Y(n), U(n)\}$$

$$Y(n) \in Y_n; Y(0) = Y_0;$$

$$U(n) \in U_n; n = 0, 1, \dots, T-1. \quad (7)$$

Если максимальное значение функционала  $\sum_k^{T-1} Q_m$  для  $\{y(m)\}; \{u(m)\}; m = k+1, \dots, T$ , удовлетворяющих условиям задачи, обозначить через  $F_k\{y(k)\}$ , то, применяя последовательно принцип оптимальности к функциям  $F_1, F_2$  и т.д., можно написать систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 F_0\{Y(0)\} &= \min_{U(0)}[d_0\{Y(0), Y(1)\} + F_1\{Y(1)\}]; \\
 F_1\{Y(1)\} &= \min_{U(1)}[d_1\{Y(1), Y(2)\} + F_2\{Y(2)\}]; \\
 &\dots \\
 F_i\{Y(i)\} &= \min_{U(i)}[d_i\{Y(i), Y(i+1)\} + F_{i+1}\{Y(i+1)\}]; \\
 &\dots \\
 F_{T-1}\{Y(T-1)\} &= \min_{U(T-1)}[d_{T-1}\{Y(T-1), Y(T)\}].
 \end{aligned} \tag{8}$$

Таким образом, решение задачи оптимизации сводится к решению системы функциональных уравнений, что требует большого объема вычислений. Поэтому целесообразно исследование системы, описываемой уравнением (4), осуществить с помощью имитационного моделирования [5, 6].

#### Список использованных источников

1. Брайловский Н.О., Грановский Б.И. Управление движением транспортных средств. М.: Транспорт, 1976. 112 с.
2. Вальц В.К. Исследование закономерностей движения автомобильных потоков на городских улицах и дорогах: Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. - Челябинск, 1970. - 27с.
3. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. М., Транспорт, 1972. - 424 с.
4. Клиновштейн Г.И. Организация дорожного движения. - М.: Транспорт, 1982. 240 с.
5. Михеев С.В. Автоматизированное управление дорожным движением / VIII Международная научная конференция «Математика. Компьютер. Образование» // Тезисы докладов. - Пушкино, 2001. - С. 195.
6. Михеева Т.И., Михеев С.В. Модели наследования в системе управления дорожным движением // «Информационные технологии» 2001 г.
7. Михеев С.В., Михеева Т.И., Золотовицкий А.В. Автоматизированная система контроля и управления дорожным движением // В кн. Математика. Компьютер. Образование - Дубна: МГУ, - 2000. - С. 207-214.
8. Webster F.V. Traffic signal settings. British road res. Lab. Tech. Paper. - London, 1958, № 39. 45 p.

УДК 681.3

## РАСЧЕТ ПРОГРАММ КООРДИНАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ

Михеев С.В.

За последние годы проводилось широкое исследование проблемы координированного управления транспортными потоками (ТП) [1, 2, 4, 5]. Накопленный материал позволил установить некоторые закономерности изменения физических характеристик ТП. Схема управления должна быть