

## ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ КООРДИНИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА МАГИСТРАЛИ С Т-ОБРАЗНЫМИ ПЕРЕКРЕСТКАМИ

*Канд. техн. наук, доц. ШУТЬ В. Н.*

*Брестский государственный технический университет*

Постоянный и непрерывный рост автотранспортных средств (АТС) населения, рост объема перевозок ведут к транспортной проблеме: возникновению пробок, увеличению числа ДТП, загрязнению окружающей среды и т. д. Наиболее ощутимо она проявляется в узловых точках улично-дорожной сети. Повсеместно увеличиваются транспортные задержки, образуются очереди и заторы, что вызывает снижение скорости сообщения, перерасход топлива, повышение износа узлов и агрегатов АТС, ухудшается психофизическое состояние водителей ТС.

Частично сгладить проблему позволяет координированное регулирование, цель которого – обеспечение безостановочного движения ТС вдоль улицы или магистрали. Координация работы светофоров на соседних перекрестках обеспечивает уменьшение количества остановок, торможений и разгонов в потоке, а также транспортных задержек.

Очень часто эффективность координированного регулирования невысокая. Случайный характер скоростей и ускорений автомобилей в потоке, приводящий к диффузии пачек автомобилей, вызывает серьезные затруднения в управлении движением. По мере движения АТС на перегоне между двумя светофорными объектами (СФО) края отдельных пачек значительно размываются, пачки диффузируют друг в друга. Только постоянная форма пачек автомобилей и неизменность их скоростей позволили бы точно предсказать моменты прохождения ими перекрестков и составить оптимальную программу работы светофоров [1].

Опыт разработки и эксплуатации программ координации показывает, что не все АТС беспрепятственно могут проехать по координированной магистрали. Задержки АТС перед СФО неизбежны. Возникает вопрос: является диффузия АТС единственной причиной задержек или есть нечто иное, что принципиально делает неразрешимой задачу беспрепятственного, безостановочного прохода АТС по координированной магистрали?

Чтобы ответить на поставленный вопрос, абстрагируемся в предлагаемой модели от диффузии, т. е. исключим ее. Все сформированные светофором пачки АТС идут в дальнейшем по магистрали компактно с одинаковой скоростью. Это первое положение модели.

Объектом исследования является транспортная магистраль, вдоль которой разноудаленно расположены  $(Z + 1)$  Т-образных перекрестка. Магистраль и все примыкающие дороги с перекрестков являются односторонними. Направления движения отмечены стрелками (рис. 1). Расстояния между перекрестками  $0, 1, \dots, Z$  соответственно равны  $L_1, L_2, \dots, L_Z$ . Перекрестки оборудованы светофорами, работающими по двухфазному светофорному циклу. В качестве минимального временного дискрета  $\Delta t$  примем продолжительность зеленого сигнала (ЗС) на пересекающей магистраль дороге.

Отнесем время желтого сигнала светофора  $t_{ж1}$  ко времени красного сигнала  $t_{ж2}$  в светофорном цикле (СФЦ). Примем в качестве минимального временного дискрета продолжи-

тельность зеленого сигнала на боковой к магистрали дороге, т. е.  $t_3 = \Delta t$ .

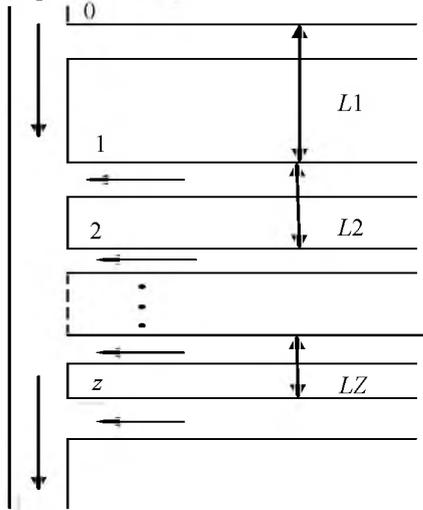


Рис. 1. План магистрали с прилегающими Т-образными регулируемыми перекрестками

Продолжительность красного сигнала (совместно с желтым) сделаем кратной ТЗ

$$t_3 = kt_x,$$

где  $k$  – коэффициент кратности (целое натуральное число). Таким образом, продолжительность светофорного цикла

$$C = t_3 + t_x = (k + 1)t_3. \quad (1)$$

Аналогичным образом введем дискрет расстояния  $\Delta l$ . В качестве этой величины возьмем  $\Delta l = v\Delta t = vt_3$ , где  $v$  – допустимая скорость движения по магистрали. Сделаем некоторые допущения. Примем, что все расстояния между перекрестками кратны дискрету расстояния  $\Delta l$ . Тогда расстояние  $l_i$  между двумя перекрестками  $(i - 1)$  и  $i$  ( $i = 1, \dots, Z$ )

$$l_i = p\Delta l = pvt_3, \quad (2)$$

где  $p$  – целое натуральное число.

На рис. 2 приведена структурная схема дискретного управления светофорными объектами. Светофорный объект на  $i$ -м перекрестке ( $i = 0, \dots, Z$ ) может быть представлен двумя ключами  $K_{i1}$  и  $K_{i2}$ . Ключ  $K_{i1}$  открывает либо закрывает движение транспорта на  $(i, i + 1)$  перегоне магистрали. Ключ  $K_{i2}$  открывает либо закрывает поступление транспорта на магистраль с второстепенной дороги  $D_i$ .

Управление ключами осуществляется с регистра состояния магистрали. В регистр заносится двоичный вектор  $P_j = (\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_i, \dots, \delta_Z)$ ,  $j = 1, \dots, 2Z + 1$ ;  $\delta_i = 0, 1$  ( $i = 0, \dots, Z$ ), каждый разряд которого управляет соответствующим перекрестком. Управление осуществляется парофазным сигналом, т. е. если один из пары ключей, например  $K_{i1}$ , открыт, то ключ  $K_{i2}$  закрыт, и наоборот. Комбинация открытых и закрытых ключей характеризует состояние, в котором находится магистраль. Последнее однозначно определяется вектором  $P_j$ . Смена вектора  $P_j$  в регистре по команде с управляющего компьютера изменяет состояние и режим движения по магистрали, а также на второстепенных дорогах  $D_0 - D_Z$ .

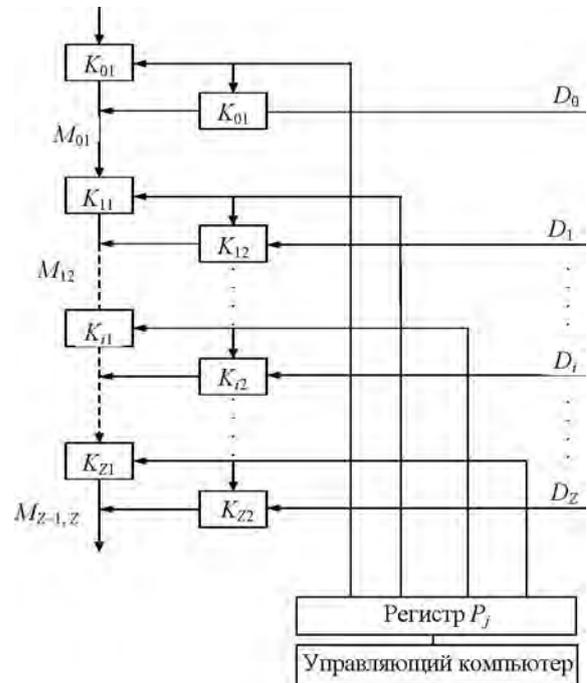


Рис. 2. Структурная схема дискретного управления светофорными объектами

Единичному уровню  $i$ -го разряда ( $\delta_i = 1$ ) регистра  $P_j$  соответствует открытое состояние ключа  $K_{i1}$ , т. е. проход через  $i$ -й перекресток магистрали открыт, в противном случае ( $\delta_i = 0$ ) перекресток закрыт по магистрали и открыт с второстепенной дороги  $D_i$ .

Рассмотрим процесс наполнения автотранспортом (АТ) магистрали в утренние часы. Исходным состоянием магистрали является состояние  $S_0$  – отсутствие АТ. В то же время на боковых дорогах достаточно автотранспорта

для того, чтобы в момент открытия на время  $\Delta t = t_3$  с любого бокового направления в магистраль поступило бы  $n$  единиц АТ.

С некоторым огрублением будем считать, что пачка из  $n$  автомобилей, поступившая в магистраль за дискрет времени  $\Delta t = t_3$ , пройдет по магистрали от исходного перекрестка на расстояние дискрета расстояния  $\Delta l = v\Delta t = vt_3$ .

Построим в масштабе диаграмму состояния магистрали в дискретные моменты времени. Для этого по оси абсцисс откладываем временные промежутки длительностью  $\Delta t = t_3$ , а по оси ординат – дискреты расстояний  $\Delta l$ , пройденные пачкой из  $n$  автомобилей по магистрали за дискрет времени  $\Delta t$ . Масштаб для  $\Delta t$  и  $\Delta l$  выбран таким образом, чтобы на диаграмме состояний они имели равные длины (например, одна клетка).

На рис. 3 представлена диаграмма состояний магистрали для пяти разноудаленных перекрестков и на временном интервале в 17 дискретов времени при  $k = 2$ . При этом использованы только два вектора управления  $P_j$  ( $j = 1, 2$ ). Первый вектор состоит из всех нулей и находится в регистре  $P_j$  время  $t_3$ . За это время в магистраль эмиттируется  $(Z + 1)$  пачка АТ, которая успевает пройти по магистрали расстояние  $\Delta l$ . Магистраль переходит из состояния  $S_0$  в состояние  $S_1$ , характеризующееся наличием пяти пачек по  $n$  автомобилей (первый столбец на рис. 3). Здесь и в дальнейшем под состоянием магистрали  $S_r$  будут пониматься количество пачек АТС в момент времени  $t_r$  и их состав, т. е. с каких перекрестков они поступили. В столбце 1 от 0 до 4 пронумерованы пачки с соответствующих перекрестков. От каждого перекрестка по одной пачке из  $n$  АТС. Затем в регистр  $P_j$  заносится вектор  $P_1$ , состоящий из одних единиц. Этим вектором на всех светофорах магистрали зажигается зеленый сигнал, а на боковых дорогах – красный сигнал. Идет этап транзитного пропуска АТ по магистрали.

Автомобили, движущиеся по магистрали, подразделяют на транзитные и внепачковые [2]. В детерминированной модели все АТС появляются транзитными. Процесс управления движением пачек четко детерминирован. Эффект «размывания» пачек [2] на перегонах в модели не учитывается.

Таким образом, во временные промежутки 0–1, 3–4, 6–7 и т. д. происходит эмиссия АТС в магистраль с боковых направлений, что частично только для двух перекрестков 0 и 1 отмечено на рис. 3 наклонными стрелками. В промежутках 1–3, 4–6, 7–9 и т. д. все светофоры по магистрали имеют зеленую фазу. Поток АТС беспрепятственно пересекает перекрестки.

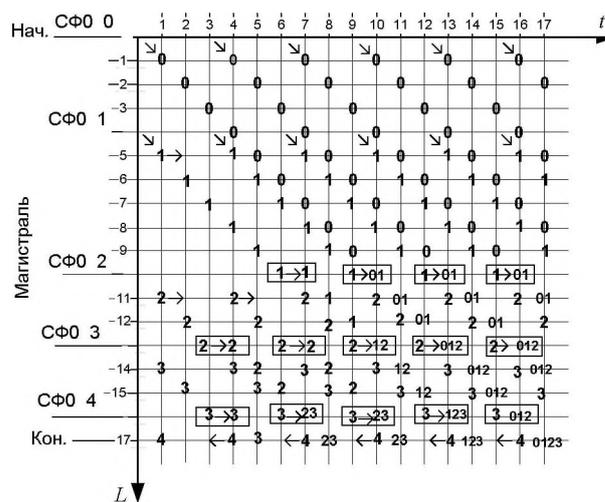


Рис. 3. Диаграмма состояний магистрали при двух управляющих векторах  $P_1$  и  $P_2$

Состояния магистрали  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$  эквивалентны, так как на магистрали находится равное и постоянное число пачек (по пять). Состояние  $S_4$  характеризуется уже девятью пачками по  $n$  автомобилей в каждой пачке, так как в момент времени  $t_4$  произошла эмиссия АТС с боковых направлений. Следует отметить, что эмиссия выполняется не одновременно, а в промежутке между  $t_3$  (начало) и  $t_4$  (конец). То есть в момент  $t_3$  включается зеленая фаза на боковых к магистрали направлениях, а в момент  $t_4$  она заканчивается.

Любая пачка  $P_i(t, l)$  ( $i = 0, \dots, Z$ ) АТС однозначно определяется на диаграмме состояний магистрали (рис. 3) двумя координатами – временем  $t$  и расстоянием  $l$  от точки отсчета (начало магистрали). По столбцу диаграммы состояний магистрали можно определить число пачек АТС, находящихся на магистрали в текущий момент времени, а также число пачек на любом перегоне и их структуру, т. е. с какого перекрестка они эмиттировались в магистраль и в какое время.

Фактическим концом магистрали является последний светофорный объект. Поэтому таблицу состояний магистрали ограничим снизу линией «кон» (на  $\Delta l$  дальше по магистрали от последнего светофора). Тогда минимальная таблица состояний магистрали будет квадратом, так как по условию масштабирования принято  $|\Delta l| = |\Delta t|$  (одна клетка). Движение  $P_i$  пачки АТС в рамках очередного квадрата выполняется по диагонали. Приращению  $\Delta t$  соответствует  $\Delta l$ . Поэтому пачка АТС, например  $P_1$  (1, 5), в момент времени  $t = 6$  ч (рис. 3) окажется перед светофором № 2, который будет закрыт, так как в промежуток времени 6–7 он открыт по второстепенной дороге. В этот момент на нем формируется пачка  $P_2$  (7, 11). Транзитная пачка  $P_1$  (6, 10) задержится перед светофором на время  $\Delta t$  и перейдет в состояние  $P_1$  (7, 10). На рис. 3 этот переход очерчен прямоугольником.

В дальнейшем пачка АТС  $P_1$  (7, 10) движется без задержек до конца магистрали «кон». В процессе движения на светофоре № 3 к ней присоединяется  $P_2$  (9, 13), которая была вынуждена ожидать время  $\Delta t$  перед красным сигналом светофора № 3. Две спаренные пачки  $P_1$  (10, 13) и  $P_2$  (10, 13) движутся до светофора № 4, где к ним присоединится пачка  $P_3$  (13, 16), после чего все три пачки достигают конца магистрали «кон».

Таким образом, по диаграмме состояний магистрали возможно установить все места задержек АТС. Для примера на рис. 3 таких мест 14, и общая задержка составляет  $14\Delta t$ .

Эту задержку возможно существенно уменьшить, воспользовавшись сдвигом фаз зеленого сигнала светофора с боковых направлений. Начинать эту процедуру необходимо с конца магистрали, т. е. с последнего светофорного объекта, постепенно продвигаясь к началу магистрали, производить сдвиг фаз с помощью управляющих векторов  $P_j$ , т. е. число управляющих векторов будет больше чем два.

На рис. 3 горизонтальными стрелками показан сдвиг фаз на один такт  $\Delta t$  влево для светофора № 4. Сдвиг выполняется на свободные диагонали, что гарантирует прохождение АТС через этот светофор без задержек. Так как пустые диагонали использованы, задержку на светофорах № 2 и 3 устранить не удастся, но

останется возможность улучшить условия движения пачек АТС до светофоров № 1 и 2, что показано стрелками на рис. 3 (сдвиг фаз вправо). На рис. 4 представлены результаты проведенных операций. Число задержек пачек АТС сокращено с 14 до 6.

Последняя строка матрицы состояний полностью заполнена. Следовательно, уменьшить число задержек АТС методом сдвига фаз зеленого сигнала с боковых направлений невозможно.

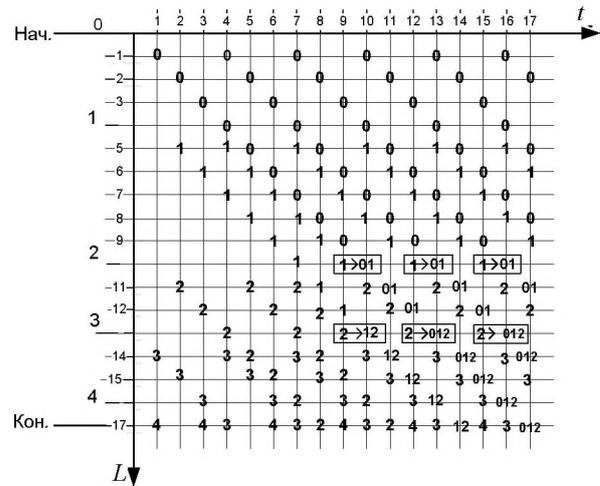


Рис. 4. Диаграмма состояний магистрали при увеличении числа управляющих векторов

## ВЫВОДЫ

Исключив в модели фактор диффузии АТС, пришли к заключению, что избежать задержек АТС перед СФО не удалось. Таким образом, при координированном регулировании диффузия АТС не является единственной причиной задержек, а может, и не является основной.

Вторая установленная причина задержек – конкуренция пачек АТС с разных боковых направлений при пересечении СФО магистрали.

Дальнейшим направлением исследований должна стать оценка влияния в отдельности каждого из факторов на задержки АТС. Для этого в детерминированную модель необходимо ввести элемент случайности, размывающий пачки АТС.

## ЛИТЕРАТУРА