

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 перекрестков. 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 Δt 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 продолжитель-

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

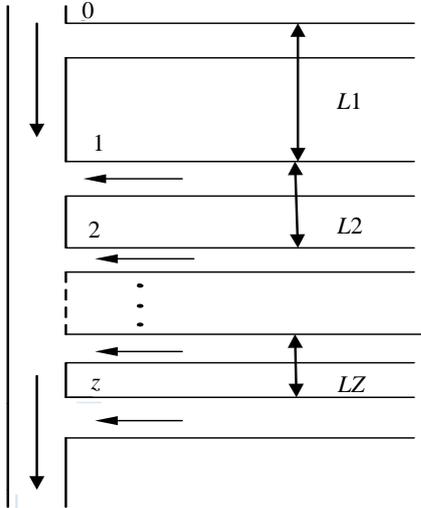


Рис. 1. План магистрали с прилегающими Т-образными регулируемыми перекрестками

Продолжительность красного сигнала (совместно с желтым) сделаем кратной ТЗ

$$t_3 = kt_k,$$

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

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

Аналогичным образом введем дискрет расстояния Δl . 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 Δl . 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 парфазным 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 $D_0 - D_Z$.

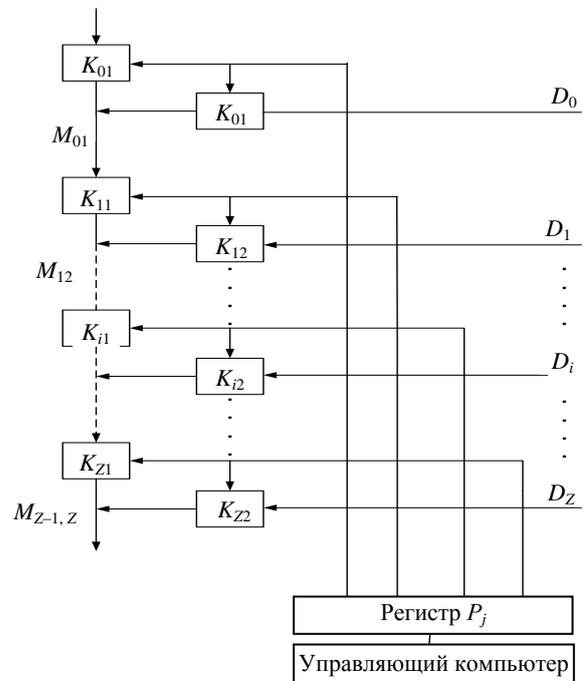


Рис. 2. Структурная схема дискретного управления светофорными объектами

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 Δl , пройденные пачкой из n автомобилей по магистрали за дискрет времени Δt . Масштаб для Δt и Δl 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 Δl . 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 загорается зеленый сигнал, а на боковых дорогах – красный сигнал. Идет этап транзитного пропуски 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.

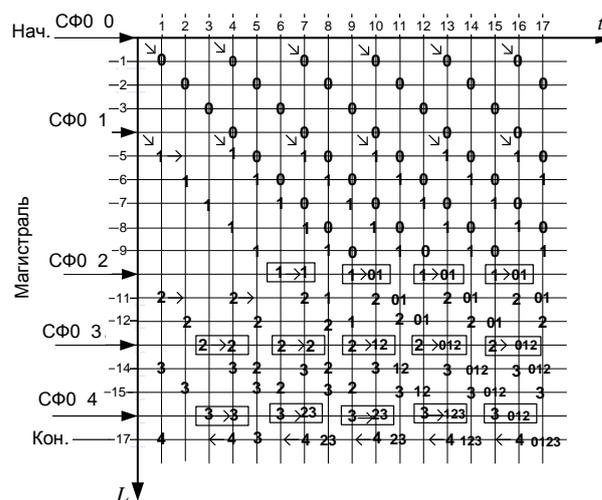


Рис. 3. Диаграмма состояний магистрали при двух управляющих векторах P_1 и P_2

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 одномоментно, 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 $\Pi_i(t, l)$ ($i = 0, \dots, Z$) 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 таб-

лицу состояний магистрали ограничим снизу линией «кон» (на Δl 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 Δt соответствует Δl . Поэтому пачка АТС, например P_1 (1, 5), в момент времени $t = 6 \text{ ч}$ (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 Δt 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 Δt 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 Δt 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 фазы впра-

во). 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.

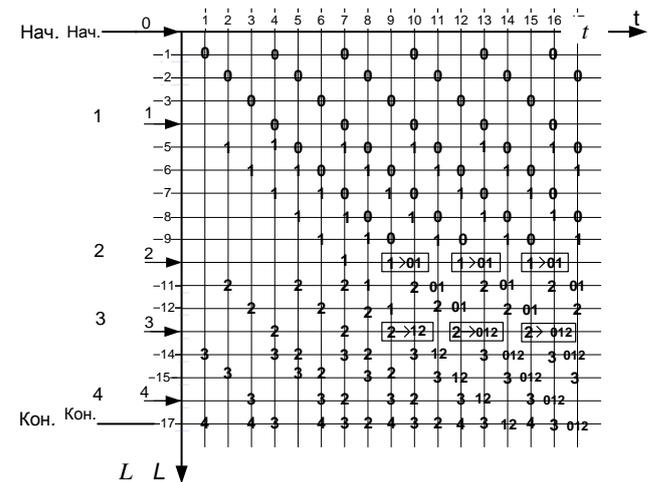


Рис. 4. Диаграмма состояний магистрали при увеличении числа управляющих векторов

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

1. Кременец, Ю. А. Технические средства регулирования дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский. – М.: Транспорт, 1981. – 137 с.
2. Автотранспортные потоки и окружающая среда / В. Н. Луконин [и др.]. – М.: Инфра-М, 2001. – 317 с.

Поступила 21.11.2008