

УДК 656.11:658.012

## ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ КООРДИНИРОВАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТА НА МАГИСТРАЛИ

*Докт. техн. наук, проф. ИВАНОВ В. П.,  
канд. техн. наук, доц. ШУТЬ В. Н., асп. ВОЙЦЕХОВИЧ О. Ю.*

*Брестский государственный технический университет*

В [1] была рассмотрена детерминированная модель координированного регулирования движения автотранспорта на магистрали. В модели принят ряд допущений: отказ от диффузии транспортных средств и эффекта «размывания» пачек, рассматриваемые перекрестки относились к Т-образному типу, движение по магистрали – одностороннее и т. д. В [1] построена диаграмма состояния магистрали в дискретные

моменты времени для пяти разноудаленных перекрестков. Продолжительность «красного» сигнала кратна продолжительности «зеленого»  $t_3 = kt_k$ , где  $k$  – коэффициент кратности. Данная модель предполагала широкий спектр дальнейших исследований.

**Плотность автотранспортных средств на магистрали.** Плотность автотранспортного потока – это параметр, характеризующий транс-

портный поток по количеству транспортных средств, находящихся в данный момент времени на заданном участке дороги. В нашем случае плотностью будем называть количество пачек на заданном участке дороги, а не отдельных транспортных средств.

Построим диаграмму плотности автотранспортных средств на всей магистрали в каждую секунду для модели, разработанной в [1] (рис. 1).

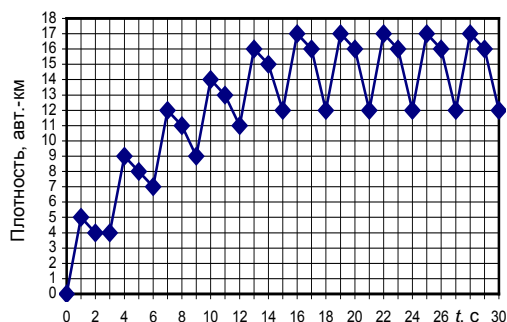


Рис. 1. Диаграмма плотности

Из рис. 1 видно, что по мере наполнения магистрали количество пачек возрастает рывками. После 16-й секунды состояние стабилизируется, плотность на магистрали не меняется. Таким образом, диаграмма состояний магистрали в [1], а также все диаграммы состояний, приведенные ниже, обладают таким свойством, что их состояния перестают меняться, после того как первая пачка автомобилей пройдет от начального до конечного светофора на магистрали.

**Оптимальный выбор  $k$ .** В [1] был введен коэффициент кратности. Продолжительность «красного» сигнала кратна продолжительности «зеленого» сигнала. При этом продолжительность светфорного цикла  $C = (k + 1)t_3$ . В [1] для построения детерминированной модели коэффициент  $k$  был выбран равным 2, следовательно:  $t_3 = 2t_k$ ;  $C = 3t_3$ .

На той же детерминированной модели построим диаграммы с различными  $k$ , для того чтобы выяснить, как выбрать оптимальный коэффициент  $k$  и как его изменить, чтобы при заданном числе перегонов устранить задержки.

На рис. 2 изображены диаграммы состояний магистрали при  $k$ , равном 1, 2, 3 и 4. Чтобы

правильно подсчитать количество задержек, отсчет будем вести после 20-й секунды, в тот момент все модели будут работать в установившемся режиме. Также подсчет будет вестись за промежуток времени, равный одному циклу.

Видно, что:

- при  $k = 1$ , учитывая, что одна горизонтальная стрелка может означать несколько задержанных пачек, на диаграмме имеется пять задержек, и сдвиг для уменьшения количества задержек невозможен;
- при  $k = 2$  получаются три задержки. Есть свободная диагональ, чтобы сдвинуть фазы на один такт влево для светофора № 4. Тогда количество задержек равно 2;
- при  $k = 3$  – две задержки. После сдвига фаз на один такт вправо для светофора № 0 останется одна задержка;
- при  $k = 4$  – одна задержка. После сдвига фаз на два такта влево для светофора № 0 за-

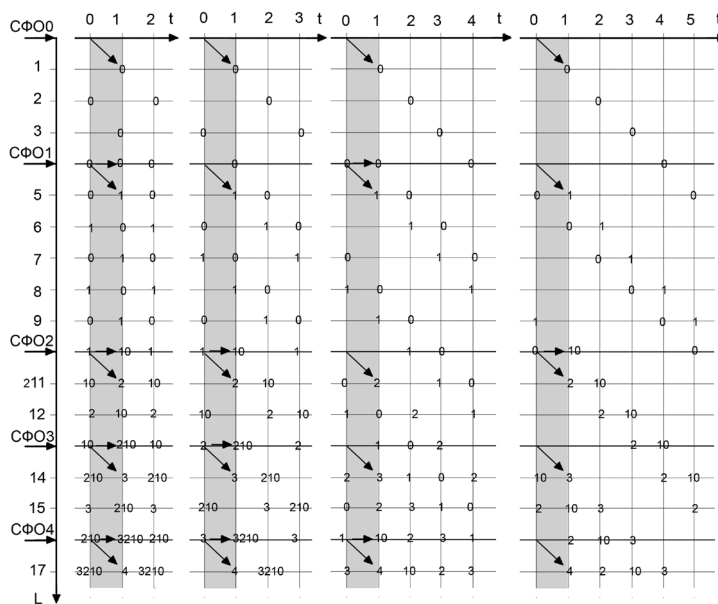


Рис. 2. Детерминированные модели для: 1 –  $k = 1$ ; 2 – 2; 3 – 3; 4 –  $k = 4$  в установившемся режиме

держек не останется.

Проиллюстрируем сказанное выше диаграммой зависимости количества задержек от коэффициента  $k$  (рис. 3).

Таким образом, чем меньше  $k$ , тем больше задержек, и наоборот. При  $k = 4$  все задержки

могут быть устранены. Сдвиги фаз позволяют уменьшить количество задержек.

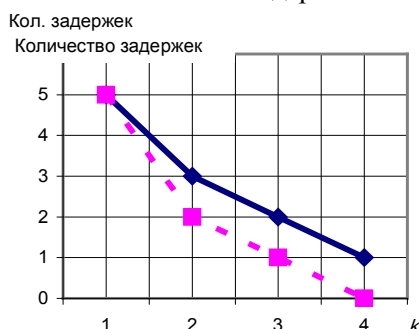


Рис. 3. Диаграмма зависимости количества задержек от коэффициента  $k$ : 1 – количество задержек без сдвигов; 2 – то же после сдвигов

Однако при большом  $k$  остается мало времени для проезда из боковых улиц. Также большое время цикла может провоцировать массовые нарушения правил участниками движения. Поэтому при выборе  $k$  нужно соблюдать разумное соотношение между длительностью зеленого сигнала на магистрали и на прилегающей улице. В [2] приводится формула для подсчета продолжительности горения «зеленого» сигнала для транспорта второстепенного направления

$$t_z = \frac{qC_{\min}}{q_n \cdot x_{\lim}} \geq 14 \text{ с}, \quad (1)$$

где  $q$  – интенсивность движения второстепенного направления для данной полосы, авт./с;  $q_n$  – поток насыщения для данного транспортного потока, авт./с;  $C_{\min}$  – минимальная продолжительность цикла, с;  $x_{\lim}$  – предельное (рекомендуемое) значение коэффициента загрузки полосы для второстепенного направления ( $\approx 0,6$ ).

Формула носит приближенный и рекомендательный характер, но ею можно воспользоваться для нахождения верхней границы  $k$ . Более детальная информация о формуле и ее параметрах – в [2].

В детерминированной модели следует учитывать тот факт, что появление задержек может зависеть не только от  $k$ , но и от соотношений, приведенных ниже.

Задержка на перекрестке  $b$  присутствует в том случае, если:

$$\left( \sum_{i=a+1}^b p_i + \mu \right) \bmod (k+1) = 0, \quad (2)$$

задержка на перекрестке  $b$  отсутствует, если:

$$\left( \sum_{i=a+1}^b p_i + \mu \right) \bmod (k+1) \neq 0, \quad (3)$$

где  $\bmod$  – остаток от деления;  $a$  – номер перекрестка, из которого вышла пачка;  $b$  – то же, на котором проверяется наличие/отсутствие задержки;  $\mu$  – количество уже случившихся задержек для данной пачки;  $p_i$  – расстояние между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м перекрестками (в дискретах расстояния).

С помощью (2) и (3) можно без построения детерминированной модели определять наличие или отсутствие задержек на перекрестке для конкретной пачки. Для примера на рис. 2 при  $k=1$  проверим наличие задержки на первом светофорном объекте (СФО1). Так как рассмотрен всего один цикл, второе слагаемое в числителе не учитывается:  $a=0$ ;  $b=1$ . Подсчитываем сумму дискретов между светофорами № 0 и № 1. Она равна 4. В знаменателе – 2. Делим числитель на знаменатель и получаем без остатка. Поэтому задержка присутствует. Та же пачка при  $k=2$  проедет СФО1 без задержек, так как сумма дискретов по-прежнему равна 4, а в знаменателе имеем 3. При делении есть остаток. При  $k=1$  проверим наличие задержки для 1-й пачки на СФО2:  $a=1$ ;  $b=2$ , сумма – 6, знаменатель – 2. Задержка для первой пачки есть. А для нулевой – нет, так как сумма – 6, знаменатель – 2, но  $\mu=1$  (для нулевой пачки была 1 задержка на СФО1), поэтому числитель равен 7, а знаменатель – 2. То есть деление с остатком, задержки нет. И так далее.

**Детерминированная модель для двустороннего движения.** Оставив все принятые в [1] постулаты неизменными, расширим модель. Теперь магистраль и все примыкающие дороги с перекрестков имеют двустороннее движение, а перекрестки относятся к Х-образному типу (рис. 4).

На рис. 4 расстояния между перекрестками 0, 1, ...,  $Z$  соответственно равны  $L_1, L_2, \dots, L_Z$ . На перекрестке 1 стрелками показаны возможные для всех перекрестков направления дви-

жения с примыкающих дорог, на перекрестке  $Z - 1$  – возможные направления движения с магистрали. Все перекрестки оборудованы светофорами. Положим, что все светофоры работают по двухфазному светофорному циклу. Тогда структурная схема дискретного управления светофорными объектами [1] для одностороннего движения годится и для рассматриваемого случая. Таким образом, управление светофорным объектом можно представить в виде управляющего компьютера, регистра и ключей. В регистры заносится двоичный вектор, каждый разряд которого управляет соответствующим перекрестком. Комбинация открытых и закрытых ключей характеризует состояние, в котором находится магистраль [1].

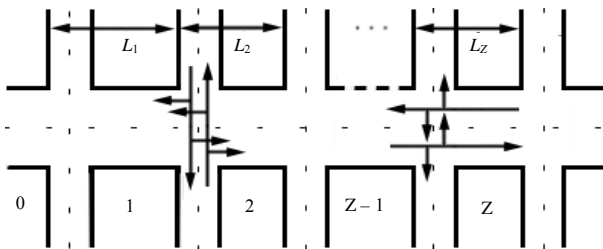


Рис. 4. План магистрали с прилегающими Х-образными, регулируемыми перекрестками

Построим в масштабе диаграмму состояния магистрали в дискретные моменты времени для двустороннего движения (рис. 5). Как и в [1],  $k = 2$ , использованы два вектора управления:  $P_1$  состоит из всех нулей и находится в регистре времени  $t_k$ ;  $P_2$  – из всех единиц. Этим вектором на всех светофорах магистрали загорается «зеленый» сигнал, а на боковых дорогах – «красный».

На рис. 5 изображены пять светофоров с 17 дискретами расстояний в течение 17 дискретов времени. Более темные вертикальные полосы показывают, когда на магистрали горит «красный» сигнал светофоров и происходит эмиссия транспортных средств в магистраль. Стрелки, направленные сверху вниз, означают эмиссию очередной пачки на одну из сторон магистрали (1-е направление) с боковых улиц. Такие пачки размещаются над горизонтальными прямыми. Стрелки,

направленные снизу вверх, означают эмиссию очередной пачки на другую сторону магистрали (2-е направление). Эти пачки размещаются на диаграмме под горизонтальными прямыми. Горизонтальные стрелки означают задержку пачек, так как их состояние меняется только по временной оси, а по оси расстояний остается тем же. Все пачки пронумерованы в соответствии с номером светофора, из которого они вышли. Несколько идущих подряд номеров означают, что пачки с разных светофоров слились в одну.

Проанализировав диаграмму рис. 2, можно сделать вывод, о том что при данном расположении светофоров и  $k = 2$  избежать задержек не получается ни на одном перекрестке. Причем светофоры 2 и 3 создают задержки в обоих направлениях.

Пути решения этой ситуации:

- увеличить длительность зеленой фазы  $k$ ;
- сдвинуть фазы.

Остановимся на последнем решении. Выясним, какие сдвиги возможны для максимального уменьшения количества задержек, если рассматривать оба направления независимо друг от друга. В направлении 1 допустимо сдвинуть фазу на один такт  $\Delta t$  влево для светофора № 4. Других вариантов нет, так как нет свободных диагоналей. В направлении 2 допустимо сдвинуть фазу на один такт  $\Delta t$  влево для светофора № 1 и вправо – для светофора № 4. Теперь надо

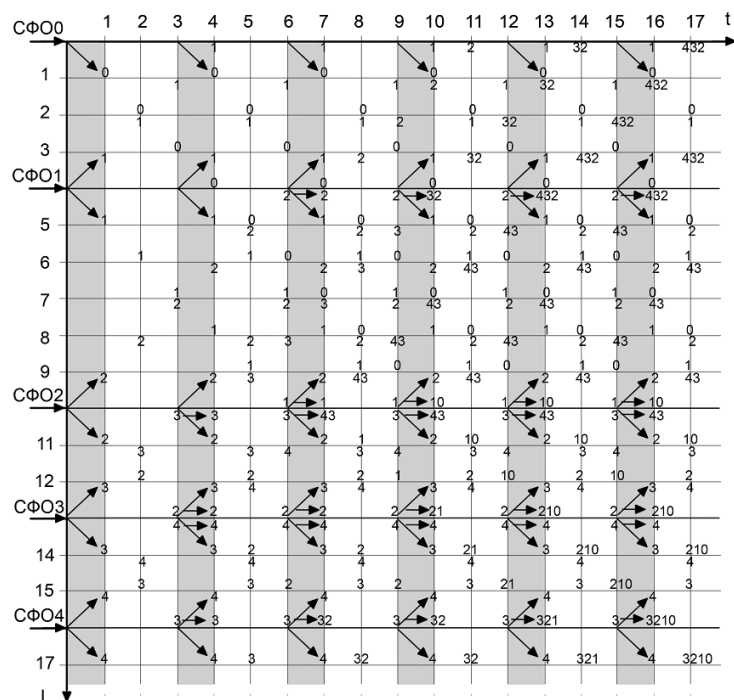


Рис. 5. Диаграмма состояний магистрали

отследить, как эти изменения согласуются друг с другом. Сдвиг в направлении 1 на четвертом светофоре приведет к тому, что светофор будет работать асинхронно в направлениях 1 и 2. В нашем случае такой ситуации быть не может, так как в рассматриваемом цикле всего три дискрета времени. Если светофор работает асинхронно, то, по крайней мере, один дискрет будет отведен на «зеленый» сигнал в направлении 1, один – в направлении 2. Если третий дискрет отвести на «зеленый» сигнал, это будет означать, что для поперечной дороги «зеленый» свет не загорится. Если третий дискрет отвести на «красный» сигнал, это будет означать, что большую часть на магистрали на этом перекрестке будет гореть «красный» сигнал. Что тоже недопустимо. Поэтому, сдвинув фазы в одном направлении, необходимо их сдвинуть и во втором. При этом проверяем по диаграмме, возможен ли такой сдвиг во втором направлении. Свободная диагональ есть. Но, заняв ее, у нас больше нет возможности сдвинуть фазы на светофоре № 1. В результате получаем новую диаграмму (рис. 6). Для управления такой магистралью понадобится три управляющих вектора. После сдвига фаз количество задержек уменьшилось.

### ВЫВОД

Расширили и дополнили детерминированную модель, разработанную в [1]. Диаграммы состояний магистрали в идеализированном случае через некоторое время после начала работы переходят в установившийся режим. В реальной жизни такие установившиеся режимы могут существовать только какое-то ограниченное время, так как движение автотранспорта носит стохастический характер. При выборе коэффициента  $k$  необходимо соблюдать баланс. В де-

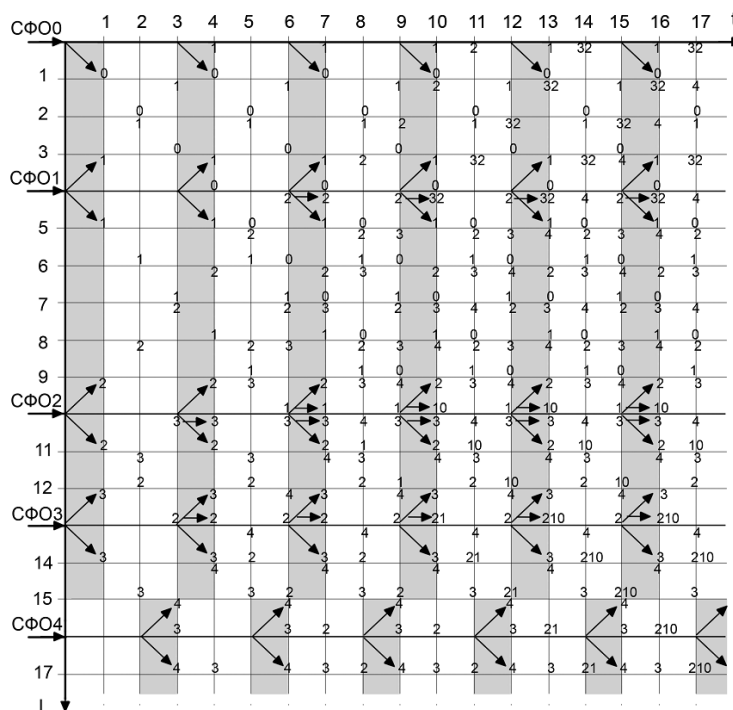


Рис. 6. Диаграмма состояний магистрали при увеличении числа управляющих векторов

терминированной модели можно достичь отсутствия задержек на магистрали при увеличении  $k$ , но следует учитывать, какой при этом получается длительность горения «зеленого» сигнала для боковых улиц. Избежать задержек автотранспортных средств при двустороннем движении гораздо более затруднительно. Пути борьбы с задержками при двустороннем движении: сдвиг фаз, увеличение  $k$ , сдвиг фаз с асинхронной работой светофоров.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шуть, В. Н. Детерминированная модель координированного регулирования движения автотранспорта на магистрали с Т-образными перекрестками / В. Н. Шуть // Вестник БНТУ. – 2009. – № 4. – С. 45–48.
2. Врубель, Ю. А. Организация дорожного движения. Ч. 2 / Ю. А. Врубель. – Минск, 1996. – 204 с.

Поступила 19.10.2010