

Р. Х. БАРЛЫБАЕВ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ ПОТОКОМ ОДНОЙ УЛИЦЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВРИСТИКИ «ЗЕЛЕНАЯ ВОЛНА»

Предлагается двухуровневая система управления транспортными потоками вдоль одной улицы — на уровне перекрестков и на уровне всей улицы. Для первого уровня предложена система на основе нечеткой логики, для второго уровня разработан алгоритм перерегулирования светофоров.

Нечеткая логика; транспортные потоки; зеленая волна

ВВЕДЕНИЕ

Городская дорожная транспортная сеть представляет собой сложную систему. Движение отдельного автомобиля в транспортном потоке зависит от многих факторов: конфигурации дорожной сети, количества полос движения, движения впереди идущих машин, сигналов светофоров и т. д.

В целом задачу регулирования движения транспортом в сети улиц можно представить в виде задачи управления сложным объектом, где управляющими воздействиями будут параметры сигналов светофоров, а целью управления — оптимизация заданного параметра движения транспорта, например, скорости движения машин, средний расход машин и так далее. Целесообразно в качестве цели такого управления выбрать минимизацию среднего времени ожидания всех машин на перекрестках.

В данной статье рассматривается управление светофорами на перекрестках, расположенных на одной улице. Идея, на которой построена предлагаемая система управления транспортными потоками (СУТП), базируется на эвристическом способе управления, известном как «зеленая волна», когда поток транспорта в одном направлении двигается без остановок на красном сигнале светофора.

1. ДВУХУРОВНЕВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ ОДНОЙ УЛИЦЫ

Очевидно, что для реализации «зеленой волны» необходимо, чтобы у каждого светофора вдоль улицы время цикла $t_{цикл} = t_{кр} + t_{зел} + 2t_{жел}$ ($t_{кр}$ — длительность горения красного сигнала, $t_{зел}$ — зеленого, $t_{жел}$ — желтого) было одинаковым, то есть работа светофоров должна быть синхронной.

Пусть все светофоры на улице будут перенумерованы по порядку от 1-го до I -го. Определим i -й квартал как пару из i -го и $i+1$ -го светофоров и отрезок улицы между ними. Определим $t_{синхр_i}$ как интервал времени между моментами начал работы циклов $i+1$ -го светофора и i -го светофора.

Поскольку расстояния между перекрестками на одной улице могут быть разными, то целесообразно для каждого перекрестка иметь свою автономную СУТП, которая выполняет управление величиной $t_{синхр_i}$, исходя из ситуации на двух соседних перекрестках, а именно из плотности потока транс-

порта на перекрестках в прямом и обратном направлениях. Перерегулирование $t_{синхр_i}$ на всей улице является отдельной задачей, так как перерегулирование светофоров должно происходить синхронно между собой. Можно поставить задачу оптимального по времени перерегулирования $t_{синхр_i}$, $i=1..I$ для улицы. Предлагаемое значение $t_{синхр_i}$ передается в систему выбора $t_{синхр_i}$ для улицы. Поскольку все светофоры на улице работают синхронно относительно друг друга, то изменение $t_{синхр_i}$ между одной парой светофоров приводит к изменению работы светофоров на всей улице. Поэтому возникает необходимость в отдельной системе управления, которая осуществляет оптимальное по времени перерегулирование светофоров по заданным меняющимся значениям $t_{синхр_i}$ для всех пар светофоров.

Таким образом, для улицы получаем необходимость разработки двухуровневой СУТП. Каждому i -му кварталу соответствует своя система управления первого уровня, которая принимает в качестве входных параметров величины плотностей потоков транспорта в обоих направлениях и текущие значения параметров светофоров внутри данного квартала и вырабатывает оптимальные значения $t_{синхр_i}$ для каждого квартала. Система управления второго уровня принимает в качестве входных параметров эти значения $t_{синхр_i}$ с каждого квартала и вырабатывает управляющие сигналы для перерегулирования светофоров с целью достижения требуемых $t_{синхр_i}$.

2. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРВОГО УРОВНЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Рассмотрим сначала СУТП первого уровня — для системы из двух соседних перекрестков. Среди параметров, которые влияют на среднее время ожидания машин в очереди перед светофором, можно выделить следующие:

q_1, q_2 — расход транспорта или величина транспортного потока в обоих направлениях, характеризующийся числом машин, проезжающих в единицу времени в одном и другом направлениях;

$t_{цикл} = t_{кр} + t_{зел} + 2t_{жел}$ — длительность работы полного цикла светофоров;

$t_{\text{синхр}_i}$ – интервал времени между моментами начал работы циклов $i+1$ -го светофора и i -го светофора;

$t_{\text{кр}}/t_{\text{зел}}$ – соотношение длительностей работы красного и зеленого сигналов светофоров.

Оптимальное соотношение длительностей работы красного и зеленого сигналов светофоров $t_{\text{кр}}/t_{\text{зел}}$ определяется соотношением плотностей потоков транспорта в прямом и перпендикулярном направлениях. Во избежание пробок величина $t_{\text{кр}}/t_{\text{зел}}$ должна быть одинаковой для всех светофоров улицы. Поэтому параметр $t_{\text{кр}}/t_{\text{зел}}$ не может являться объектом управления в СУТП первого уровня.

При синхронной работе светофоров на улице величина $t_{\text{цикл}}$ должна быть одинаковой для всех светофоров, поэтому выбор оптимального значения $t_{\text{цикл}}$ может осуществляться в СУТП второго уровня – на уровне улицы.

Параметр $t_{\text{синхр}_i}$ – единственный параметр, который может являться объектом управления для СУТП первого уровня, так как величины $t_{\text{синхр}_i}$ могут изменяться независимо для разных кварталов. Остальные параметры – $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$ – являются входными для этой СУТП. Очевидно, что для каждой возможной тройки значений величин $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$ существует такое значение $t_{\text{синхр}_i}$, при котором среднее время ожидания машин в очереди перед светофором достигает минимума. Отсюда возникает задача получения в СУТП первого уровня соответствующего выходного значения управляемого параметра $t_{\text{синхр}_i}$ для каждой тройки значений входных параметров $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$. Для решения этой задачи предлагается система управления на основе нечеткой логики с определенной базой правил.

Общее количество правил базы составит $N_1 N_2 N_3$, где N_1, N_2, N_3 – количество значений лингвистических переменных, соответствующих параметрам $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$ после фаззификации. Поскольку представляется затруднительным выявить зависимость $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}, t_{\text{синхр}_i} \rightarrow t_{\text{ожид}}$ путем экспериментов на реальной улице, то для вывода такой базы правил предлагается провести моделирование движения машин через два перекрестка с целью определения минимального $t_{\text{ожид}}$ ($t_{\text{ожид}}$ – общее время ожидания всех машин, накопившихся на красном свете за один цикл перед $i+1$ -м светофором). База правил заполняется следующим образом. Для заданных значений $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$ с помощью заданной (компьютерной) модели движения транспорта определяется такое оптимальное значение $t_{\text{синхр}_i}$ (например, путем перебора), при котором $t_{\text{ожид}}$ принимает минимальное значение. Для реализации этого

способа заполнения базы правил требуется компьютерная модель движения транспорта, реализующая функцию $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}, t_{\text{синхр}_i} \rightarrow t_{\text{ожид}}$.

3. ПРОСТЕЙШАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫВОДА БАЗЫ ПРАВИЛ

В качестве такой модели примем следующую упрощенную математическую модель.

Машины двигаются в каждую сторону только по одной полосе, друг за другом. Если нужно рассмотреть многополосное движение, то тогда в качестве входных параметров q_1, q_2 для такой же АСУ берется средняя плотность потока машин на одной полосе.

Машины двигаются либо с постоянной скоростью V_{max} , либо стоят на месте перед красным сигналом светофора, либо стоят перед стоящей впереди машиной. Расстояние между передними бамперами стоящих друг за другом машин – l . Минимальное расстояние между передними бамперами движущихся друг за другом машин – d_{min} , оно определяется расстоянием безопасного торможения. Разгоняются и тормозят машины моментально, то есть величину ускорения разгона и торможения принимаем бесконечным.

Введем следующие обозначения для i -го квартала:

$t_{\text{синхр}}$ – интервал времени между началами включения зеленого сигнала i -го и $i+1$ -го светофоров,

$t_{\text{пр}}$ – среднее время проезда машины от i -го до

$i+1$ -го перекрестка,

$t_{\text{кр}}$ – длительность красного сигнала,

$t_{\text{зел}}$ – длительность зеленого сигнала,

$\Delta t = d_{\text{min}} / V_{\text{max}}$ – интервал времени между идущими вплотную машинами или интервал времени между трогаящимися на зеленый свет стоящими друг за другом машинами,

n_1 – число машин, проезжающих в прямом направлении в течении цикла $t_{\text{цикл}}$.

Рассмотрим движение машин в одну сторону. Для данной математической модели существуют 3 варианта движения машин в зависимости от значения $t_{\text{синхр}}$.

$$1) t_{\text{синхр}} \in [t_{\text{пр}}; t_{\text{пр}} + t_{\text{кр}}]$$

Все машины останавливаются на красном сигнале светофора и ожидают одинаковое время (согласно принципу «первый пришел – первый ушел») (рис. 1) Общее время равно: $t_{\text{ожид}} = n_1(t_{\text{синхр}} - t_{\text{пр}})$.

$$2) t_{\text{синхр}} \in [t_{\text{пр}} + t_{\text{кр}}; t_{\text{пр}} + t_{\text{кр}} + n_1 \Delta t]$$

Часть машин проезжает на зеленый свет, оставшаяся часть n_1' остается на красном сигнале в течении времени $t_{\text{кр}}$ (рис. 2). Общее время равно:

$$t_{\text{ожид}} = n_1' t_{\text{кр}} = (n_1(t_{\text{пр}} + t_{\text{кр}} - t_{\text{синхр}}) / \Delta t) t_{\text{кр}}$$

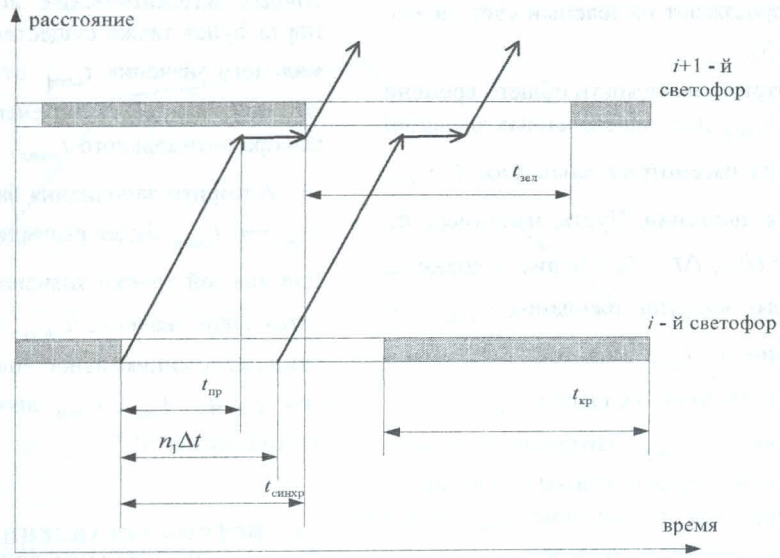


Рис. 1

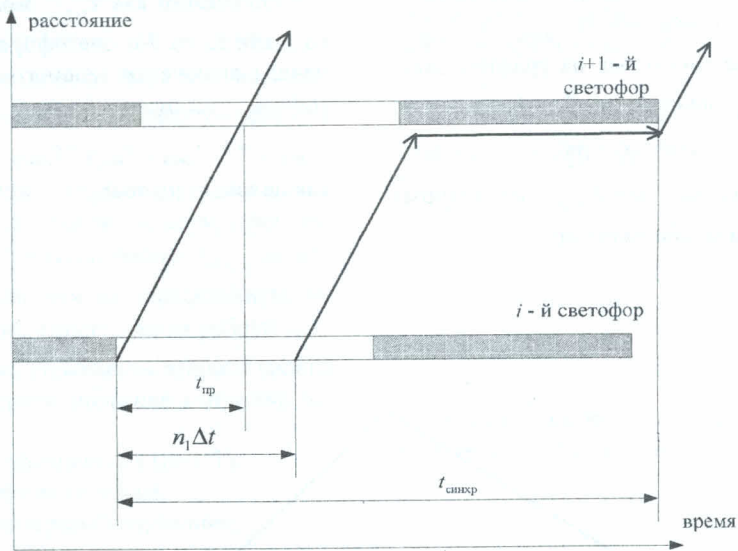


Рис. 2

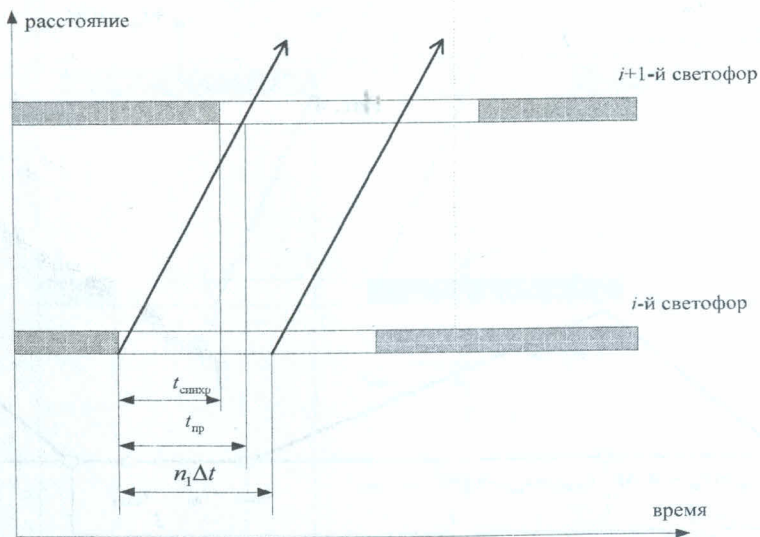


Рис. 3

$$3) t_{\text{синхр}} \in [t_{\text{пр}} + t_{\text{кр}} + n_1 \Delta t; t_{\text{пр}} + t_{\text{цикл}}]$$

Все машины проезжают на зеленый свет, поэтому $t_{\text{ожид}} = 0$ (рис. 3).

Теперь рассмотрим зависимости общего времени ожидания $t_{\text{ожид}}$ от $t_{\text{синхр}}$ для определенных значений q_1, q_2 . Для начала рассмотрим зависимость $t_{\text{ожид}}$ при одностороннем движении. Пусть, например, $n_1 = 4, n_2 = 3, t_{\text{цикл}} = 60 \text{ с}, \Delta t = 5 \text{ с}$. На рис. 4 показана зависимость общего времени ожидания $t_{\text{ожид}_1}$ в прямом направлении от $t_{\text{синхр}}$, на рис. 5 показана зависимость общего времени ожидания $t_{\text{ожид}_2}$ в обратном направлении от $t_{\text{синхр}}$. Цифрами показаны зоны, соответствующие случаям, указанным выше.

Суммарное общее время ожидания $t_{\text{ожид}}$ будет являться суммой $t_{\text{ожид}_1}$ и $t_{\text{ожид}_2}$ (рис. 6).

Из рисунка видно, что для данной математической модели существует зависимость $t_{\text{ожид}}$ от $t_{\text{синхр}}$.

Так как положение минимума на графике зависимости $t_{\text{ожид}}$ от $t_{\text{синхр}}$ зависит от $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$, то для каждой тройки значений $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$ существуют свои оптимальные значения $t_{\text{синхр}}$, при которых $t_{\text{ожид}}$ принимает минимальное значение.

Можно ожидать, что и при применении более точных математических моделей движения транспорта будет также существовать зависимость оптимального значения $t_{\text{синхр}}$ от значений $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$. Это обуславливает применение АСУ на базе НЛ для выбора оптимального $t_{\text{синхр}}$.

Алгоритм заполнения базы правил АСУ $q_1, q_2, t_{\text{цикл}} \rightarrow t_{\text{синхр}}$ будет выглядеть следующим образом. Для каждой тройки значений $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}$ определяются такое значение $t_{\text{синхр}}$, при котором $t_{\text{ожид}}$ будет принимать минимальное значение. Затем эти значения $q_1, q_2, t_{\text{цикл}}, t_{\text{синхр}}$ вносятся в базу правил нечеткой логики АСУ.

4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ ВТОРОГО УРОВНЯ

Обозначим как $t_{\text{вкл}_i}$ момент включения зеленого сигнала на i -м светофоре относительно момента начала включения зеленого сигнала на первом светофоре (соответственно $t_{\text{вкл}_1} = 0, t_{\text{вкл}_2} = t_{\text{синхр}_2} + k \cdot t_{\text{цикл}}, t_{\text{вкл}_3} = t_{\text{синхр}_2} + t_{\text{синхр}_3} + k \cdot t_{\text{цикл}}$ и так далее, k – целое).

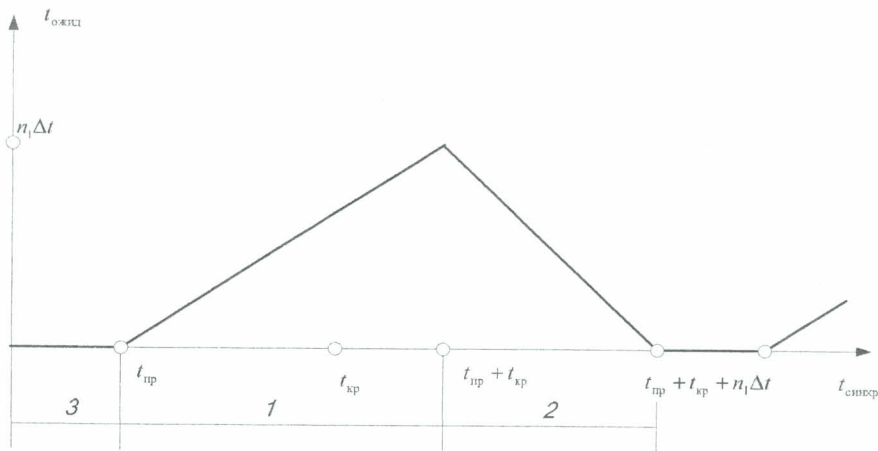


Рис. 4

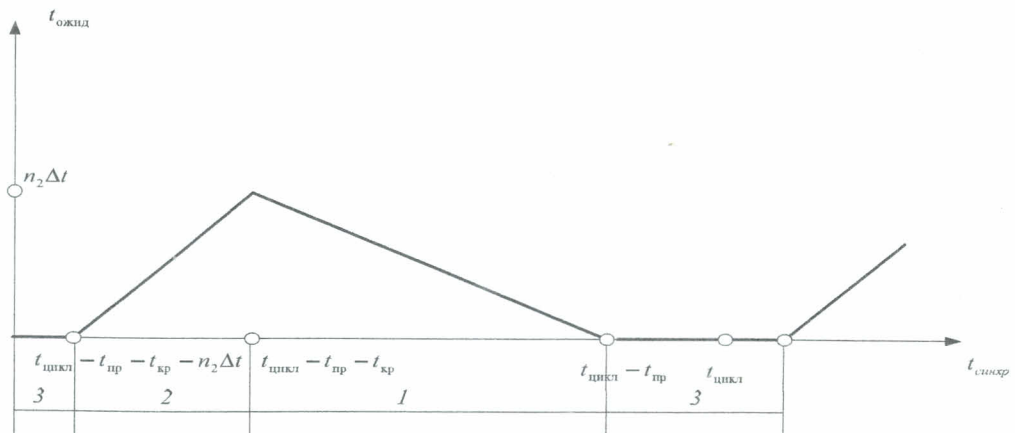


Рис. 5

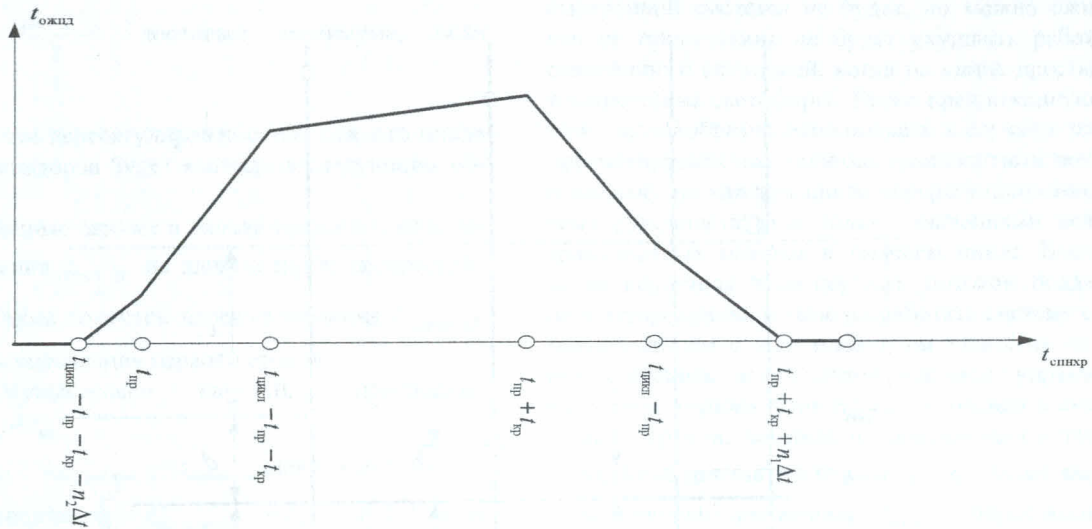


Рис. 6

Зависимость оптимального значения $t_{\text{синхр}_i}$ от значений $q_{1_i}, q_{2_i}, t_{\text{цикл}}$ приводит к необходимости перерегулирования значений параметров $t_{\text{вкл}_i}$ по всей улице в зависимости от текущих значений $q_{1_i}, q_{2_i}, t_{\text{цикл}}$ с помощью системы управления второго уровня.

Очевидно, что в общем случае перерегулирование не может быть осуществлено за один цикл, так как величины $t_{\text{зел}}, t_{\text{кр}}$ и соответственно $t_{\text{вкл}_i}$ не могут изменяться не больше чем на определенную величину $t_{\text{сдв}_\text{макс}}$ в течение одного цикла работы светофора. Поэтому система управления второго уровня будет производить перерегулирование в течение нескольких циклов.

Введем следующие обозначения (рис. 7):

$i=1..I$ – номер светофора на улице,

$j=1..J$ – номер цикла перерегулирования,

$t_{\text{вкл}_ij}$ – момент включения зеленого сигнала на i -м светофоре относительно момента начала включения зеленого сигнала на первом светофоре на j -м цикле перерегулирования,

$t_{\text{синхр}_ij} = t_{\text{вкл}_{i+1_j}} - t_{\text{вкл}_ij}$ – интервал времени между моментами начала работы циклов $i+1$ -го светофора и i -го светофора в j -м цикле работы светофора,

$t_{\text{сдв}_ij} = t_{\text{вкл}_{i-j+1}} - t_{\text{вкл}_ij}$ – величина изменения $t_{\text{вкл}_ij}$,

$t_{\text{сдв}_\text{макс}}$ – максимально допустимая величина сдвига $t_{\text{вкл}_ij}$.

Постановка задачи перерегулирования для АСУ второго уровня выглядит следующим образом.

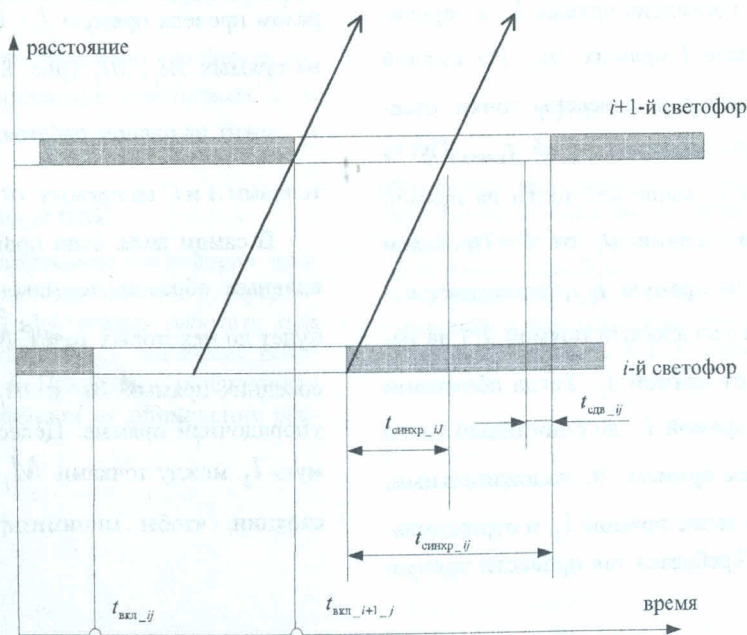


Рис. 7

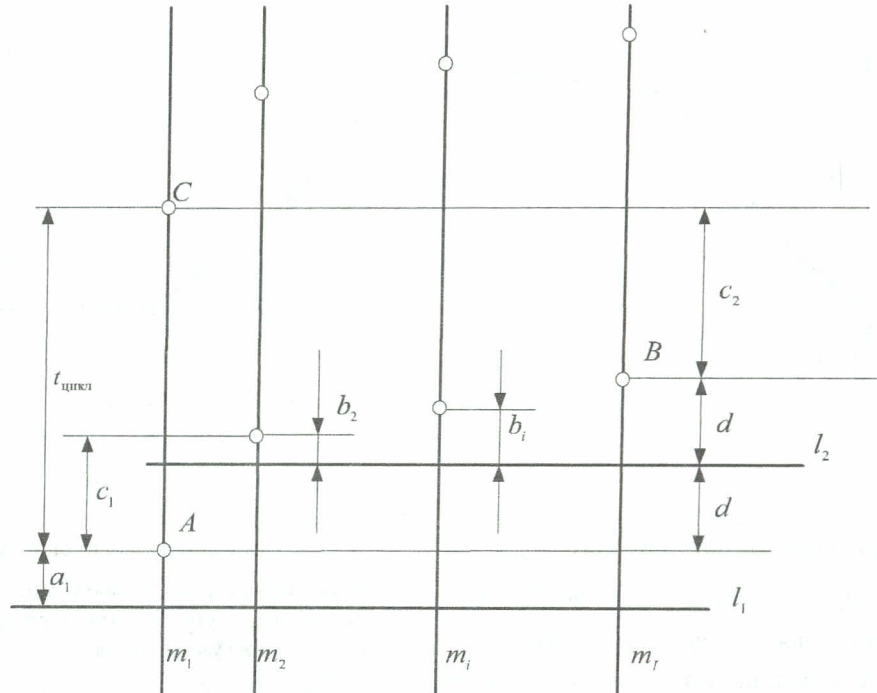


Рис. 8

Пусть изменение величин $t_{\text{вкл}_i j}$ с каждым циклом осуществляется со значением $t_{\text{сдв}_i \text{макс}}$, пока $t_{\text{вкл}_i j}$ не достигнет значения $t_{\text{вкл}_i J}$. Тогда для решения указанной задачи нужно определить такие конечные значения $t_{\text{вкл}_i J}$, чтобы минимизировать значение $\max |t_{\text{вкл}_i J} - t_{\text{вкл}_{i-1} J}|$, $i=1..I$, при выполнении $t_{\text{синх}_i J} + k \cdot t_{\text{цикл}} = t_{\text{вкл}_{i+1} J} - t_{\text{вкл}_i J}$.

Эту задачу можно представить в геометрическом виде следующим образом.

Обозначим $a_i = t_{\text{вкл}_i J} - t_{\text{вкл}_{i-1} J}$. Пусть на плоскости горизонтально проведена прямая l_1 , а перпендикулярно к ней – еще I прямых m_i . На каждой прямой m_i последовательно нанесены точки, отсекающие ее на равные отрезки длиной $t_{\text{цикл}}$. Пусть ближайшая к прямой l_1 выше нее точка на прямой m_i находится на расстоянии a_i от l_1 . Проведем произвольным образом прямую l_2 , перпендикулярную прямым m_i (и параллельную прямой l_1) на некотором расстоянии от прямой l_1 . Тогда обозначим как b_i расстояние от прямой l_2 до ближайшей точки на прямой m_i , причем примем b_i положительным, если точка находится выше прямой l_2 и отрицательным, если она ниже. Требуется так провести прямую

l_2 , чтобы величина $\max |b_i|$ была минимально возможной. Эта задача решается следующим образом.

Упорядочим прямые m_i так, чтобы соответствующие значения b_i шли по возрастанию (этого всегда можно достичь соответствующим переименованием прямых m_i) (рис. 8). Обозначим $c_i = a_{i+1} - a_i = b_{i+1} - b_i$, $c_I = a_1 - a_I = b_1 - b_I$. Пусть c_I будет максимальным значением среди c_i (этого всегда можно достичь, соответствующим образом проведя прямую l_1). Обозначим точки A, B, C на прямых m_1, m_I (рис. 8). Тогда искомая прямая l_2 лежит на равном расстоянии $d = \frac{t_{\text{цикл}} - c_I}{2}$ между точками A и C на прямых m_1 и m_I (рис. 8).

В самом деле, если провести прямую l_2 произвольным образом, то максимальное расстояние b_i будет до некоторых точек M_i и M_{i+1} , лежащих на соседних прямых m_i и m_{i+1} , в силу того, что мы упорядочили прямые. Целесообразно провести прямую l_2 между точками M_i и M_{i+1} на равном расстоянии, чтобы минимизировать $\max |b_i|$. Тогда

$\max |b_i| = \frac{t_{\text{цикл}} - c_i}{2}$ достигает минимума, если

$$c_i = c_i.$$

Алгоритм перерегулирования для каждого цикла работы светофоров будет выглядеть следующим образом.

1. Исходные данные в начале каждого цикла: заданы значения $t_{\text{вкл_}i1}$ на данном цикле перерегулирования. Также получаем целевые значения $t_{\text{синхр_}i}$ из системы управления первого уровня.

2. Осуществляем начальное присвоение

$$t_{\text{вкл_целевое_}1} := t_{\text{вкл_}11};$$

$$t_{\text{вкл_целевое_}i+1} := t_{\text{вкл_целевое_}i} + t_{\text{синхр_}i} \text{ для } i=1..I-1.$$

3. Вычисляем $b_i := t_{\text{вкл_целевое_}i} - t_{\text{вкл_}i1}$, $i=1..I$. Если

$|b_i| > t_{\text{цикл}}$, то вычитаем или прибавляем к b_i значение $t_{\text{цикл}}$ до тех пор, пока не будет $|b_i| < t_{\text{цикл}}$.

4. Сортируем b_i по возрастанию.

5. Вычисляем $c_i := b_{i+1} - b_i$, $i=1..I$.

6. Определяем максимальное значение $c_{\text{max}} := \max_{i=1..I} |c_i|$.

7. Вычисляем $d := \frac{t_{\text{цикл}} - c_{\text{max}}}{2}$, делаем смещение

$$b_i := b_i - d, i=1..I.$$

8. Осуществляем смещение $t_{\text{вкл_}i1}$: если $|b_i| > t_{\text{сдв_макс}}$, то $t_{\text{вкл_}i2} := t_{\text{вкл_}i1} + \text{sign}(b_i) \cdot t_{\text{сдв_макс}}$, иначе (если $|b_i| < t_{\text{сдв_макс}}$) $t_{\text{вкл_}i2} := t_{\text{вкл_}i1} + b_i$. (Здесь $\text{sign}(b_i) = 1$, если $b_i > 0$ и $\text{sign}(b_i) = -1$, если $b_i < 0$).

9. Переход к следующему циклу перерегулирования (п. 1).

Алгоритм имеет почти линейную сложность работы (за исключением процедуры сортировки b_i и вычисления c_i).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку перерегулирование светофоров производится в течение нескольких циклов, то предложенный алгоритм будет эффективно работать при достаточно медленно меняющихся значениях величин транспортных потоков. При быстро меняющихся транспортных потоках эффекта от применения рас-

смотренной системы не будет, но можно ожидать, что ее присутствие не будет ухудшать работу по сравнению с ситуацией, когда на улице простые автоматические светофоры. Также предложенную систему целесообразно использовать в случае с плохой прогнозируемостью величин транспортных потоков, поскольку на каждом цикле перерегулирования система руководствуется только значениями величин транспортных потоков в текущем цикле. В случае, когда величины транспортных потоков поддаются прогнозированию, можно разработать систему с прогнозированием с использованием «памяти» на базе предложенных компонентов системы управления, например, встроив блок прогнозирования в систему первого уровня, который по получаемым в течение нескольких циклов значениям q_1, q_2 будет вырабатывать прогноз для величин $t_{\text{синхр_}i}$, передаваемый в систему второго уровня.

ВЫВОДЫ

1. Обоснована необходимость двухуровневой системы управления транспортным потоком для улицы из нескольких перекрестков.

2. Выбран параметр, который может являться объектом управления для системы управления транспортным потоком первого уровня – $t_{\text{синхр_}i}$.

3. В качестве системы управления первого уровня предложена система на основе нечеткой логики.

4. Для вывода и заполнения базы правил этой системы рассмотрена простейшая математическая модель движения транспорта.

5. Для системы управления второго уровня разработан алгоритм перерегулирования светофоров, обнаружена возможность реализации этого алгоритма почти с линейной сложностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бажин, Д. Н. Алгоритмическое и программное обеспечение моделирующего комплекса для управления транспортными потоками на перекрестках на основе нечеткой логики и нейронных сетей : дис. ... канд. техн. наук / Д. Н. Бажин. Уфа, 2001.

2. Васильев, В. И. Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики : учеб. пособие / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов. Уфа : УГАТУ, 1995.