

УДК 656.2.08

Д. В. РОЖАНСКИЙ, кандидат технических наук; Белорусский национальный технический университет, г. Минск

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ В ПЛОТНОМ ПОТОКЕ

Проанализированы недостатки существующих математических моделей транспортных потоков. Предложен алгоритм моделирования действий водителя по управлению транспортным средством при движении в плотном потоке. В основу алгоритма положено допущение о том, что водитель заднего транспортного средства (ведомого) стремится двигаться со скоростью переднего транспортного средства (лидера) и выдерживать дистанцию между лидером и ведомым в заданных пределах. Водитель ведомого транспортного средства реагирует на изменение режима движения лидера по истечении времени реакции. Ускорение ведомого транспортного средства определяется в зависимости от соотношения скоростей и ускорений лидера и ведомого, дистанции между ними, а также режима движения ведомого.

Рассматривается шесть возможных состояний (режимов движения): остановка, движение со скоростью лидера, разгон, торможение, выравнивание скоростей после разгона и торможения.

Указаны возможные области использования предложенного моделирующего алгоритма.

Эффективная организация дорожного движения и принятие обоснованных решений по ее совершенствованию возможно только на основе знаний о закономерностях движения транспортных потоков. Правильность проектных и организационных решений в значительной степени зависит от достоверности информации о поведении как транспортного потока в целом, так и отдельных, входящих в его состав, транспортных средств, особенностях их взаимодействия внутри потока и реакции на изменение дорожной обстановки.

Для изучения процесса движения транспортных потоков и выбора наиболее эффективных методов управления ими широко используются математические модели. Существует ряд аналитических моделей, относящихся к классу макромоделей транспортного потока, которые позволяют определять основные показатели режима движения потока и оценивать его поведение в той или иной дорожной обстановке [1–4]. Основным недостатком таких моделей является то, что они оперируют осредненными зависимостями и функциями распределений, которые не отражают в должной мере истинные процессы, протекающие в транспортном потоке. Поэтому такие модели используются лишь для предварительной приближенной оценки степени соответствия организации движения необходимым требованиям.

Имитационные модели, которые относятся к классу микромоделей, позволяют более полно учесть и отразить как процесс движения всего потока, так и транспортных средств, его составляющих [1, 3, 5]. Адекватность описания режимов движения транспортных потоков с помощью таких моделей выше, чем при использовании аналитиче-

ских моделей. В основу имитационного моделирования положены уравнения следования за лидером, которые могут быть записаны, например, следующим образом [5]:

$$dv_n/dt = (v_{n+1} - v_n)/t_p, \quad dv_n/dt = v_0(v_{n+1} - v_n)/d,$$

где dv_n/dt – ускорение заднего автомобиля; v_n и v_{n+1} – скорости соответственно заднего и переднего автомобилей; t_p – продолжительность реакции водителя; v_0 – характерная скорость; d – расстояние между автомобилями.

Из приведенных уравнений видно, что ускорение заднего автомобиля принимается равным ускорению переднего. Это означает, что в процессе разгона задний автомобиль постоянно отстает от переднего, а при торможении – постоянно приближается, т. к. разность их скоростей остается неизменной и равной значению в момент истечения времени реакции водителя. Такой подход огрубляет модель и не может быть признан удовлетворительным.

Улично-дорожная сеть крупных городов в настоящее время зачастую не справляется со значительно возросшими транспортными потоками. Это становится особенно заметно в часы пик, когда существенно увеличивается доля так называемых «плотных транспортных потоков». Такие потоки характеризуются относительно небольшими скоростями движения, практически полным отсутствием обгонов и опережений и существенным сокращением числа перестроений из одной полосы в другую, которые выполняются только в случае необходимости предстоящего поворота или разворота. Плотные транспортные потоки возникают не только в часы пик. Они характерны для тех уча-

стков дорог, где по каким-либо причинам (например, дорожные работы) уменьшается ширина проезжей части или возрастает интенсивность движения из-за использования данного участка в качестве временного объезда и поступления на него дополнительного потока транспортных средств. Характерным местом образования плотного транспортного потока является также место остановки транспорта на запрещающий сигнал светофора или регулировщика. После подачи разрешающего сигнала колонна транспортных средств, которые начинают движение, в течение некоторого времени представляет собой плотный транспортный поток. Такие режимы наблюдаются при движении через регулируемый железнодорожный переезд, а также на небольших перегонах между регулируемыми перекрестками, когда расстояние не позволяет транспортным средствам рассредоточиться и перейти в режим свободного движения. Таким образом, умение правильно определять показатели режимов движения плотных транспортных потоков позволит достоверно оценивать эффективность решений по организации движения во многих ситуациях, которые возникают на практике.

Основой модели любого транспортного потока, определяющей ее адекватность, является модель действий водителя по управлению транспортным средством. Формализация процессов выработки и принятия водителем решений, разработка алгоритма его поведения при выборе режима движения являются главной составляющей имитационной модели.

Исходя из особенностей движения транспортных средств в плотном потоке могут быть сформулированы три основных допущения, определяющих поведение водителя:

- водитель стремится поддерживать скорость движения, равную скорости лидера, т. е. транспортного средства, движущегося непосредственно перед ним;

- водитель старается выдерживать дистанцию до лидера в пределах от D_{\min} до D_{\max} ;

- водитель начинает реагировать на изменение режима движения лидера по истечении времени реакции t_p .

Предполагается, что транспортный поток движется по одной полосе без обгонов, опережений и перестроений.

Минимальная дистанция D_{\min} может быть определена в зависимости от скорости по эмпирической формуле

$$D_{\min} = 0,05v_d^2 + 4, \quad (1)$$

где v_d – расчетная скорость для определения минимальной дистанции, м/с.

Максимальная дистанция D_{\max} вычисляется пропорционально D_{\min} :

$$D_{\max} = k_{d1} D_{\min}, \quad (2)$$

где $k_{d1} > 1$ – коэффициент пропорциональности.

Для повышения точности моделирования времени реакции t_p следует задавать как случайную величину. Параметры функции распределения этой случайной величины зависят от психофизиологических особенностей водителя. Реакция водителя на изменение режима движения лидера зависит от режима движения управляемого им транспортного средства. Рассматриваются шесть основных состояний, в которых может находиться транспортное средство:

1 Остановка: скорость и ускорение транспортного средства равны нулю.

2 Движение со скоростью лидера: скорость и ускорение транспортного средства равны скорости и ускорению лидера, расстояние до лидера находится в пределах от D_{\min} до D_{\max} (номинальная дистанция).

3 Разгон для сокращения дистанции до номинальной: ускорение транспортного средства больше ускорения лидера, но не превышает допустимой границы.

4 Торможение для увеличения дистанции до номинальной: замедление транспортного средства больше замедления лидера, но не превышает допустимой границы.

5 Выравнивание скоростей после разгона: скорость транспортного средства, догнавшего лидера, снижается до скорости лидера с таким расчетом, чтобы к моменту выравнивания скоростей дистанция оказалась номинальной.

6 Выравнивание скоростей после торможения: после того, как в результате торможения дистанция увеличилась до D_{\min} , скорость транспортного средства должна возрасти до скорости лидера при условии сохранения номинальной дистанции.

Режим движения первого транспортного средства в потоке либо задается исследователем, либо определяется в зависимости от имитируемой дорожной обстановки непосредственно в процессе моделирования. В любом случае должны быть заданы ускорение и конечная скорость лидера потока. В зависимости от знака ускорения определяется режим движения лидера потока – разгон или торможение. По достижении конечной скорости лидер потока переходит либо в режим движения с постоянной скоростью, либо в режим “остановка”.

Определение режима движения и ускорения остальных транспортных средств в потоке производится в зависимости от взаимного положения и соотношения скоростей и ускорений каждой пары транспортных средств, одно из которых выступает в качестве лидера, а другое следует за ним и является ведомым. Предлагается следующий **алгоритм управления ведомым транспортным средством** в зависимости от состояния (режима движения), в котором оно находится в данный момент.

1 *Остановка*. Если скорость лидера также равна нулю, то ведомое транспортное средство остается на месте. В противном случае, если расстоя-

ние до лидера превышает D_{\min} , то начинается режим разгона. Ускорение рассчитывается по формуле

$$j_i = j_{i-1} + (v_{i-1} - v_i) / t_v, \quad (3)$$

где j_i и v_i – соответственно ускорение и скорость ведомого; j_{i-1} и v_{i-1} – соответственно ускорение и скорость лидера; t_v – желаемое время разгона до скорости лидера.

Полученное ускорение не должно превышать максимально допустимого, исходя из технических возможностей транспортного средства и условий сцепления ведущих колес с дорогой. Нижней границей найденного ускорения является минимальное значение по условиям комфортности и возможности управления двигателем.

2 Движение со скоростью лидера. Если расстояние до лидера превышает D_{\max} и лидер не тормозит, то ведомый переходит в режим разгона [см. уравнение (3)]. Если же расстояние до лидера меньше D_{\min} , то начинается режим торможения. Замедление рассчитывается по формуле

$$j_i = j_{i-1} - (v_i - v_{i-1})^2 / (2(ds - D_{\text{кр}})), \quad (4)$$

где j_i и j_{i-1} – соответственно замедление ведомого и лидера; ds – дистанция между лидером и ведомым; $D_{\text{кр}}$ – предельно допустимая минимальная дистанция между лидером и ведомым.

Дистанция $D_{\text{кр}}$ определяется пропорционально D_{\min} :

$$D_{\text{кр}} = k_{d2} D_{\min}, \quad (5)$$

где $k_{d2} < 1$ – коэффициент пропорциональности.

Величина полученного замедления не должна превышать максимально допустимого по условиям сцепления колес с дорогой и не должна быть меньше практически реализуемого значения. Возможен случай, когда дистанция между лидером и ведомым является номинальной, но при этом их скорости отличаются на величину, превышающую порог восприятия разницы скоростей водителем ведомого транспортного средства (например, при движении лидера с небольшим ускорением или замедлением). В такой ситуации для сближения скоростей ведомого и лидера используется режим выравнивания скоростей.

Ускорение или замедление при выравнивании скоростей определяется по формуле

$$j_i = j_{i-1} - (v_i - v_{i-1})^2 / (2(ds - D_p)), \quad (6)$$

где D_p – расчетное значение дистанции между лидером и ведомым в момент окончания выравнивания скоростей.

При выравнивании скоростей путем увеличения скорости ведомого величина D_p не должна превышать D_{\max} . Если же выравнивание скоростей происходит за счет снижения скорости ведомого, то дистанция D_p должна быть не меньше D_{\min} . Максимальное ускорение или замедление ограничивается допустимыми по условию комфортности значениями.

3 Разгон. Прежде всего сравниваются скорости ведомого и лидера. Если скорость ведомого не

достигла скорости лидера, то сохраняется режим разгона. В случае увеличения ускорения лидера в процессе разгона происходит корректировка ускорения ведомого таким образом, чтобы сохранить прежнюю разницу между их ускорениями и, следовательно, прежний темп сближения их скоростей. При этом ускорение ведомого не должно превысить максимально возможное значения.

После того как скорость ведомого стала больше скорости лидера, проверяются условия перехода в режим выравнивания скоростей. Предварительно вычисляется замедление, которое должен иметь ведомый, чтобы обеспечить снижение своей скорости до скорости лидера, пока дистанция между ними не стала меньше D_{\min} . Для этого используется уравнение (6). Возможна ситуация, когда скорость ведомого стала больше скорости лидера, дистанция между ними превышает D_{\max} , но лидер движется с замедлением. В этом случае вычисляется замедление, которое должен иметь ведомый, чтобы при торможении до полной остановки расстояние до лидера оказалось не меньше $D_{\text{кр}}$. Расчетная формула имеет вид

$$j_i = v_i^2 / (v_{i-1}^2 / j_{i-1} - 2(ds - D_{\text{кр}})). \quad (7)$$

Переход в режим выравнивания скоростей осуществляется при выполнении любого из следующих условий: величина полученного замедления больше значения, установленного по условиям комфортности, либо больше величины, определяемой условиями сцепления колес с дорогой, либо дистанция между ведомым и лидером стала меньше D_{\max} . Если на момент выполнения любого из перечисленных условий окажется, что дистанция между лидером и ведомым сократилась до D_{\min} , то вместо выравнивания скоростей наступает режим торможения. Такая ситуация может возникнуть, если ведомый уже догнал лидера, а лидер начал резко тормозить.

4 Торможение. В процессе торможения постоянно контролируется соотношение замедлений лидера и ведомого. Если лидер начал снижать скорость с большим замедлением, то и замедление ведомого увеличивается с таким расчетом, чтобы сохранить темп сближения их скоростей. При этом величина замедления ограничивается предельным значением по условиям сцепления.

Как только скорость ведомого станет меньше скорости лидера, начинается проверка условий перехода к выравниванию скоростей. По уравнению (6) вычисляется ускорение, которое должен иметь ведомый, чтобы его скорость успела увеличиться до скорости лидера до того, как дистанция достигнет значения D_{\max} . Если полученная величина ускорения больше комфортного значения или максимально возможного по условиям сцепления, либо дистанция превысит D_{\min} , то начинается выравнивание скоростей. В случае, когда любое из условий перехода к выравниванию скоростей выполнилось, но дистанция между лидером и

ведомым увеличилась до D_{\max} , выравнивание скоростей заменяется режимом разгона. Это возможно, если после торможения лидер сразу перешел в режим разгона.

5 Выравнивание скоростей после разгона. Вначале проверяется, не стала ли дистанция между лидером и ведомым меньше D_{\min} . В этом случае начинается режим торможения. Причем, если замедление, рассчитанное для тормозного режима, окажется меньше замедления при выравнивании скоростей, то сохраняется большее замедление. Следует учитывать, что когда процесс выравнивания скоростей происходит при продолжающемся разгоне лидера, ведомый может двигаться не с замедлением, а с ускорением.

Следующая проверка проводится для того, чтобы установить, изменилось ли соотношение между замедлением (ускорением) ведомого и ускорением лидера. В случае уменьшения ускорения или даже снижения скорости лидера проводится корректировка замедления (ускорения) ведомого с целью выравнивания скоростей в пределах номинальной дистанции. Затем сравниваются скорости ведомого и лидера. Если скорость ведомого по-прежнему больше скорости лидера, то выравнивание скоростей продолжается. Если же из-за изменения режима движения лидера его скорость резко увеличилась, и в силу запаздывания реакции водителя ведомого транспортного средства выравнивания скоростей не произошло, причем скорость ведомого стала меньше скорости лидера, то в случае сохранения номинальной дистанции осуществляется переход к выравниванию скоростей путем увеличения скорости ведомого (режим выравнивания скоростей после торможения). В противном случае, т. е. когда дистанция окажется больше D_{\max} , вместо упомянутого режима начинается разгон.

6 Выравнивание скоростей после торможения. Алгоритм управления в данном режиме по своей структуре аналогичен предыдущему алгоритму. Если дистанция между ведомым и лидером превысит D_{\max} , то начинается режим разгона. В качестве ускорения принимается большее из двух значений: полученного для режима выравнивания скоростей и рассчитанного для режима разгона. При выравнивании скоростей в ходе продолжающегося торможения лидера ведомый может двигаться не с ускорением, а с замедлением. Корректировка ускорения (замедления) ведомого проводится в случае уменьшения замедления или при ускорении лидера с целью сохранения темпа сближения скоростей и их выравнивания в пределах номинальной дистанции.

Получено 02.10.2007

D. V. Rozhansky. Modelling of management of transport in a dense flow.

The lacks of existing mathematical models of transport flows are parsed. The algorithm of simulation of operations of the driver on control of the means of transport is offered at motion in a dense flow. In the basis of algorithm the assumption is necessary that the driver of the back means of transport (wingman) aims to move with speed of the forward means of transport (leader) and to maintain a distance between the leader and wingman in predetermined thresholds. The driver of the conducted means of transport reacts to change of a mode of motion of the leader on expiration of a response time. The acceleration of the conducted means of transport is determined depending on a ratio of speeds both accelerations of the leader and wingman, distance between them, and also mode of motion of a wingman.

Six possible condition (modes of motion) are considered: a stop, motion with speed of the leader, boost, inhibition, equalization of speeds after boost, equalization of speeds after inhibition.

The possible areas of usage of offered simulating algorithm are indicated.

Выравнивания скоростей может не произойти из-за резкого торможения лидера и запаздывания реакции водителя ведомого транспортного средства. При этом скорость ведомого окажется больше скорости лидера. В таком случае, если номинальная дистанция сохраняется, то осуществляется переход к выравниванию скоростей путем торможения (режим выравнивания скоростей после разгона). Если же дистанция меньше D_{\min} , то начинается режим торможения.

7 Каждый из двух рассмотренных режимов выравнивания скоростей заканчивается в случае сближения скоростей лидера и ведомого с заданной точностью. Ведомый переходит в режим движения со скоростью лидера, его скорость становится равной скорости лидера. Ускорению (замедлению) ведомого присваивается значение ускорения (замедления) лидера при условии, что ускорение не должно превышать максимального для данного транспортного средства, а замедление – предельной величины по условиям сцепления колес с дорогой.

Предложенный алгоритм позволяет создать имитационную математическую модель транспортного потока, которая дает возможность исследовать поведение как каждого отдельного транспортного средства, входящего в поток, так и всего потока в целом. Преимущество такой модели перед существующими заключается в том, что вследствие детального воспроизведения управляющих действий водителя при движении в плотном транспортном потоке повышается адекватность модели и тем самым увеличивается достоверность полученных результатов моделирования. Рассмотренный алгоритм может быть использован при проведении исследований в области организации дорожного движения с целью его совершенствования и повышения эффективности.

Список литературы

- 1 Врубель, Ю. А. Организация дорожного движения : в 2 ч. / Ю. А. Врубель. – Минск : Белорусский фонд безопасности дорожного движения, 1996. – Ч. 2. – 328 с.
- 2 Гаврилов, А. А. Моделирование дорожного движения / А. А. Гаврилов. – М. : Транспорт, 1980. – 189 с.
- 3 Дрю, Д. Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю. – М. : Транспорт, 1972. – 424 с.
- 4 Кисляков, В. М. Математическое моделирование и оценка условий движения автомобилей и пешеходов / В. М. Кисляков, В. В. Филиппов, И. А. Школяренко. – М. : Транспорт, 1979. – 200 с.
- 5 Сильянов, В. В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В. В. Сильянов. – М. : Транспорт, 1977. – 303 с.