

УДК 656.13.051/057

Власов Алексей Александрович

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»
Россия, Пенза¹
Доцент кафедры «Организация и безопасность движения»
Кандидат технических наук
E-Mail: vlasov_a71@mail.ru

Горелов Александр Михайлович

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»
Россия, Пенза
Аспирант кафедры «Организация и безопасность движения»
E-Mail: dezel89@mail.ru

Координированное управление въездами на автомагистраль

Аннотация: Предотвращение транспортных заторов на автомагистралях может быть достигнуто путем применения различных методов управления движением, таких как светофорное регулирование на въездах, динамическое ограничение скорости и информирование водителей об условиях и маршрутах движения. Наиболее действенным методом по предотвращению заторов на магистралях является применение светофорного регулирования. В статье показано, что локальные методы управления въездом не обеспечивают предотвращение транспортных заторов при возникновении инцидентов, сопровождающихся снижением пропускной способности одного из участков.

В данном исследовании рассмотрена задача координированного управления въездами на автомагистраль. Предложенная формулировка задачи управления предусматривает минимизацию длины очереди на въездах при ограничениях на максимальную интенсивность движения по отдельным участкам. В данной постановке задачи обеспечивается строгое соблюдение условия предотвращения транспортного затора при распределении избыточного транспортного спроса между въездами.

Оценка эффективности предложенной формулировки задачи управления была проведена на микроскопической модели фрагмента автомагистрали в программе SUMO. В результате моделирования движения подтверждено преимущество координированного управления въездами перед локальным управлением, в особенности при возникновении инцидентов. Преимущество обусловлено учетом полной информации о состоянии участков сети при формировании управляющих воздействий.

Ключевые слова: Автомагистраль; управление въездом; координация; минимизация длины очереди.

Идентификационный номер статьи в журнале 51TVN214

¹ 440028, Пенза, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, кабинет: 5206

Имеющаяся в настоящий момент тенденция к увеличению количества автомобилей и интенсивности движения на автомобильных дорогах создает предпосылки к образованию транспортных заторов. Предотвращение транспортных заторов может быть достигнуто путем применения различных методов управления движением, таких как светофорное регулирование на въездах (в англоязычной литературе именуемое «rampmetering»), динамическое ограничение скорости и информирование водителей об условиях и маршрутах движения [7]. Наиболее действенным методом по предотвращению заторов на магистралях является применение светофорного регулирования. Следует отметить значительное отличие применения светофорного регулирования на автомагистралях от городской транспортной сети. Задачей управления движением на автомобильной магистрали является обеспечение безостановочного движения интенсивных транспортных потоков с большими скоростями и высоким уровнем безопасности движения. С учетом этого, движение транспорта на автомагистрали организуется следующим образом: на магистраль производится дозированный выпуск автомобилей с прилегающей сети автомобильных дорог, при этом движение по автомагистрали не останавливается. Количество выпускаемых на каждом въезде автомобилей должно быть таково, чтобы загрузка магистрали не превышала некоторого оптимального уровня [1,2].

Классическим можно считать метод управления въездом «пропускная способность – спрос» представляющий собой локальную систему управления въездом с компенсацией возмущений [6]. Для вычисления значений управляющих воздействий используют измерения состояний транспортного потока в районе въезда:

$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}(k-1), & \text{if } o_{out}(k) \leq o_{cr} \\ r_{min}, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

где q_{cap} – пропускная способность магистрали в сечении по ходу движения от въезда; q_{in} – измеренная интенсивность потока по магистрали на подходе к въезду; o_{out} – загруженность магистрали (показатель аналогичный плотности), измеренная по ходу движения от въезда; o_{cr} – критическая загруженность (при котором интенсивность движения по магистрали становится максимальным); r_{min} – предустановленное минимальное допустимое значение потока въезда.

Стратегия предусматривает добавление к последнему измерению потока $q_{in}(k-1)$ по мере необходимости такого количество автомобилей с въездом $r(k)$, которое обеспечивает в последующем сегменте интенсивность, близкую к пропускной способности магистрали q_{cap} (рисунок 1). Значение пропускной способности магистрали q_{cap} определяется макроскопической моделью вида:

$$q = \rho \cdot v, \quad (2)$$

где ρ – плотность транспортного потока; $v = V(\rho)$ – скорость транспортного потока; $V(\rho)$ – функция, определяющая форму основной диаграммы транспортного потока.

Функция $V(\rho)$ согласно [7,10] имеет вид:

$$V(\rho) = V_{free} \exp \left[-\frac{1}{a_m} \left(\frac{\rho}{\rho_{crit}} \right)^{a_m} \right], \quad (3)$$

где V_{free} – скорость движения в свободных условиях; ρ – текущая плотность; a_m – параметр модели; ρ_{crit} – критическая плотность движения.

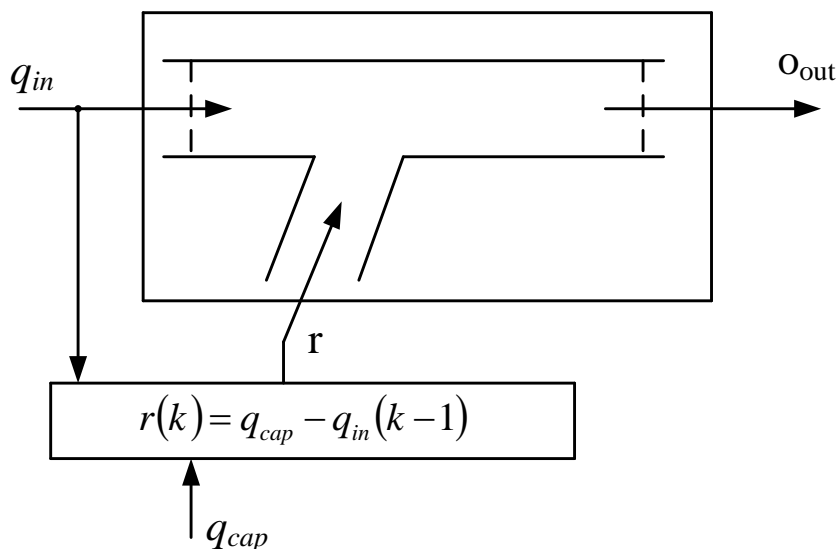


Рис. 1. Стратегия локального управления методом «пропускная способность – спрос»

В работе [10] приведены следующие значения параметров модели: $\rho_{crit} = 35$ авт/км/полосу; $a_m = 1.867$, $V_{free} = 110$ км/ч. Основная диаграмма транспортного потока в координатах «плотность – скорость», определяемая формулой (3) и приведёнными выше параметрами, представлена на рисунке 2.

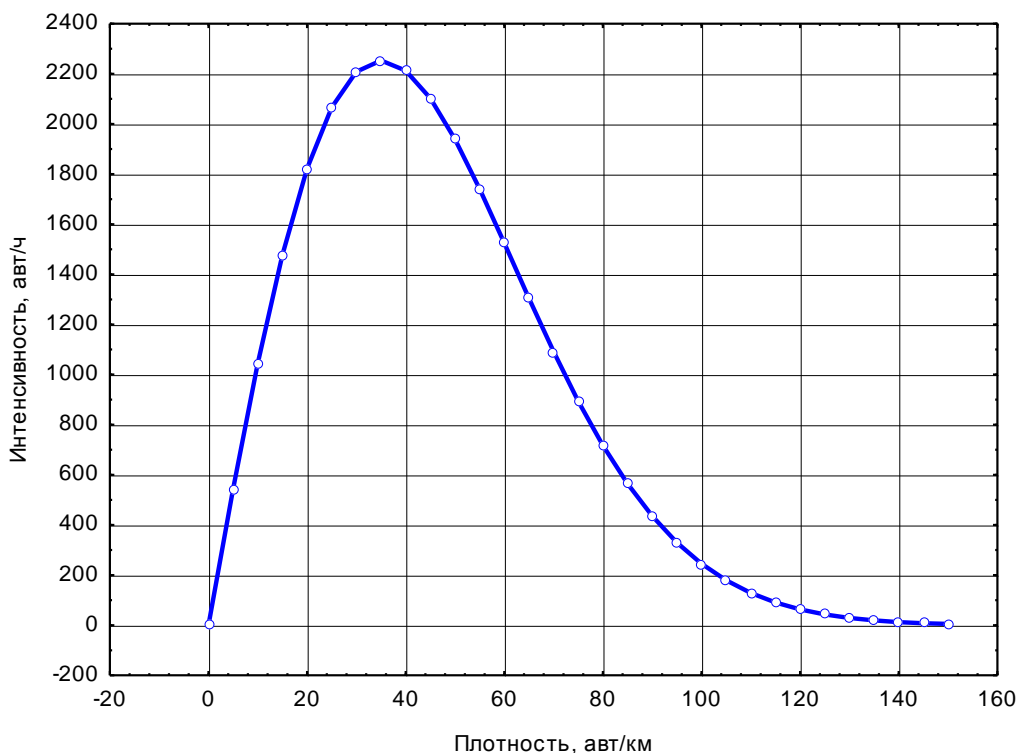


Рис. 2. Диаграмма «плотность - интенсивность»

Метод «пропускная способность – спрос» реагирует на чрезмерную загруженность o_{out} только после того, как превышает пороговое значение o_{cr} . Для ликвидации затора уменьшается поток въезда $r(k)$ до минимального потока r_{min} .

Последнее время большую известность получил метод ALINEA [3,4], реализующий управление с обратной связью (рисунок 3). Управляющие воздействия формируются следующим образом:

$$r(k) = r(k-1) + K_R [\hat{\rho} - \rho_{out}(k)], \quad (4)$$

где K_R – параметр регулирования; $\hat{\rho}$ – желательная плотность транспортного потока для расположенного по ходу движения сегмента, устанавливается по основной диаграмме транспортного потока равной $\hat{\rho} = \rho_{crit}$.

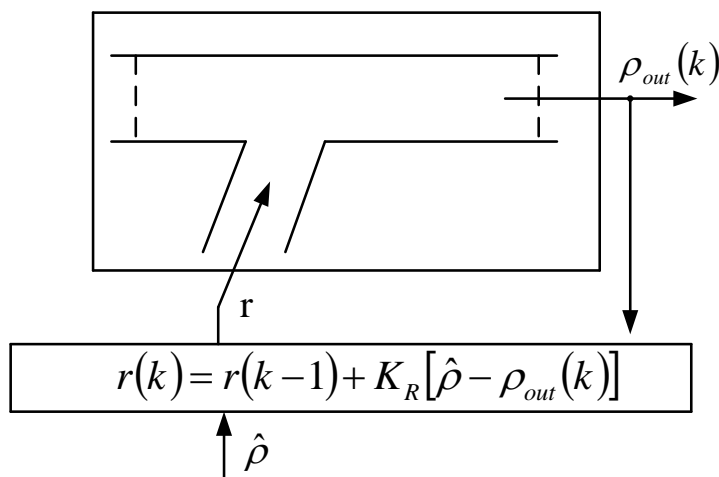


Рис. 2. Стратегия управления ALINEA

ALINEA представляет собой классический P-регулятор. Установка коэффициента усиления K_R производится при настройке регулятора вне режима реального времени. Преимуществом ALINEA перед стратегией «пропускная способность – спрос» является более гладкая реакция на повышение загруженности даже при незначительных изменениях $\hat{\rho} - \rho_{out}(k)$, что позволяет стабилизировать интенсивность движения на уровне, близком к пропускной способности.

К недостаткам локальных методов следует отнести их ограниченность по масштабу воздействий, они оперируют всего лишь одним въездом и при возникновении затора вводимых ограничений недостаточно для его ликвидации. Ограничения на въезды с соседних пересечений могут быть установлены только при достижении затором соответствующих зон контроля.

Более эффективно координированное управление, когда ограничения устанавливаются не только на въезде, около которого образуется затор, но и на соседних. В качестве примера можно привести стратегию управления METALINE [5], которую можно рассматривать как обобщение метода ALINEA. Управляющие воздействия на множестве контролируемых въездов определены как:

$$r(k) = r(k-1) - K_1 [o(k) - o(k-1)] + K_2 [\hat{\rho} - \rho(k)], \quad (5)$$

где $r = [r_1 \dots r_m]^T$ – вектор m управляемых объемов движения на въездах; $o = [o_1 \dots o_n]^T$ – вектор n взвешенных плотностей на протяжении магистрали; $\rho = [\rho_1 \dots \rho_m]^T$ – подмножество o , включающее m зон размещения зон контроля плотностей транспортного потока, для которых

задано предопределенное множество значений $\hat{\rho} = [\hat{\rho}_1 \dots \hat{\rho}_m]^T$; K_1 и K_2 – матрицы коэффициентов регулирования.

При насыщении въезда возможно блокирование прилегающих автомобильных дорог или городских улиц. В стратегиях управления ALINEA и METALINE для уменьшения очереди на въезде отменяются управляющие воздействия регулятора, позволяя тем самым большему количеству автомобилей въезжать на магистраль. В этом случае возможно резкое увеличение плотности транспортного потока в районе въезда, что ведет к образованию затора и блокированию въезда.

К недостаткам метода METALINE следует отнести необходимость калибровки матриц коэффициентов усиления вне режима реального времени. Кроме того, при резком изменении условий движения на магистрали, вызванном закрытием отдельных полос движения (при дорожно-транспортных происшествиях, проведении дорожных работ и т.д.), возникает ситуация при которой METALINE не в состоянии эффективно предотвратить образование затора.

Сформулируем задачу оптимального управления въездами на автомагистраль. В качестве цели управления примем минимизацию длины очередей на въездах:

$$\mathbf{L}(k) \rightarrow \min, \quad (6)$$

и установим ограничения по интенсивности движения на связях автомагистрали:

$$\mathbf{lb} \leq \mathbf{r} \leq \mathbf{ub}, \quad (7)$$

$$\mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\text{cap}}, \quad (8)$$

где \mathbf{lb} , \mathbf{ub} – векторы, определяющие соответственно минимальное и максимальное количество автомобилей, которое может въехать на автомагистраль; \mathbf{q} – интенсивность движения автомобилей за въездами; \mathbf{q}_{cap} – критическая (максимальная) интенсивность движения на участках автомагистрали.

Рассмотрим подробнее переменные состояния автомагистрали, входящие в задачу управления (6-8). Длины очередей на въездах на шаге управления k определяются транспортным спросом $\hat{\mathbf{o}}$ и количеством автомобилей \mathbf{r} , покинувших въезд за период действия управления τ .

$$\mathbf{L}(k) = \mathbf{L}(k-1) + (\hat{\mathbf{o}} - \mathbf{r}) \cdot \tau. \quad (10)$$

Левая граница выражения (7) может быть определена по аналогии с выражением (1) следующим образом:

$$\mathbf{lb} = \mathbf{r}_{\text{min}}, \quad (11)$$

Правая часть выражения (7) определяется транспортным спросом $\hat{\mathbf{o}}$ на въездах с учетом наличия очередей:

$$\mathbf{ub} = \min \left(\mathbf{c}, \frac{\mathbf{L}_{(n-1)} + \hat{\mathbf{o}} \cdot \tau}{\tau} \right), \quad (12)$$

Определим ограничения по интенсивности движения, для чего рассмотрим функционирование участка автомагистрали, имеющего n въездов. Интенсивность движения на участке автомагистрали определяется следующим выражением:

$$\begin{cases} q_1 = q_0 + 1 \cdot r_1 + 0 \cdot r_2 + \dots + 0 \cdot r_n \\ q_2 = q_0 + 1 \cdot r_1 + 1 \cdot r_2 + \dots + 0 \cdot r_n \\ q_n = q_0 + 1 \cdot r_1 + 1 \cdot r_2 + \dots + 1 \cdot r_n \end{cases}$$

или в матричной форме:

$$\mathbf{q} = q_0 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{r}, \quad (13)$$

где \mathbf{A} – матрица транспортных связей автомагистрали; q_0 – интенсивность движения в начале участка.

При наличии съездов \mathbf{q}_{out} с автомобильной дороги выражение (13) принимает вид:

$$\mathbf{q} = q_0 + \mathbf{A} \cdot \mathbf{r} - \mathbf{q}_{out}. \quad (14)$$

Критическая интенсивность движения на участках автомагистрали \mathbf{q}_{cap} определяется по основной диаграмме транспортного потока согласно формулам (2,3) при $\rho = \rho_{crit}$:

$$\mathbf{q}_{cap} = \mathbf{N} \cdot \rho_{crit} \cdot \mathbf{V}_{free} \exp\left[-\frac{1}{a_m}\right], \quad (15)$$

где \mathbf{N} – вектор количества полос движения на участках автомагистрали.

С учетом выражений (10, 11, 12, 14) задача управления въездами на автомагистраль принимает вид:

$$\mathbf{L}(k-1) + (\hat{\mathbf{o}} - \mathbf{r}) \cdot \tau \rightarrow \min, \quad (16)$$

при ограничениях:

$$\mathbf{r}_{min} \leq \mathbf{r} \leq \min\left(\mathbf{c}, \frac{\mathbf{L}_{(n-1)} + \hat{\mathbf{o}} \cdot \tau}{\tau}\right), \quad (17)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{r} \leq (\mathbf{q}_{cap} + \mathbf{q}_{out} - q_0). \quad (18)$$

Рассмотрим числовой пример решения сформулированной выше задачи оптимального координированного управления въездами на примере участка автомагистрали, представленного на рисунке 3. Для объективной оценки эффективности найденного решения создана микроскопическая имитационная модель в программе SUMO [9, 11].

Управление светофорами, установленными на въездах автомагистрали, было реализовано в программе на языке Python. Выбор языка программирования обусловлен возможностями реализации оценки состояния автомагистрали и передачи управляющих сигналов через интерфейс модуля TraCI. Для решения задачи управления (16 - 18) использовался модуль OpenOpt[8], имеющий необходимые функции решения задач оптимизации.

Исследование состояния автомагистрали при локальном и координированном управлении проводилось в двух режимах. При первом, штатном режиме поддерживалась критическая интенсивность движения 4000 авт/ч. Второй режим моделировал возникновение инцидента и снижение пропускной способности одного из сегментов автомагистрали в результате исключения из движения одной из полос (наблюдаемое при проведении ремонтных работ, совершении дорожно-транспортных происшествий и т.д.). Моделирование данной ситуации производилось путем остановки транспортного средства на 3 полосе

перегона E-F (рисунок 4). В качестве базовой была принята стратегии управления въездом «пропускная способность – спрос».

Состояние транспортной сети оценивалось макроскопическими характеристиками – плотностью транспортных средств на полосу движения, средней скоростью и временем движения автомобилей по транспортным связям.

В штатном режиме функционирования автомагистрали локальное и координированное управление обеспечивали движение автомобилей без образования транспортных заторов. На связях DE и EF наблюдалось повышение плотности транспортного потока до 100 и 110 авт/км при локальном управлении, и соответственно до 80 и 100 авт/км при координированном (рисунок 4). Как видим на рисунке 5, повышение плотности транспортного потока свыше 60 авт/км приводило к снижению средней скорости движения до 35 – 40 км/ч (рисунок 5) и увеличению времени движения по участкам автомагистрали.

В случае возникновения описанного выше инцидента при локальном управлении происходило образование транспортного затора и блокирование входящих связей, в то время как при координированном управлении образование затора не наблюдалось (рисунок 6 – 7). В результате снижения скорости на заблокированных участках до 10 км/ч, время движения по ним увеличилось в 4 – 5 раз в сравнении с координированным управлением (рисунок 8).

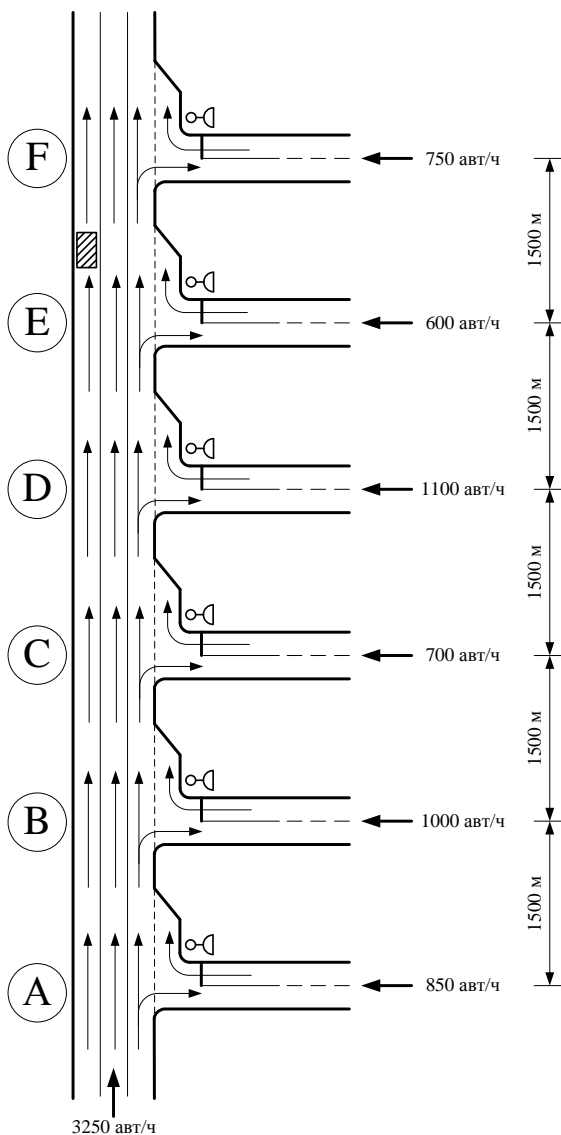


Рис. 3. Схема автомагистрали

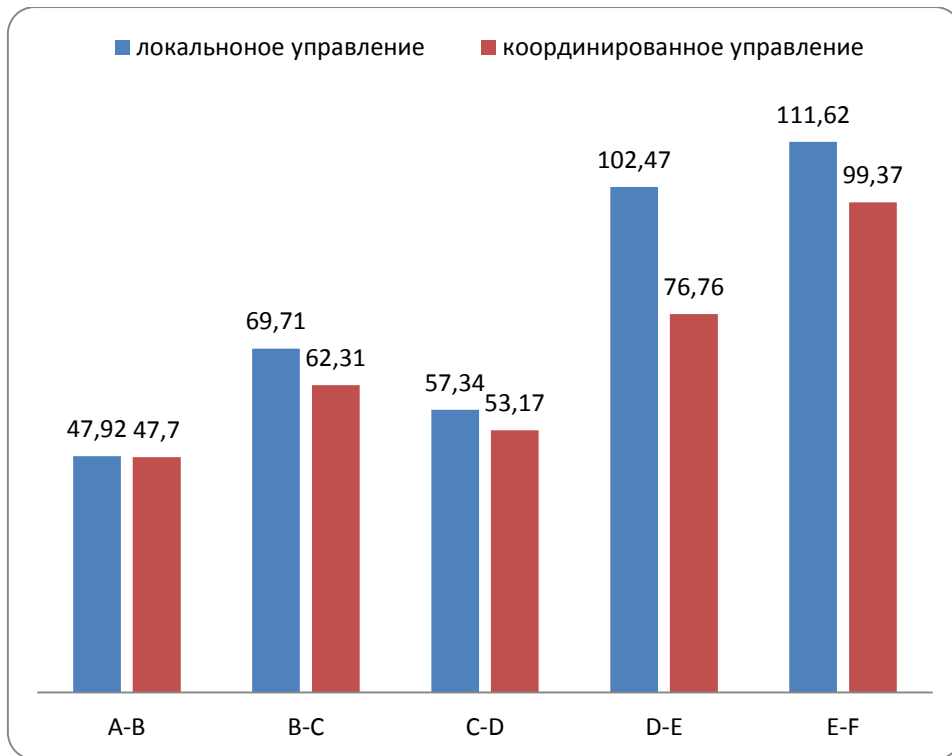


Рис. 4. Плотность на перегонах автомагистрали в штатном режиме

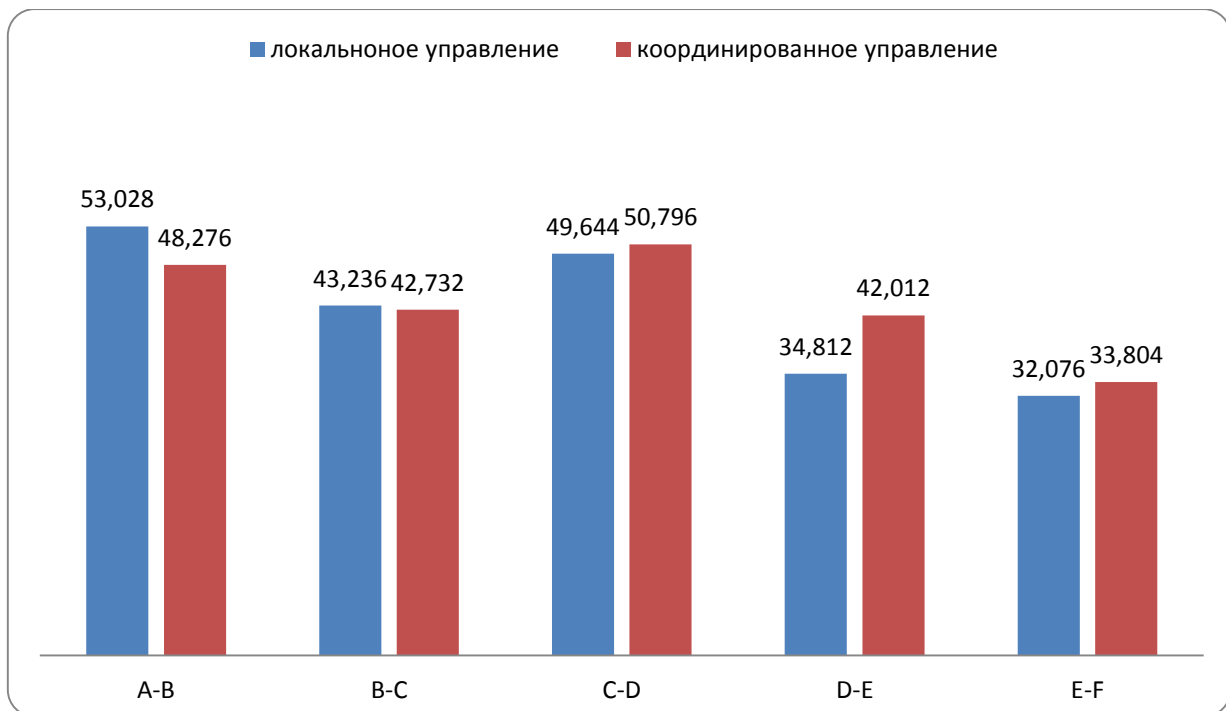


Рис. 5. Скорость на перегонах автомагистрали в штатном режиме

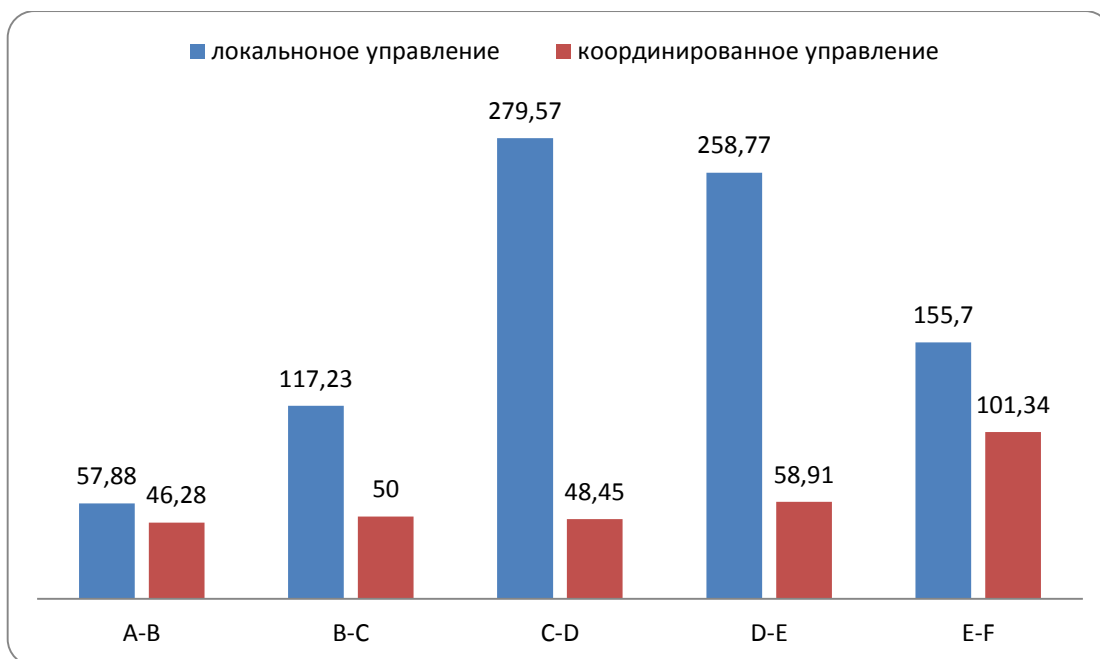


Рис. 6. Плотность на перегонах автомагистрали при исключении из движения одной из полос

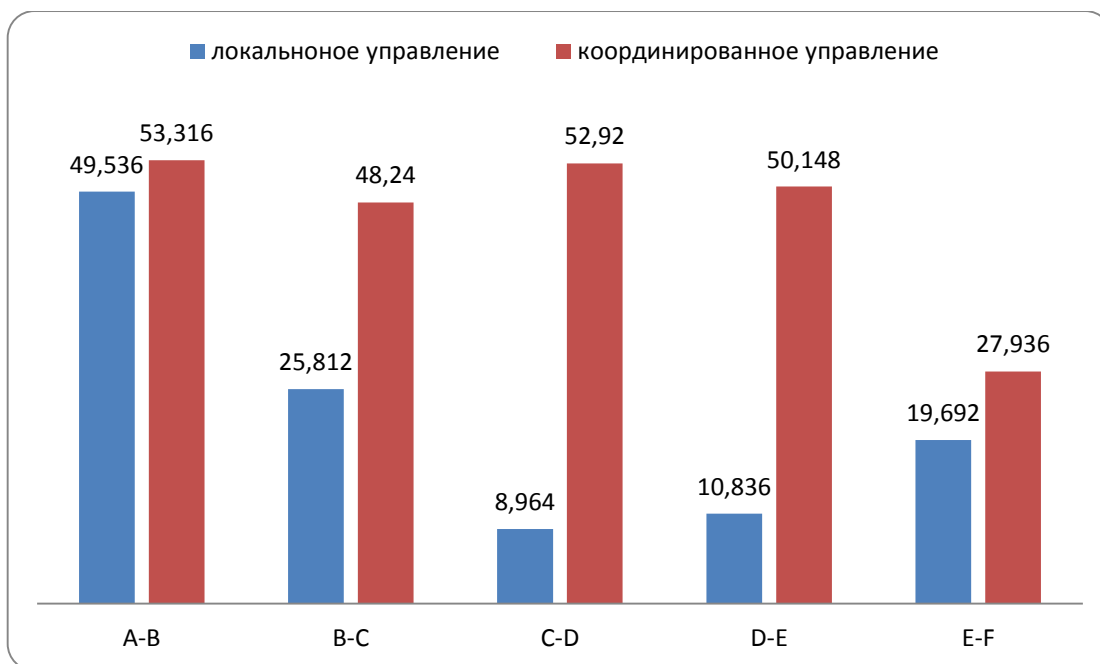


Рис. 7. Скорость на перегонах автомагистрали при исключении из движения одной из полос

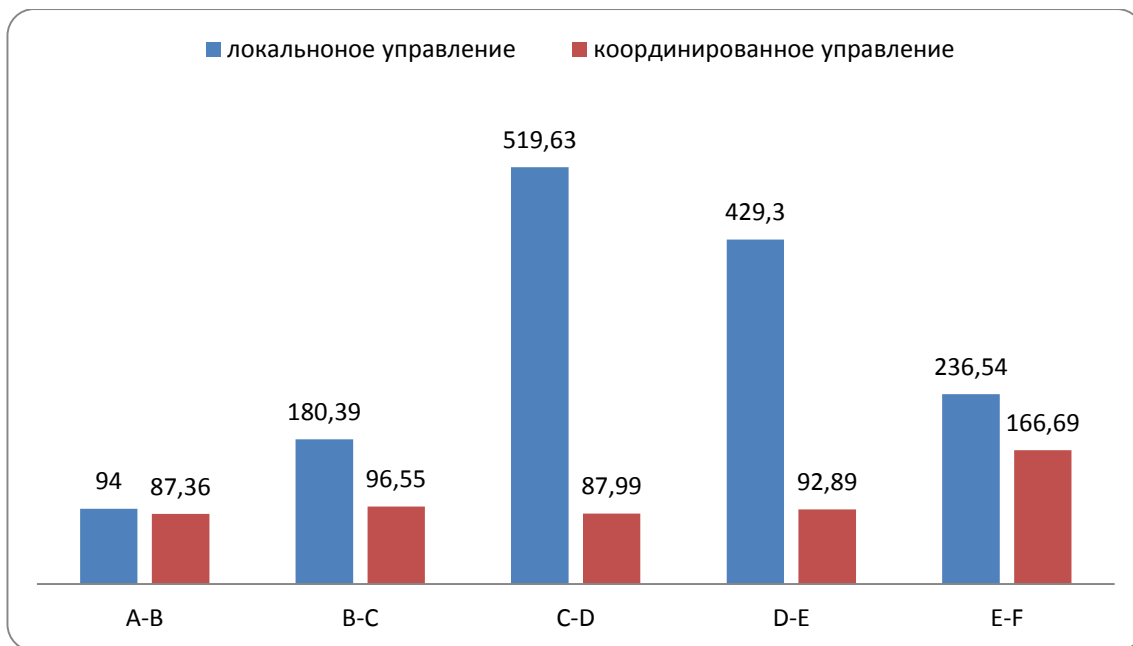


Рис. 8. Время движения по перегонам автомагистрали при исключении из движения одной из полос

Результаты имитационного моделирования показали, что координированное управление въездами имеет существенное преимущество по сравнению с локальными методами, в особенности при возникновении инцидентов. Преимущество обусловлено учетом полной информации о состоянии участков сети при формировании управляющих воздействий.

Предложенная постановка задачи координированного управления обеспечивает выполнение предварительно установленных ограничений по интенсивности движения на всем протяжении зоны управления при распределении избыточного транспортного спроса между въездами. Благодаря этому исключается образование транспортных заторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методическое руководство по стратегии управления транспортными потоками в системах автоматизированного регулирования движения на автомобильных магистралях (АРДАМ) [Текст]. – М.: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1980, – 87 с.
2. Управление движением на автомобильных дорогах [Текст]/ Васильев А.П., Фримштейн М.И. – М.: Транспорт, 1979, – 296 с.
3. ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering [Текст] / Papageorgiou, M., Haj-Salem, H., Blossville, J.M. // Transportation Research Record 1320, – 1991. – pp. 58–64.
4. ALINEA: A local ramp metering: Summary of field results [Текст] / Papageorgiou, M., Haj-Salem, H., Middelham, F. // Transportation Research Record 1603, – 1998, – pp. 90–98.
5. Design and simulation test of coordinated ramp metering control (METALINE) for A10-west in Amsterdam [Текст] / Diakaki, C., Papageorgiou, M. // Internal report, Dynamic Systems and Simulation Laboratory – Technical University of Crete, Chania, Greece, 1994.
6. Guidelines for design and operating of ramp control systems [Текст] / Masher, D.P., Ross, D.W., Wong, P.J., Tuan, P.L., Zeidler, A., Peracek, S. // Technical Report NCHRP 3-22, SRI Project 3340 – Standford Research Institute, SRI, Menid Park, California, USA, 1975
7. Integrated Control of Mixed Traffic Networks using Model Predictive Control [Текст] / M. van den Berg. // TRAIL Thesis Series T2010/4 – The Netherlands TRAIL Research School, 2010.
8. MatrixProblemsGroup [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://openopt.org/Problems> (дата обращения 24.03.2014)
9. Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow [Текст] / S.Krauß, P. Wagner, C.Gawron // Physical Review E, – 1997. – volume 55, number 304. – pp. 55-97
10. Optimal coordinated and integrated motorway network traffic control [Текст]/ A. Kotsialos, M. Papageorgiou, A.Messmer// In Proceedings of the 14th International Symposium of Transportation and Traffic Theory (ISTTT), – Jerusalem, Israel, 1999. – pp 621–644
11. Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban Mobility [Текст]/ D.Krajzewicz, J. Erdmann, M.Behrisch, L. Bieker. // International Journal On Advances in Systems and Measurements, – 2012. – 5 (3&4). – pp. 128-138

Рецензент: Профессор кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» ПГУАС, д.т.н. Родионов Юрий Владимирович.

Aleksey Vlasov

Penza State University of Architecture and Building
Russia, Penza
E-Mail: vlasov_a71@mail.ru

Aleksandr Gorelov

Penza State University of Architecture and Building
Russia, Penza
E-Mail: dezel89@mail.ru

Coordination of ramp metering to highway

Abstract: Preventing of transport traffic blocks on highways can be reached by application of various control methods by movement, such as traffic lights on ramps, a dynamic speed limitation and informing of drivers about movement conditions and routes. The most effective method to preventing of traffic blocks on highways is application of traffic lights. This paper shown, that local control methods do not provide preventing of transport traffic blocks on ramps at origin of the incidents accompanied by capacity reduction of one of sections.

In the given research the problem of coordination ramp metering to highway is considered. The offered statement of the control problem provides minimization of queue length on ramp at condition of limitations maximum intensity of movement on separate sections. The strict observance condition for preventing of transport traffic block is allocation of redundant transport demand between ramps.

The estimation of effectiveness of the offered statement of the control problem has been spent on microscopic model of a highway fragment in program SUMO. As a result of movement modeling advantage of coordination ramp metering before local is confirmed, in particular at origin of incidents. Advantage is caused by the registration of complete information about network sections state for control.

Keywords: Highway; ramp metering; coordination; minimization of queue length.

Identification number of article 51TVN214

REFERENCES

1. Metodicheskoe rukovodstvo po strategii upravlenija transportnyh potokami v sistema avtomatizirovannogo regulirovanija dvizhenija avtomobil'nyh magistraljah (ARDAM) [Tekst]. – M.: CBNTI Minavtodora RSFSR, 1980, – 87 p.
2. Upravlenie dvizhenija avtomobil'nyh dorogah [Tekst]/ Vasil'ev A.P., Frimshtejn M.I. – M.: Transport, 1979, – 296 p.
3. ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering [Текст] / Papageorgiou, M., Haj-Salem, H., Blossville, J.M. // Transportation Research Record 1320, – 1991. – pp. 58–64.
4. ALINEA: A local ramp metering: Summary of field results [Текст] / Papageorgiou, M., Haj-Salem, H., Middelham, F. // Transportation Research Record 1603, – 1998, – pp. 90–98.
5. Design and simulation test of coordinated ramp metering control (METALINE) for A10-west in Amsterdam [Текст] / Diakaki, C., Papageorgiou, M. // Internal report, Dynamic Systems and Simulation Laboratory – Technical University of Crete, Chania, Greece, 1994.
6. Guidelines for design and operating of ramp control systems [Текст] / Masher, D.P., Ross, D.W., Wong, P.J., Tuan, P.L., Zeidler, A., Peracek, S. // Technical Report NCHRP 3-22, SRI Project 3340 – Standford Research Institute, SRI, Menid Park, California, USA, 1975
7. Integrated Control of Mixed Traffic Networks using Model Predictive Control [Текст] / M. van den Berg. // TRAIL Thesis Series T2010/4 – The Netherlands TRAIL Research School, 2010.
8. Matrix Problems Group [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: [http://openopt.org/Problems\(data obrashhenija 24.03.2014\)](http://openopt.org/Problems(data obrashhenija 24.03.2014))
9. Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow [Текст] / S.Krauß, P. Wagner, C.Gawron // Physical Review E, – 1997. – volume 55, number 304. – pp. 55-97
10. Optimal coordinated and integrated motorway network traffic control [Текст]/ A. Kotsialos, M. Papageorgiou, A. Messmer // In Proceedings of the 14th International Symposium of Transportation and Traffic Theory (ISTTT), – Jerusalem, Israel, 1999. – pp 621–644
11. Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban Mobility [Текст]/ D.Krajzewicz, J. Erdmann, M.Behrisch, L. Bieker. // International Journal On Advances in Systems and Measurements, – 2012. – 5 (3&4). – pp. 128-138