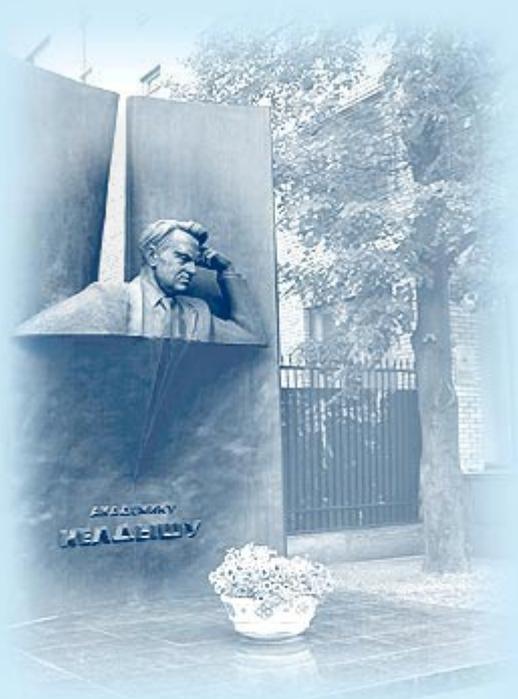




ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 105 за 2021 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

В.В. Павловский,
Е.В. Павловский,
А.В. Подпросветов

АвтоНива: развитие системы
моделирования движения

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Павловский В.В., Павловский Е.В., Подпросветов А.В. АвтоНива: развитие системы моделирования движения // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 105. 19 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2021-105>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-105>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

В.В. Павловский, Е.В. Павловский, А.В. Подопросветов

**АвтоНива: развитие системы
моделирования движения**

Москва — 2021

В.В. Павловский, Е.В. Павловский, А.В. Подопрсветов

АвтоНива: развитие системы моделирования движения

В данной работе описано развитие системы моделирования движения автономного автомобиля «Нива» со съемной системой автоматического управления на многополосной дороге. Предложены модели различных препятствий и сужений дороги, а также методы более гибкого описания поведения водителей на дороге. Приведены результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: Компьютерный симулятор, система управления, автономный автомобиль, робоавтомобиль, смена полосы движения.

V. V. Pavlovsky, E. V. Pavlovsky, A. V. Podoprosvetov

AvtoNiva: development of a motion simulation system

This work describes development of a movement simulation system for autonomous car "Niva" with a detachable self-driving system on a multi-lane road. Models for various obstacles and shrinkings of road are presented, as well as methods for more flexible description of driver behavior on the road. Results of numerical experiments are presented.

Key words: Computer simulator, control system, autonomous car, robotic car, lane change.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 19-08-01159, 19-01-00123.

Оглавление

Введение	3
Моделирование дорожного движения.	3
Проект «АвтоНива»	5
Структура модели.....	6
Сужения дороги и препятствия.....	7
Переменные параметры автомобилей.....	15
Заключение.....	17
Библиографический список.....	18

Введение

В данной работе описана система моделирования дорожного движения и перестроений автомобилей на многополосной дороге, предназначенная для разработки и развития алгоритмов системы автоматического вождения в рамках проекта "АвтоНива".

Отметим, что системы автоматического вождения в последнее время привлекают очень широкое внимание как исследователей, так и коммерческих компаний. В мире существует немало проектов автоматических водителей, находящихся на разном уровне автономности. В частности, можно отметить разработки компаний Tesla и Google, а из российских — Яндекса. Несмотря на это, создать полностью автоматическую систему вождения, способную справляться с любыми дорожными ситуациями без участия человека, пока не удалось, и исследования в этой области продолжают оставаться крайне актуальными.

В частности, немало работ посвящено теме перестроений на многополосных дорогах и выбору оптимальной стратегии перестроения. Наряду с работами, предлагающими непосредственно заданные правила для учета различных параметров [1-3], рассматриваются модели с использованием байесовских сетей для учета неопределенности измерений или прогнозирования намерения смены полос, модели на основе скрытых Марковских моделей, модели с использованием метода опорных векторов и многие другие. Все шире используются и нейронные сети [6]. Для оптимизации поведения также могут быть выбраны различные критерии – такие как минимизация торможений, избегание столкновений [7] и другие. Также рассматриваются модели, в которых автомобили имеют те или иные каналы связи между собой, что особенно актуально в случае автоматизированных самоуправляемых автомобилей.

Разнообразие методов и критериев для решения задачи сделало необходимой разработку системы моделирования, позволяющей исследовать разные методы и их поведение в различных дорожных условиях.

Моделирование дорожного движения

Моделирование дорожного движения является важной задачей не только для разработки средств автономного вождения, но и само по себе, для оптимизации организации дорожного движения в городах и на шоссе, и уже давно привлекает внимание исследователей. Различные подходы к этой задаче прежде всего можно разделить на макромоделли, рассматривающие транспортный поток как сплошную среду и применяющие к ней законы гидроаэродинамики, и микромоделли, рассматривающие движение отдельных

автомобилей. По этой классификации предлагаемая модель относится к микромоделям.

Многие микромодели используют традиционный подход к моделированию механических систем, вводя ускорения и скорости автомобилей и рассматривая их движение в непрерывной среде. В то же время можно отметить, что в последнее время набирает популярность дискретный подход, основанный на клеточных автоматах, при котором дорога представляется набором дискретных ячеек, и машины перемещаются из одной ячейки в другую. Новизна же авторского подхода состоит в использовании смешанной дискретно-непрерывной модели: движение автомобилей вдоль дороги рассматривается как непрерывное; в то же время дорога представляется набором отдельных полос движения, и между полосами машины перемещаются дискретно. Такая модель эффективна вычислительно, поскольку вместо относительно сложной геометрии на плоскости сводит задачу к простой одномерной, и в то же время, по мнению авторов, точнее моделирует движение, чем полностью дискретные модели.

Также особенностью разработанной модели является использование стайного подхода. Стайное управление привлекает большое внимание в последнее время; это метод управления группами роботов, при котором вместо задания правил поведения для группы в целом задаются правила поведения отдельных агентов. А уже затем, в результате действий отдельных агентов, синтезируется нужное поведение для группы в целом.

В соответствии с этими принципами каждый автомобиль следует ряду простых правил; при этом правила одинаковы для всех автомобилей, но имеют ряд параметров, варьируемых и выбираемых случайно при создании каждого агента-автомобиля. Таким образом моделируются разнообразие характеров водителей и их поведения на дороге.

Построенная по этим принципам система моделирования разрабатывается авторами уже несколько лет, и изначально была создана именно для моделирования транспортных потоков – как на искусственных модельных примерах, так и на реальных развязках г. Москвы [10].

Отличие системы моделирования для проекта «АвтоНива» состояло в переносе фокуса моделирования с дороги на машину: система моделирования перекрестка рассматривает движение через статичный перекресток машин, генерируемых с одной стороны перекрестка и убираемых с другой. В то же время система моделирования «АвтоНивы» следит за выделенной машиной, движущейся по моделируемой бесконечной дороге: новые сегменты дороги случайно генерируются и добавляются с одной стороны, а пройденные убираются с другой. В текущей версии система моделирует пять сегментов перед «АвтоНивой» и пять позади.

Проект «АвтоНива»

Этот проект состоит в разработке и развитии съемной системы автоматического управления для автомобиля «Нива» (рис. 1).



Рис 1. «АвтоНива»

На предыдущих этапах проекта была разработана система управления нижнего уровня, обеспечивающая управление всеми подсистемами машины, а также система среднего уровня, реализующая локализацию и движение по траекториям.

На текущем этапе проекта идет разработка различных алгоритмов автоматического управления, которые отрабатываются как на представленной в работе системе моделирования, так и на реальном автомобиле. Также в рамках проекта разрабатывается система распознавания дорожных объектов, основанная на системе распознавания образов с помощью метода геометризованных гистограмм [8,9].

Структура модели

Как уже говорилось выше, система моделирования опирается на разработанную авторами смешанную дискретно-непрерывную архитектуру. В рамках этой модели дорога представляется набором отдельных полос движения, и автомобили в основном перемещаются в пределах полос, выходя из них только для перестроения. Таким образом, модель является дискретной в поперечном направлении, в то же время вдоль дороги движение моделируется непрерывно.

Технически автомобили в пределах одной полосы движения организуются в двусвязный список, так что каждая машина взаимодействует одновременно со следующей и с предыдущей. При перемещении между полосами машина находится одновременно в двух списках (такая возможность заложена в систему), ограничивая движение одновременно в обеих полосах; по завершении маневра перестроения машина убирается из списка старой полосы.

Движение машин в полосе определяется их скоростью. При этом каждая машина имеет свою "желаемую скорость", которая задается случайно при создании машины, и на свободной дороге машина поддерживает эту скорость. Но при приближении к другому автомобилю скорость начинает снижаться для предотвращения аварии; в частности, скорость автомобиля определяется формулой

$$v = \min(v_{\text{желаемое}}, v_{\text{пред}} + K(d - d_0)),$$

где $v_{\text{желаемое}}$ – желаемая скорость, $v_{\text{пред}}$ – скорость предыдущего (идущего впереди) автомобиля, K – коэффициент торможения, d – расстояние до предыдущего автомобиля, d_0 – минимальное расстояние, фиксированный параметр. Таким образом, догнав более медленный автомобиль, водитель начинает постепенно снижать скорость, вплоть до выравнивания скоростей на расстоянии d_0 . Но одновременно вступают в действие правила перестроения.

Задача перестроения в рамках системы моделирования разбивается на два вопроса: «хочет» ли автомобиль перестроиться и «может» ли он перестроиться. Для решения первого вопроса применяются следующие правила:

- автомобиль «хочет» перестроиться влево, если он догнал более медленный автомобиль;
- автомобиль хочет перестроиться вправо (уступить дорогу), если его догнал более быстрый автомобиль.

Возможность перестроения определяется свободностью полосы, в которую планируется перестроение. А именно, если автомобиль в данный момент имеет координату x вдоль полосы, для перестроения в соседней полосе должен быть свободен отрезок $[x - A; x + B]$, где A и B – заданные параметры. Если же перестроение невозможно, автомобиль продолжает движение в своей полосе (постепенно замедляясь при необходимости по приведенной выше формуле скоростей), ожидая появления «окна» в соседнем потоке.

Эти правила движения применяются и для «АвтоНивы», и для моделирования других водителей на дороге.

В описанном виде система была реализована на предыдущем этапе развития проекта. В новой версии системы было добавлено моделирование препятствий и сужений дороги и моделирование переменного поведения водителей на дороге. Эти расширения и эксперименты с ними описаны далее.

Сужения дороги и препятствия

На новом этапе работы в модель были добавлены препятствия на дороге. Концептуально препятствие представляет собой условно прямоугольную область (изгибающуюся, однако, вместе с дорогой), имеющую некоторую длину и блокирующую на своем протяжении одну или несколько полос движения. В рамках этой общей концепции становится возможным моделировать три вида препятствий:

- сужение дороги: препятствие значительной длины, блокирующее крайнюю полосу дороги
- ремонт дороги: препятствие значительной длины, которое может блокировать как крайнюю, так и средние полосы
- авария: препятствие, блокирующее одну из полос дороги на небольшом протяжении

На следующей иллюстрации (рис. 2) показан рабочий экран системы моделирования в момент проезда «АвтоНивой» моделируемой аварии (розовый прямоугольник показывает заблокированный участок полосы). Можно видеть, что машины слева от помехи притормаживают и перестраиваются, а справа – возвращаются на эту полосу. Красным цветом показана «АвтоНива», синим – остальные участники движения. Белые стрелки обозначают взаимодействие между машинами – задняя имеет большую желаемую скорость и хотела бы обогнать переднюю, но возможности перестроений ограничены другими машинами и, в данном случае, препятствием. В целом на иллюстрации показан

весьма плотный транспортный поток, поэтому возможности перестроений ограничены.

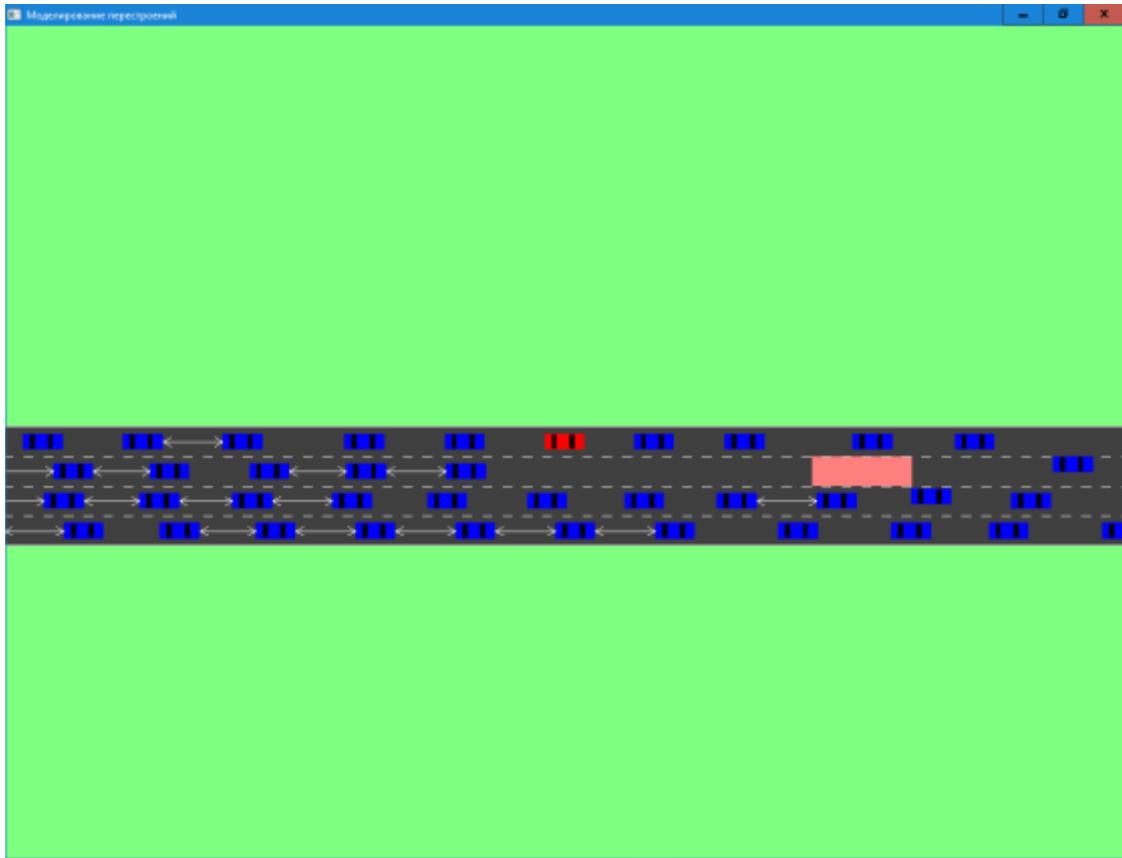


Рис 2. Моделирование препятствия

Заблокированный участок является непроходимым для автомобилей: при приближении к нему автомобили постепенно снижают скорость вплоть до полной остановки, используя ту же модель, что и для приближения к впереди идущей машине: скорость движения ограничивается величиной Kd , где d – расстояние до препятствия, K – коэффициент замедления.

Кроме этого, при приближении к заблокированному участку автомобили начинают пытаться перестроиться в соседние ряды. Автомобиль «видит» препятствие на расстоянии 100 м, и ближе этого расстояния применяются следующие правила:

- автомобиль «не хочет» перестраиваться в ряд с препятствием, даже если его к этому «подталкивают» (в соответствии с изложенными выше правилами) соседние автомобили;
- если препятствие примыкает к краю дороги, автомобиль «хочет» перестраиваться в противоположную сторону;
- если препятствие занимает несколько полос, автомобиль перестраивается в ту сторону, которая ближе;

- при прочих равных условиях направление перестроения выбирается случайно.

Для этих правил было проведено численное моделирование движения с разной плотностью потока машин. Но сначала приведем для сравнения данные моделирования для дороги без препятствий (Таблица 1).

Таблица 1.

плотность потока	средняя скорость	число перестроений	процент времени ожидания	число маневров
12-18	54,045	7	30,967	21
15-25	54,337	31	37,022	31
20-35	74,554	22	13,505	23
30-50	87,949	17	6,784	20
40-60	92,833	38	11,302	17
50-70	92,217	18	6,375	6
70-100	95,956	1	0	3
100-150	97,766	15	1,158	3
150-200	99,186	11	0,567	1

В первом столбце таблицы приведена характеристика плотности потока – расстояние между машинами (в метрах) при их изначальной генерации. Точнее, новая машина на полосе создается тогда, когда предыдущая отъедет от края на это расстояние.

Вторая величина – это основной интересующий нас показатель: средняя скорость движения моделируемой «Нивы» на отрезке движения (моделировалось 30 минут реального времени, за которые «Нива» хотела проехать 50 км, двигаясь с желаемой скоростью 100 км/час). Видно, что скорость движения падает с ростом плотности потока.

В третьем столбце указано число перестроений, а в четвертом – процент времени, в течение которого «Нива» ожидала возможности перестроения. Видно, что при низкой плотности потока число перестроений меняется случайно, но скорость движения почти не ограничивает – время ожидания минимально, а средняя скорость близка к желаемой скорости 100 км/час. В то же время при высокой плотности потока число перестроений растет; а при совсем высокой – снова падает при выросшем времени ожидания: «Нива» проводит много времени, ожидая просвета в соседней полосе.

Наконец, последний столбец показывает число маневров, потребовавших торможения соседних машин и, таким образом, создавших им помеху. Видно, что оно также растет с ростом плотности потока.

Для более наглядного сравнения приведем графики этих параметров (рис. 3). На этом и последующих графиках жирной линией показана средняя

скорость движения, тонкой линией – число перестроений, и тонкой пунктирной линией – время ожидания перестроения.

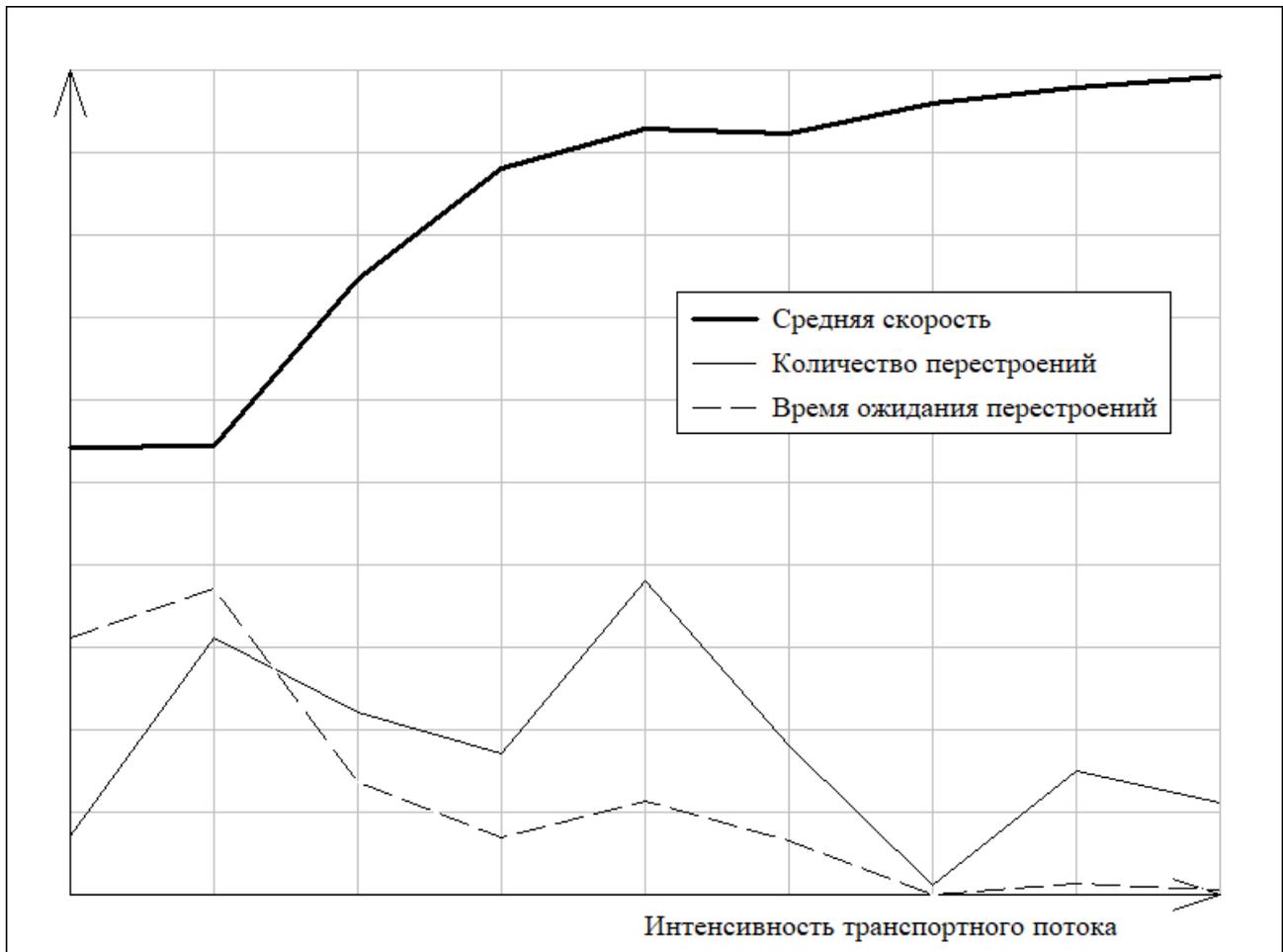


Рис 3. Результаты моделирования в отсутствие препятствий

Перейдем к результатам моделирования при наличии препятствий. Следующая таблица (Таблица 2) приводит результат моделирования в условиях периодически сужающейся дороги. Точнее, в модели рассматривалась четырехполосная дорога, но левая или правая полоса довольно часто блокировались (каждые 2-4 километра на расстояние 1-2 километра).

Таблица 2.

плотность потока	средняя скорость	число перестроений	процент времени ожидания	число маневров
12-18	28,512	7	57,392	56
15-25	47,014	18	35,708	35
20-35	62,136	38	27,397	58
30-50	72,161	49	15,934	29
40-60	79,858	58	16,739	25
50-70	88,086	62	12,486	17

70-100	90,949	51	8,4	13
100-150	96,86	22	1,758	13
150-200	97,306	29	1,508	5

Как видно из таблицы, в целом сохраняется старая закономерность – средняя скорость движения падает с ростом плотности потока, а число перестроений растет, а затем снижается. На дороге с сужениями, ограничивающей возможности перестроений, этот эффект проявляется еще ярче: начиная с плотности 5—70 и выше, число перестроений стабильно снижается, зато время ожидания перестроения растет, доходя почти до 60% при потоке максимальной плотности (и к снижению средней скорости движения до 28 км/час при желаемых 100 км/час). И последний столбец показывает, что помехи другим машинам также растут.

В то же время при низкой плотности потока скорость близка к максимальной, и значительных помех от сужений дороги не наблюдается. На свободной дороге машины заранее видят препятствие и успевают сменить полосу, не снижая скорости.

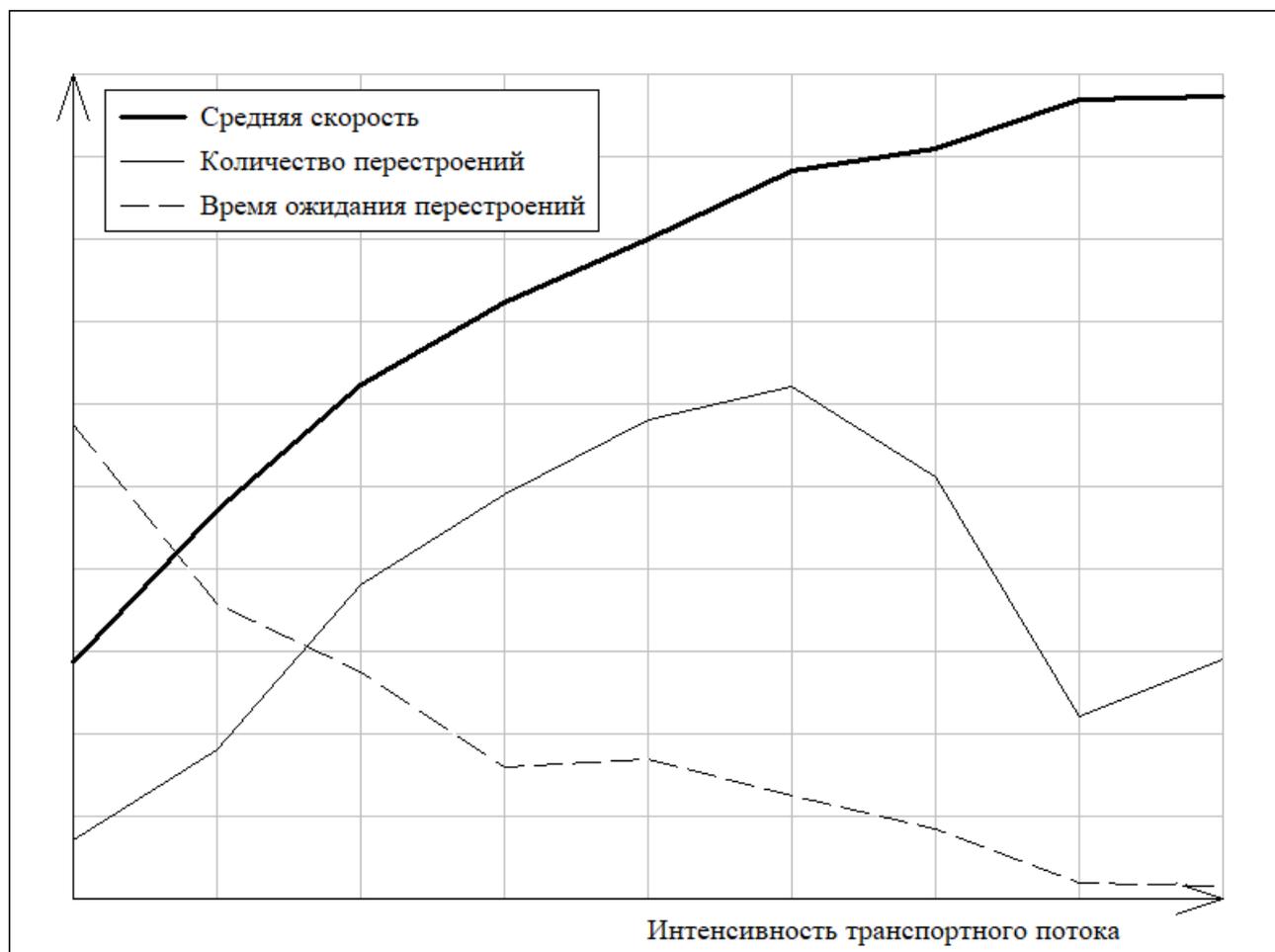


Рис 4. Результаты моделирования для сужения дороги

В следующем эксперименте (Таблица 3) моделировались аварии, после которых часто на одной из полос движения на долгое время остается стоять поврежденный автомобиль. В рамках модели эти ситуации представлялись как короткие (10 м) препятствия, периодически возникающие в случайных полосах.

Таблица 3.

плотность потока	средняя скорость	число перестроений	процент времени ожидания	число маневров
12-18	43,808	19	37,409	66
15-25	56,861	33	41,694	31
20-35	73,697	28	23,925	37
30-50	81,067	44	18,083	35
40-60	87,934	28	10,409	21
50-70	88,783	42	5,141	11
70-100	92,501	8	0,264	6
100-150	94,366	14	0,186	1
150-200	95,431	17	1,409	1

Можно видеть, что результаты получились намного ближе к модели свободной дороги. С ростом плотности потока скорость, конечно, снижается сильнее, чем для свободной дороги, но меньше, чем при сужениях. А вот перестроениям препятствия небольшой длины практически не мешают.

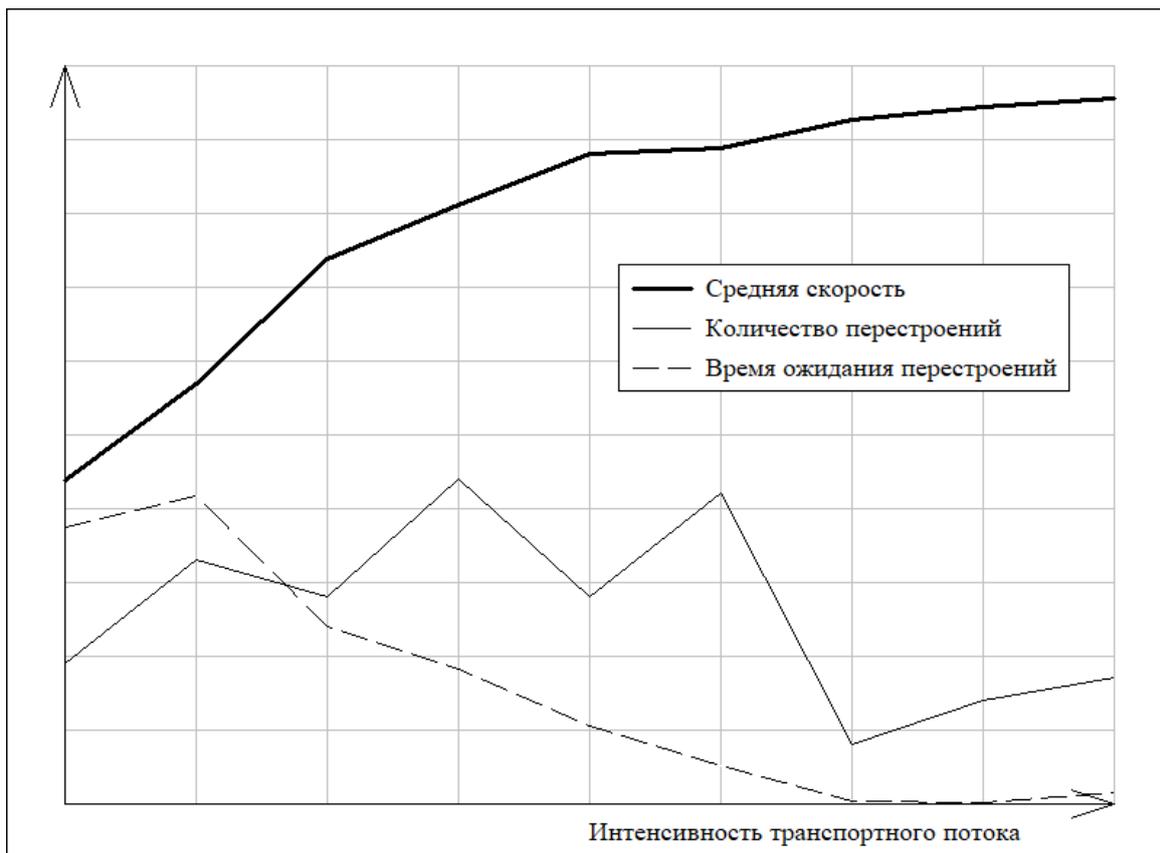


Рис 5. Результаты моделирования для аварий

В четвертом эксперименте (Таблица 4) моделировался ремонт дороги – препятствие длиной 100-500 метров, случайно блокирующее одну из полос дороги.

Таблица 4.

плотность потока	средняя скорость	число перестроений	процент времени ожидания	число маневров
12-18	41,984	18	32,627	39
15-25	53,22	21	47,864	44
20-35	66,848	40	18,85	51
30-50	77,107	27	7,886	37
40-60	74,829	47	14,711	22
50-70	81,281	39	8,197	18
70-100	80,634	34	7,584	16
100-150	84,981	23	2,506	3
150-200	89,856	7	0,325	1

Результат данного эксперимента мало отличается от случая совсем коротких помех в результате аварий.



Рис 6. Результаты моделирования для ремонта дороги

Поэтому в следующем эксперименте (Таблица 5) моделировался ремонт дороги, иногда (с вероятностью 1/5) занимающий сразу две полосы.

Таблица 5.

плотность потока	средняя скорость	число перестроений	процент времени ожидания	число маневров
12-18	36,775	16	31,181	32
15-25	43,841	11	20,9	11
20-35	55,229	17	5,072	14
30-50	53,461	22	26,525	10
40-60	65,67	30	14,998	21
50-70	74,897	37	7,267	17
70-100	86,591	8	5,078	5
100-150	87,318	14	2,794	5
150-200	92,431	15	0,061	1

И вот здесь можно видеть, что помехи движению стали существенно заметнее: средняя скорость получается на 5-10 км/час ниже, чем при «узких» ремонтах.

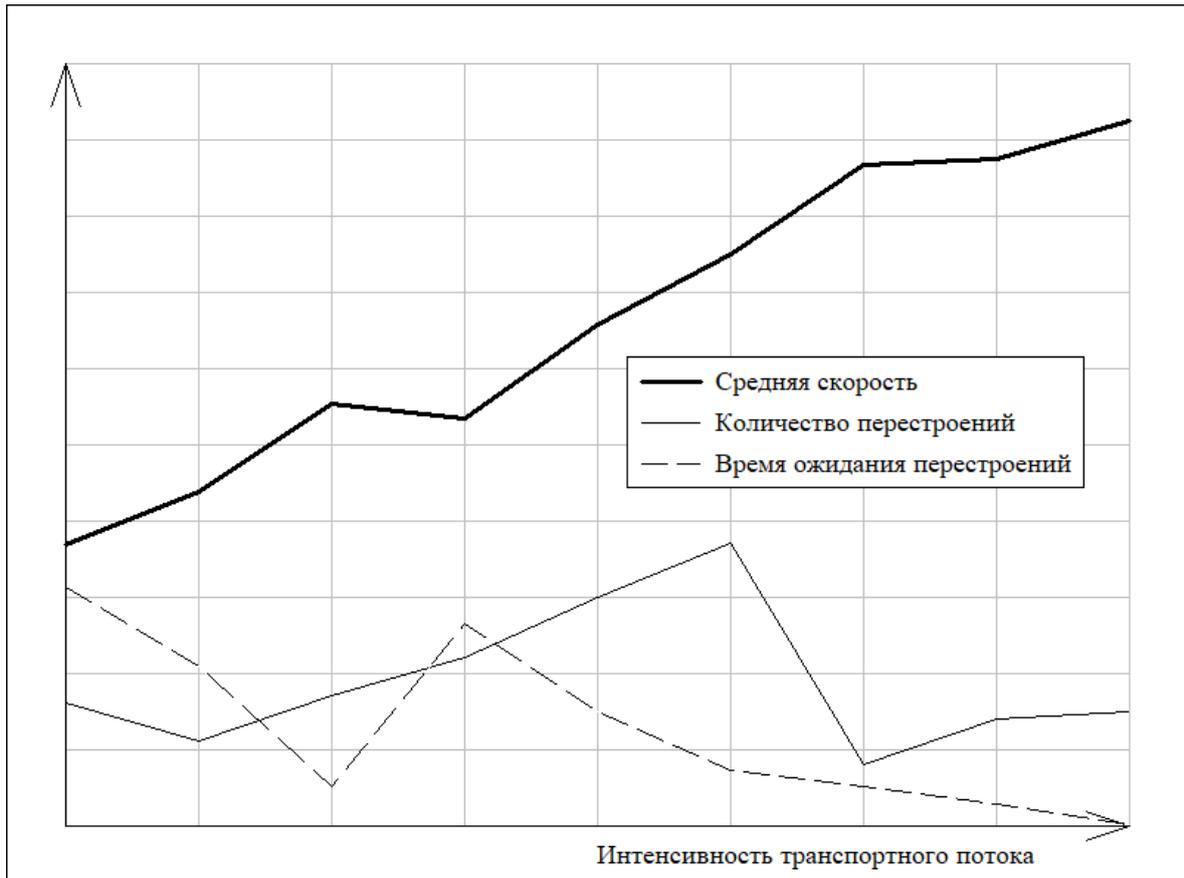


Рис 7. Результаты моделирования для «широкого» ремонта

Препятствия, блокирующие половину дороги (две полосы из четырех), значительно сильнее влияют на пропускную способность при высокой плотности потока.

Переменные параметры автомобилей

В этих экспериментах изучались последствия варьирования некоторых параметров движения; при этом препятствия в этой группе экспериментов отсутствовали.

В первом эксперименте изучалось влияние переменной желаемой скорости: автомобили (кроме «АвтоНивы») периодически увеличивали или уменьшали желаемую скорость, ускоряясь или замедляясь.

Результаты моделирования приведены на рис. 8.

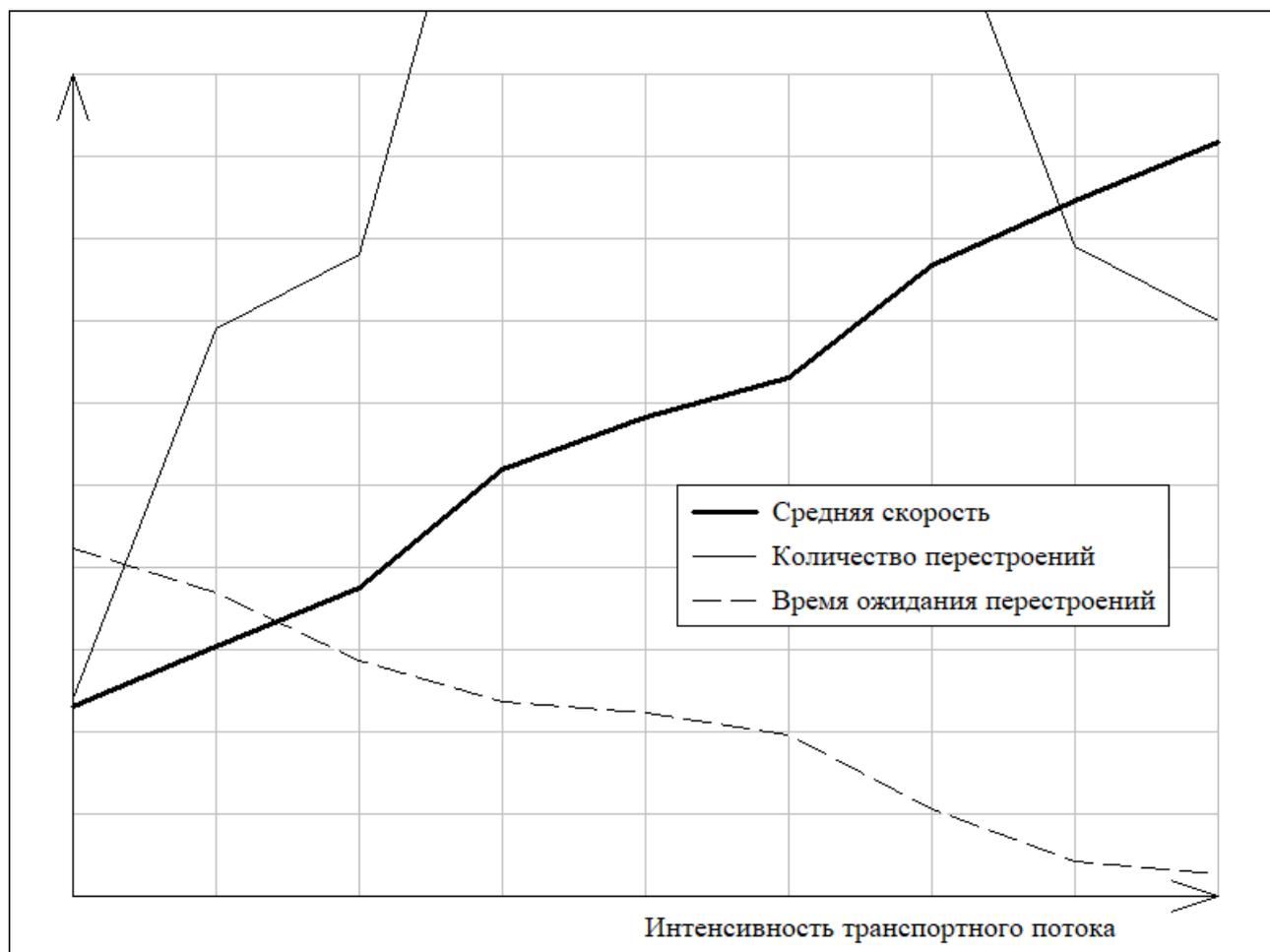


Рис 8. Результаты моделирования для переменной скорости

Также результаты продемонстрированы в Таблице 6.

Таблица 6.

плотность потока	средняя скорость	число перестроений	процент времени ожидания	число маневров
12-18	22,893	24	42,169	96
15-25	30,309	69	36,894	170
20-35	37,477	78	28,65	258
30-50	51,769	141	23,55	254
40-60	58,139	132	22,172	348
50-70	62,952	139	19,514	385
70-100	76,657	125	10,57	355
100-150	84,456	79	4,089	398
150-200	91,598	70	2,605	341

Таким образом, неравномерность движения привела к резкому падению эффективности движения: средняя скорость упала, а число перестроений, ожиданий перестроений и, в особенности, помех другим водителям резко выросло.

Во втором эксперименте (Таблица 7) варьировался промежуток между машинами. При этом он не изменялся динамически во время движения, а был фиксирован для каждого автомобиля, но выбирался случайно при генерации автомобиля. Вместо постоянного промежутка в 10 метров моделируемые водители выбирали промежуток случайно от 10 до 40 метров.

Таблица 7.

плотность потока	средняя скорость	число перестроений	процент времени ожидания	число маневров
12-18	21,939	2	7,011	862
15-25	31,908	1	0,214	2653
20-35	42,9	9	1,825	2577
30-50	51,916	58	10,175	1962
40-60	56,524	11	0,344	2029
50-70	69,584	47	10,031	1197
70-100	76,151	8	0,183	999
100-150	88,813	24	0,802	390
150-200	95,048	54	0,538	188

В результате получилось, что для высокой плотности потока увеличенные промежутки (и, соответственно, снизившаяся пропускная способность) практически парализовали движение: скорость упала до крайне низких значений, и даже перестроения не могли помочь. Зато числа в последнем столбце показывают огромное число взаимных помех.

Для низкой плотности потока увеличенные интервалы привели к тому, что водители и перестраиваться стали на существенно больших расстояниях, что привело к значительному росту числа перестроений. Но на средней скорости при потоке низкой интенсивности это не отразилось.

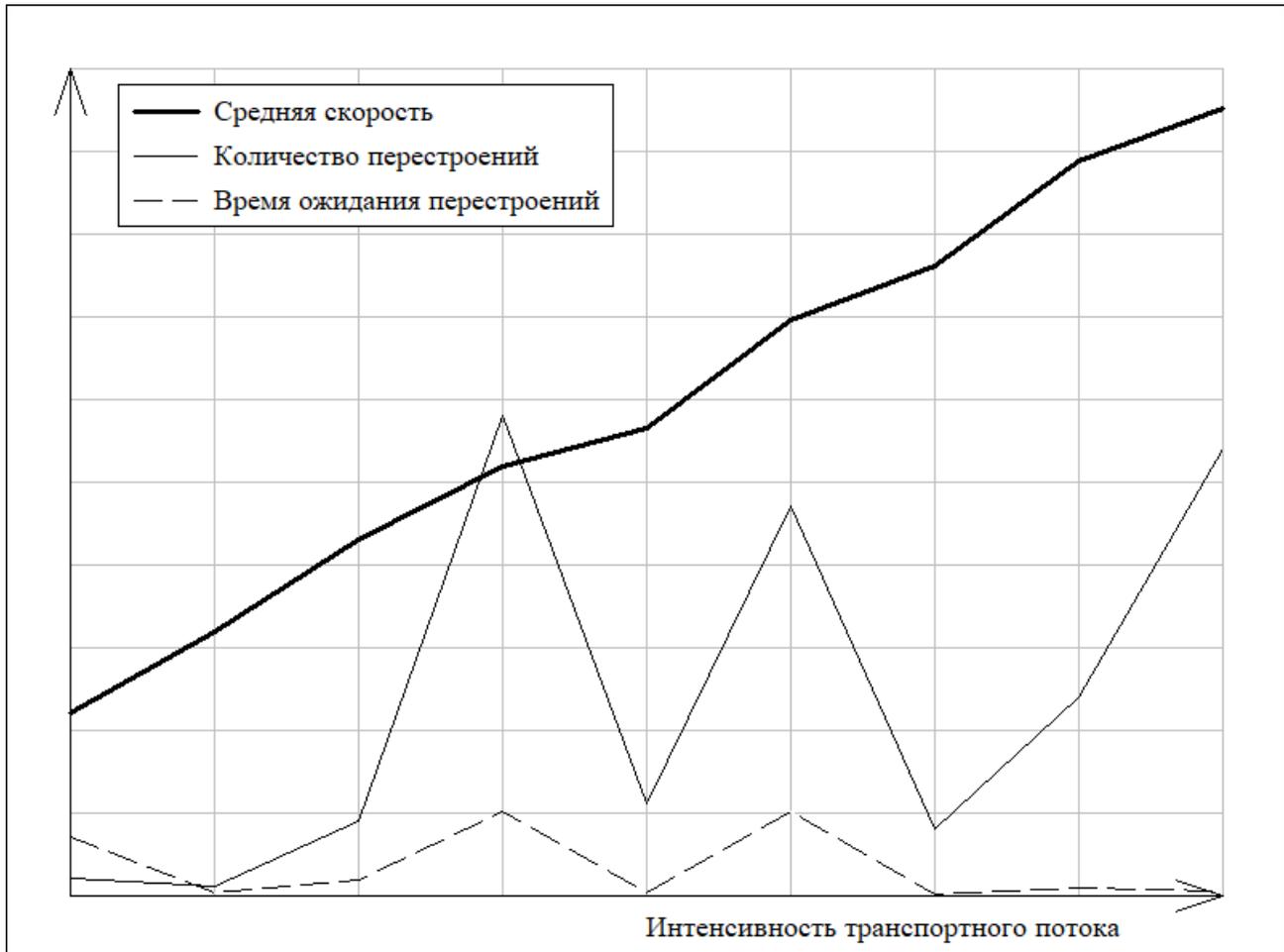


Рис 9. Результаты моделирования для переменного интервала

В целом по результатам этого раздела можно отметить, что и переменная скорость движения, и случайно генерируемые интервалы резко ухудшают эффективность дорожного движения, но, возможно, способствуют большей реалистичности моделирования поведения реальных водителей, в окружении которых предстоит ездить автоматическим автомобилям.

Заключение

В целом результаты моделирования соответствуют ожиданиям. Система вполне достоверно воспроизводит эффекты, которые и следует ожидать от реального транспортного потока в моделируемых условиях. Поэтому предполагается, что она станет эффективным инструментом для дальнейшего развития алгоритмов, применяемых в проекте «АвтоНива», а также основной для новых экспериментов с параметрами транспортного потока.

Библиографический список

1. Gipps P.-G. A model for the structure of lane-changing decisions, *Transp. Res. B, Methodol.*, 1986. vol. 20, no. 5, pp. 403-414.
2. Yang Q. and Koutsopoulos H. N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems, *Transp. Res. C, Emerg. Technol.*, 1996. vol. 4, no. 3, pp. 113-129
3. Kesting, M. Treiber, and D. Helbing General lane-changing model MOBIL for car-following models, *Transp. Res. Rec.*, vol. 1999, no. 1, pp. 86-94.
4. Podoprosvetov A., Kiy K., Pavlovsky V. and D. Anokhin, Development of Complex Control System for the Autonomous Vehicle Niva, 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP), Samara, Russia, 2019, pp. 311-315, doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976523.
5. Kiy K.I., Anokhin D.A. Podoprosvetov A.V. A Software System for Processing Images with Parallel Computing. *Program Comput Soft* 46, 406–417 (2020). <https://doi.org/10.1134/S0361768820060043>
6. Gao J., Murphey Y. L. and Zhu H. Multivariate time series prediction of lane changing behavior using deep neural network, *Appl. Intell.*, vol. 48, no. 10, pp. 3523-3537, Oct. 2018.
7. Xu G., Liu L., Ou Y. and Song Z. Dynamic modeling of Driver control strategy of lane-change behavior and trajectory planning for collision prediction, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 1138-1155, Sep. 2012.
8. Kiy K.I. A new method of global image analysis and its application in understanding road scenes // *Pattern Recognit. Image Anal.*, 2018. N 3(28). - с. 483–494.
9. Kiy K.I. An image understanding system based on the geometrized histograms method: finding the sky in road scenes // *CEUR Workshop Proceedings*. V. 2210. P. 291-299. <http://ceur-ws.org/Vol-2210/paper38.pdf/>.
10. Павловский В.Е., Павловский В.В Математические модели стайных аспектов в описании транспортных ситуаций // *Известия Волгоградского государственного технического университета*, № 3(226), 2019 С. 37-41.
11. Kiy, K.I., Anokhin, D.A., Podoprosvetov, A.V. A Software System for Processing Images with Parallel Computing // *Programming and Computer Software*, 2020, 46(6), стр. 406–417