

На правах рукописи



Шинкарев Александр Андреевич

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ  
ТРАНСПОРТА В КРУПНЫХ ГОРОДАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ДЛЯ УПРЕЖДАЮЩЕГО РАЗВИТИЯ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.13.10 – Управление в социальных и экономических  
системах

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2016

Диссертационная работа выполнена на кафедре информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
**Логиновский Олег Витальевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ,  
заведующий лабораторией активных систем  
ФГБУН «Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова» РАН  
**Бурков Владимир Николаевич**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры вычислительной математики и  
кибернетики ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»  
**Валеева Аида Фаритовна**

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Челябинский государственный университет»

Защита состоится 26 декабря 2016 года, в 13:00, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, зал заседания диссертационного совета № 1 (ауд. 1001 главного корпуса).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».


Сведения о защите и автореферат диссертации размещены на официальном сайте ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229803/shinkaryov-aleksandr-andreevich>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, ученый совет, тел. (351) 267-91-23, факс (351) 265-62-05.

Автореферат разослан «\_\_» октября 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

 В.Н. Любицын

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе изложены результаты исследования повышения эффективности управления движением транспортных потоков в средних и крупных городах за счет средств математического моделирования на основе теории клеточных автоматов (ТКА). Научные разработки диссертации базируются на научных трудах таких известных ученых и специалистов, как Д.Е. Вольф, К.Ф. Даганзо, Д.Ю. Долгушин, Б.С. Кернер, С.Л. Кленов, М.Д. Лайтхилл, О.В. Логиновский, К. Нагель, Г.Ф. Ньюэлл, В.В. Семенов, Д.Б. Уизем, М. Фаулер, М. Шрекенберг.

**Актуальность темы.** Увеличение количества транспортных средств, несмотря на спад рынка продажи автомобилей на фоне нового глобального экономического кризиса, ведет к постепенному истощению ресурсов улично-дорожных сетей (УДС) городов. В связи с этим образование заторов на дорогах становится серьезной проблемой, по причине которой снижается качество транспортных услуг, падает производительность труда, а также растет уровень загрязнения окружающей среды.

Для решения задачи повышения пропускной способности УДС города можно выделить два основных подхода: внесение инфраструктурных изменений и регулирование дорожного движения. Первый вариант предполагает большие капиталовложения и, как результат, не всегда применим, в частности, для средних и крупных городов, чей бюджет ограничен, к тому же, время кардинальных решений еще не пришло. В ситуации, когда внесение инфраструктурных изменений в УДС необходимо, встает задача адекватного развития сложившейся дорожно-транспортной инфраструктуры города. Когда внесение инфраструктурных изменений преждевременно, т.е. еще не получен максимальный эффект от средств регулирования дорожного движения в сложившейся УДС, то управление движением транспорта можно осуществлять как с помощью автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД), так и используя математические модели транспортных потоков. Внедрение первого решения, опять же, требует значительных материальных затрат и подходит для крупных и крупнейших городов, где необходимо сложное комплексное моделирование и управление. Для решения же задач средних и крупных городов, не обладающих достаточным бюджетом, а также средствами автоматического сбора информации о дорожных условиях, должны применяться достаточно гибкие математические модели транспортных потоков, а также разработанное на их основе программное обеспечение. Однако какое бы решение не использовалось для увеличения пропускной способности УДС городов, чтобы предотвратить ошибочные мероприятия по изменению дорожно-транспортной инфраструктуры, задача развития УДС города всегда должна быть основополагающей.

Указанные соображения определили цель и задачи диссертационного исследования.

**Цель и задачи диссертационной работы.** Целью работы является разработка методов и моделей управления движением транспортных потоков в больших и крупных городах, позволяющих связать вопросы управления движением транспорта с обоснованным развитием УДС городов.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Осуществить анализ различных подходов, методов и моделей, используемых для регулирования дорожного движения и развития УДС городов, а также оценить их адекватность и применимость в решении задач повышения пропускной способности и скорости сообщения УДС средних и крупных городов.
2. Разработать новые математические модели транспортного потока на основе теории клеточных автоматов, способные адекватно отображать основные характеристики транспортного потока на микро- и макроуровнях.

3. Разработать унифицированный язык представления моделей рассматриваемой группы на примерах фундаментальных и разработанных в ходе диссертационного исследования моделей.

4. Сформировать комплекс методических положений для регулирования работы УДС городов на основе результатов моделирования, полученных с помощью разработанных в ходе диссертационного исследования моделей и программного обеспечения, а также рекомендаций по их практическому использованию.

**Объектом исследования** являются УДС крупных, больших и средних городов и автотранспортный поток.

**Предметом исследования** являются методы, модели и системы управления дорожным движением и развития УДС городов.

**Методы исследования.** Теоретической и методологической основой диссертационного исследования являются современные методы теории управления, теории транспортных потоков, исследования операций, рефакторинг и др.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Выполнении анализа различных методов, моделей и систем управления движением транспорта в городах (показана целесообразность решения вопросов регулирования движения транспорта совместно с развитием УДС городов).

2. В дополнении широко используемой на практике группы математических моделей транспортного потока на основе ТКА за счет создания математических моделей смены полосы движения, классификации мотиваций смены полосы движения, передвижения, унифицированного представления моделей этой группы и метода их рефакторинга.

3. Разработке нового подхода по использованию средств имитационного моделирования при решении задачи эффективного развития УДС городов.

4. Формировании методики оптимизации работы части УДС для средних и крупных городов, базирующихся на разработанных в диссертации методах, математических моделях и программном обеспечении.

**Практическое значение** результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Дополнены математические модели транспортного потока на основе ТКА, позволяющие строить на своей основе достаточно гибкие инструменты, которые дают возможность повышения эффективности управления движением транспорта с учетом мероприятий по развитию УДС.

2. Научные положения и результаты диссертационного исследования обеспечивают взаимосвязь вопросов регулирования движения транспорта на УДС с ее своевременным и проактивным развитием.

3. Разработанные положения по созданию и использованию общего языка представления моделей рассматриваемой группы позволяют значительно снизить порог вхождения для специалистов и разработчиков в области моделирования транспортных потоков и управления движением.

Акты рассмотрения и внедрения научных положений и разработок диссертации приведены в *приложении 3*.

**Апробация работы.** Основные научные положения и результаты диссертационной работы прошли апробацию на следующих научно-практических конференциях, форумах и семинарах:

1. четвертом всероссийском научно-практическом семинаре «Управление в социальных и экономических системах» (Челябинск, 2014)

2. XXXVII научной конференции International Research Journal (Екатеринбург, 2015);

3. IX Международной научно-практической конференции «Научное творчество XXI века» (Красноярск, 2015);

4. The 4<sup>th</sup> International Conference on Analysis of Images, Social Networks, and Texts (Екатеринбург, 2015)

5. форуме «Информационное общество-2015: вызовы и задачи» (Челябинск, 2015);

6. 1<sup>th</sup> International Workshop on Technologies of Digital Signal Processing and Storing (Уфа, 2015);

7. восьмой научно-практической конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ (Челябинск, 2016);

8. международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, 2016);

9. LIV научной конференции International Research Journal (Екатеринбург, 2016).

**Публикации.** По теме диссертационного исследования опубликовано 12 научных трудов, из них 6 в реферируемых печатных изданиях, утвержденных ВАК, и 6 прочих публикаций в научных журналах и сборниках трудов.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения; трёх глав; заключения, содержащего основные выводы и результаты исследования; списка литературы и приложений, содержащих пример сведений о схеме организации движения на одном из перекрёстков г. Челябинска, листинг фрагмента программной реализации моделей, а также сведения о внедрении основных научных положений и разработок автора в практику. Общий объем работы составляет 150 страниц, в том числе 15 рисунков. Список литературы содержит 114 наименований.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты анализа подходов, математических моделей и методов повышения эффективности работы УДС городов.

2. Математическая модель мотиваций смены полосы движения для моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов.

3. Математическая модель передвижения для однонаправленной однополосной дороги с шагом адаптивного торможения на основе теории клеточных автоматов.

4. Четырехступенчатое унифицированное представление математических моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов, а также метод их рефакторинга для получения этого представления.

5. Методические положения по созданию систем управления движением транспорта, а также развитию УДС городов на основе разработанных в диссертации методов и моделей и результаты их практического использования.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Анализ подходов к управлению движением транспорта в городах и систем управления городскими транспортными потоками, представленный в *главе 1* диссертации, показывает, что в условиях постоянного роста нагрузки на дорожно-транспортную инфраструктуру городов перед властями остро встают задачи повышения пропускной способности УДС и ее эффективного развития. В условиях же глобального экономического кризиса и сокращения бюджета регионов приходится переходить к использованию гибких, не слишком затратных, но позволяющих работать на перспективу систем на базе новых математических моделей и методов.

Проблема целенаправленного развития и рационального функционирования транспортных систем городов должна рассматриваться своевременно, на современном уровне, т.е., прежде всего, комплексно для всей транспортной системы, а не как конгломерат разнообразных мероприятий по улучшению работы отдельных элементов УДС города.

В подобной постановке задачи сейчас существует тенденция к априорному использованию АСУДД, хотя во многих случаях это излишне и не адекватно сложившейся дорожно-транспортной ситуации города. Таким образом, приходится переходить от варианта с использованием АСУДД к, возможно, более рациональному имитационному моделированию в системах, основанных на прескриптивном принципе системного подхода, позволяющих управлять не только транспортным потоком, но и развитием элементов УДС (совершенствованием в конечном итоге ее структуры, исходя из оптимального функционирования системы).

Соответственно, на основе анализа материалов, приведенных в *главе 1*, приходим к выводу, что для средних и крупных городов с ограниченным бюджетом и уже существующими проблемами в организации и управлении движения транспорта подходит применение максимально простых в эксплуатации и обучении персонала, а также не требующих долгосрочного внедрения программных продуктов, которые, однако, должны позволять осуществлять достаточно эффективное планирование развития УДС города. В частности — давать возможность сравнивать эффективность градостроительных решений, принимаемых на основе экспертных оценок и направленных на изменение дорожно-транспортной инфраструктуры города. Сравнение таких решений необходимо, так как, теоретически, может существовать множество вариантов достижения цели, и, естественно, возникает проблема альтернативного выбора лучшего из них. Сравнение вариантов предполагает наличие обоснованного критерия эффективности, которым в данном случае должны стать суммарные потери времени транспорта на перекрестках города.

Решение указанной задачи должно базироваться на создании новой математической модели транспортных потоков, которая станет фундаментом построения систем, направленных в первую очередь на развитие УДС городов.

***Постановка и актуальная математическая модель транспортного потока на основе теории клеточных автоматов как основа систем управления движением транспорта и развития УДС города***

В *главе 2* представлена постановка и математическая модель транспортного потока на основе ТКА, а также приведены результаты исследований по унификации представления и правил функционирования моделей рассматриваемого семейства.

Несмотря на то, что сейчас на первый план выходит использование гибких и недорогих инструментов, современная практика управления дорожным движением, в большинстве своем, акцентирует внимание на регулировании дорожного движения, в то время как вопрос развития УДС отодвигается на второй план, либо и вовсе игнорируется. Все усилия сосредотачиваются преимущественно на оперативном управлении и получении локальных краткосрочных улучшений в дорожной ситуации городов, что в целом не плохо, однако все же не является стратегической задачей развития УДС в частности и транспортной системы городов в целом.

Одной из крайностей, вытекающей из складывающегося подхода оперативного регулирования сложившейся УДС городов, является использование АСУДД, как средства, необходимого всегда и везде при возникновении проблем недостаточной пропускной способности транспортной сети. Разумеется, подобные системы необходимы, и переход к ним в конечном итоге должен быть осуществлен для всех городов, но целесообразность их использования должна естественным образом вытекать из достижения предельных результатов, доступных более простым и гибким системам и инструментам. Также стоит отметить, что использование АСУДД зачастую не предполагает развития УДС, а лишь регулирует работу ее уже сложившейся конфигурации.

Таким образом, в ситуации, когда для города не внедрена АСУДД, нет серьезного оснащения УДС системами сбора и анализа информации о характеристиках транспортных потоков, необходимо использовать средства моделирования работы топологий УДС города, оптимальных по соотношению стоимости внедрения к качеству получаемых результатов. Также подобного рода инструменты являются естественным базисом для того, чтобы осуществлять в определенной степени достаточно эффективное развитие УДС на среднесрочную и долгосрочную перспективу. Используя средства моделирования топологий для различных вариантов их конфигурации, появляется возможность сравнивать между собой эффективность применения тех или иных проектных решений к сложившейся УДС города с целью повышения эффективности ее работы. Важно отметить, что таким образом можно сравнивать как решения, требующие больших материальных затрат на свою реализацию и затрагивающие дорожно-транспортную инфраструктуру, так и решения, которые лишь меняют конфигурацию средств регулирования дорожного движения, без каких бы то ни было инфраструктурных изменений. На рис. 1 представлена предложенная схема систем управления УДС. Целью такой системы является повышение эффективности работы УДС. Результатом же её работы является оперативный выбор лучшего сочетания схем организации движения на перекрестках и проект развития УДС.

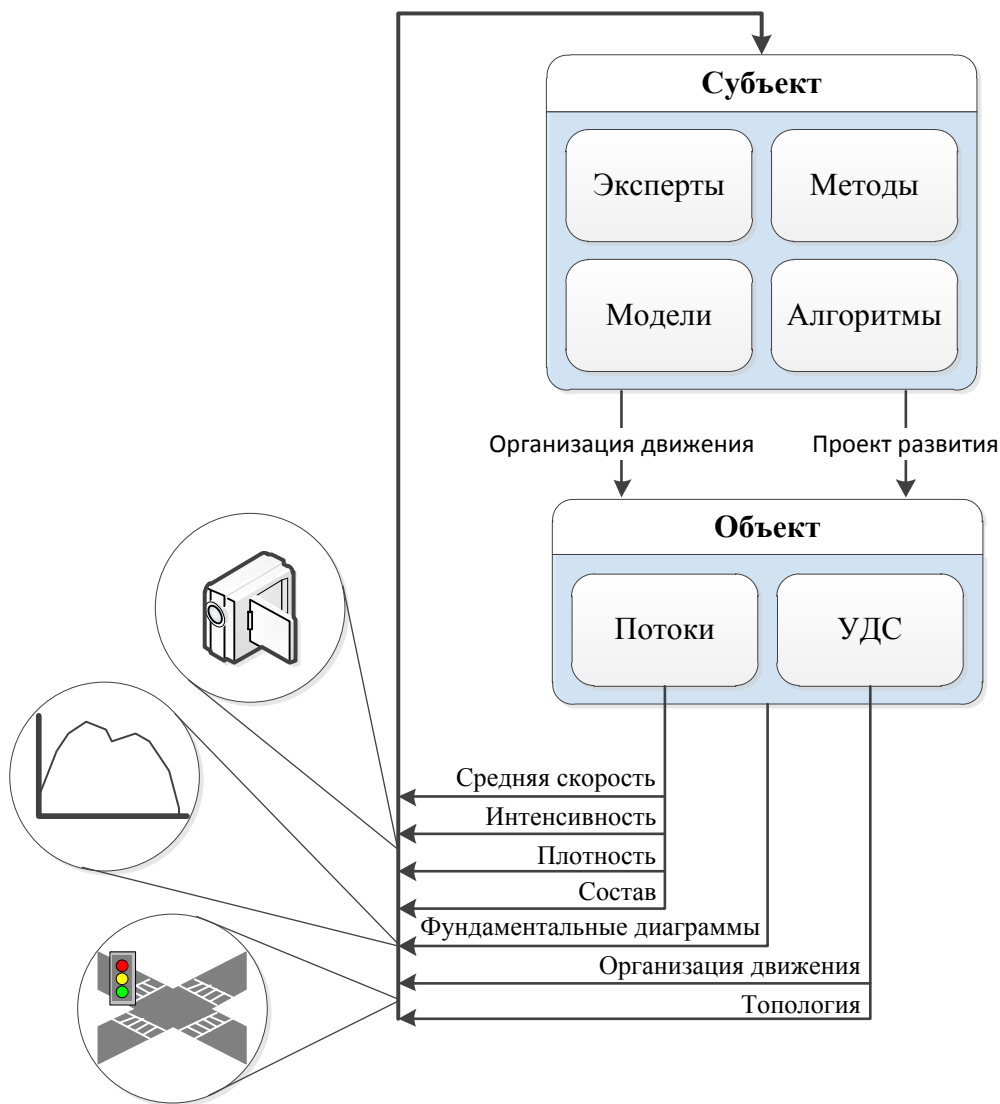


Рис. 1. Система управления УДС

Конечно же, использование недорогих и гибких инструментов не всегда может соответствовать неуклонно возрастающим нагрузкам на УДС больших городов, и в какой-то момент необходимо переходить к внедрению АСУДД. Однако даже при обоснованном и подготовленном внедрении АСУДД для регулирования работы УДС города нельзя забывать о развитии указанной сети, так как какие бы системы не использовались для управления дорожным движением и регулирования работы транспортной системы, в целом всегда существует предельная плотность транспортного потока, при которой никакие системы не смогут предотвратить и успешно бороться с заторной ситуацией.

*Актуальность использования семейства моделей транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов для средних и крупных городов*

На сегодняшний день сильное развитие получили не только суперкомпьютеры, но и обычные рабочие станции большинства пользователей персональных компьютеров, не говоря уже о таких устройствах, как планшеты и даже смартфоны. Именно этот фактор во многом задает направляющий вектор к тому, что сегодня для решения многих ресурсоемких задач все меньше внимания уделяется оптимальности по времени и по памяти, в отличие от периода десяти-двадцатилетней давности. С одной стороны, это плохо, ведь теряется внимание к деталям, падает качество предоставляемых решений, а с другой — это естественный ход развития.

Применительно к решению задач моделирования транспортного потока, согласно анализу, изложенному в *главе 1*, есть модели, рассматривающие транспортный поток как целое и моделирующие его поведение условно, с помощью дифференциальных уравнений, а есть вторая разновидность моделей, которые используют значительные вычислительные мощности, т.к. ведут свою работу на уровне групп автомобилей или же моделируют поведение каждого ТС в отдельности.

Таким образом, следует, что во многих случаях в значительной степени можно пренебречь большой ресурсоемкостью решений, основанных на микромоделировании, в угоду простоте и понятности правил функционирования моделей этого семейства.

Соответственно, в качестве базы недорогих и гибких инструментов должна выступать модель транспортного потока, а добавив сюда изложенные соображения по поводу требований к ее общим характеристикам, необходимо использовать модель из семейства микромоделей с понятными и легко модифицируемыми правилами функционирования.

В качестве группы моделей, подходящих под это описание, выступает группа математических моделей транспортного потока на основе ТКА. Правила их функционирования отличаются от своих собратьев естественностью, наличием относительно небольшого количества искусственных предположений, что, в свою очередь, ведет к простоте сопровождения подобных моделей даже не специалистами в области моделирования транспорта. Также математические модели на основе ТКА, предназначенные для любых сфер, в том числе и для моделирования транспорта, изначально обладают естественными возможностями для того, чтобы вести обсчет с использованием вычислительных кластеров, то есть позволяют работать с собой в многопоточном режиме.

Помимо рассматриваемых возможностей для параллельной обработки перехода клеток модели в новое состояние, существуют интересные исследования, направленные на еще более внушительное ускорение получения результатов моделирования, что имеет ключевое значение для систем, работающих в режиме, приближенном к режиму реального времени. Например, есть предложение использовать модель транспортного потока на основе ТКА в качестве первого уровня, целью которого является получение



параметров топологии для модели второго уровня, построенной на основе теории сетей массового обслуживания.

Ставя перед собой задачу использования максимально простых в поддержке и во внедрении моделей, применительно к моделям транспортного потока на основе ТКА, установлено, что отсутствует общий язык, который позволил бы объединить и согласовать во многом похожие, использующие общие концепции и конвенции модели. Наличие общего языка позволит снизить порог вхождения в данную область научной деятельности для новичков и избавиться от ощущения излишней сложности представления по сути своей простых и естественных правил, понятных каждому.

### ***Унификация представления моделей транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов***

На основе рассмотренных в диссертации моделей и подходов, использованных для того, чтобы привести их к универсальному представлению, предлагается следующая последовательность действий для данного вида моделей:

1. Выявление шагов, которые одновременно меняют скорость и валидируют полученное значение. Признаком, определяющим шаги подобного рода, является, например, использование функций  $\min$ ,  $\max$ .

2. Разбиение подобного рода шагов на два: изменения скорости и валидации полученного значения

Принимая во внимание тот факт, что каждая конкретная вероятностная переменная после первого расчета остается постоянной в течение такта работы автомата, получаем одинаковую последовательность действий, как для стохастических, так и для не стохастических моделей.

Проанализировав модели, рассмотренные в диссертации, удалось выявить следующие ключевые особенности:

1. Все модели имеют один или более шагов изменения скорости.

2. Ограничительные функции, используемые совместно с изменением скорости, можно выделить в шаги валидации.

3. Представление всех моделей поддается унификации, без изменения их поведения, как и предполагает подход рефакторинга.

4. Практически во всех моделях можно выделить общий шаг валидации столкновения с едущим впереди ТС.

5. В том или ином виде, практически в любой модели присутствует валидация превышения скорости и валидация снижения скорости до отрицательного значения.

6. Последний шаг всех моделей — шаг движения.

Результатом декомпозиции и анализа становится разбиение шагов представления математических моделей транспортных потоков на основе ТКА на три типа: изменение скорости, валидация, движение.

Важно отметить, что в общем случае в результате декомпозиции и приведения модели к единообразному представлению увеличивается количество шагов.

Еще одной особенностью применения к моделям транспортных потоков на основе ТКА описанного рефакторинга является потеря компактности записи законов их функционирования, однако в то же время появляется универсальный язык записи подобного рода моделей и улучшается восприятие особенностей той или иной модели, в том числе за счет выделения общих шагов.

Безусловно, нельзя утверждать, что рассматриваемый подход рефакторинга представления математических моделей транспортного потока на основе ТКА применим и оправдан во всех случаях, однако он является хорошей отправной точкой для дальнейших исследований по приведению моделей рассматриваемой группы к одному общему виду и разделяемой всеми терминологии.

*Четырехступенчатое унифицированное представление моделей транспортных потоков на основе теории клеточных автоматов*

На примере предложенного в диссертации стоп-сигнала, который, по сути, оповещает других участников движения о том, что происходит снижение скорости, можно вывести новый общий тип шагов для моделей автотранспортных потоков на основе ТКА. Новый тип шагов объединяет шаги оповещения и сигнализации, которые могут быть использованы для моделирования обмена информацией ТС о своих намерениях или об изменении состояния текущего ТС с другими участниками движения. Помимо шага оповещения о включении стоп-сигнала, направлением будущих исследований является ввод в модели оповещения о желании сменить полосу движения и ожидания ответной реакции от едущих впереди ТС.

В результате введения нового типа шагов, трехступенчатое унифицированное представление математических моделей транспортных потоков на основе ТКА преобразуется в четырехступенчатое. Результирующий же набор типов шагов будет выглядеть следующим образом: изменение скорости, валидация, оповещение, движение.

Отталкиваясь от рассмотренных случаев, в результате проведенных декомпозиции и анализа формулируется четырехступенчатое унифицированное представление математических моделей транспортных потоков на основе ТКА. Ступенями данного представления являются четыре рассмотренных выше типа шагов.



Рис. 2. Четырёхступенчатое унифицированное последовательное представление и четырёхступенчатое унифицированное представление с перемешанными шагами

По сути своей, данное представление накладывает жесткое ограничение на то, что указанные четыре ступени должны идти в строго определенном порядке. То есть сначала идут все шаги, изменяющие значение скорости, затем должна идти группа шагов валидации полученных значений на предмет того, что состояние модели не является противоречивым, после того, как состояние модели было по необходимости исправлено, необходимо выполнить все заданные действия по оповещению других участников движения об изменениях в состоянии текущего ТС, и последней группой всегда будет идти вырожденная ступень из одного шага движения. Пример такой организации модели представлен на рис. 2 слева.

В общем случае, группы валидации и оповещения могут не содержать шагов, что справедливо, в частности, для простых фундаментальных моделей.

Однако накладывая жесткое ограничение на то, что шаги различных типов не могут идти вперемешку, мы лишаем самих себя необходимой гибкости. Ослабив это правило, в результате мы получаем ситуацию, отраженную на рис. 2 справа. На этом рисунке представлен довольно общий случай, когда вслед за шагом изменения скорости может сразу же идти шаг валидации полученного значения. Это возможно, когда шаги стохастические, и инварианты поведения модели заставляют осуществлять валидацию непосредственно после интересующего шага изменения скорости, а не после всех шагов. Соответственно, в общем случае шаги могут идти в произвольном порядке, однако касательно шагов оповещения — все же логично располагать их после всех шагов изменения скорости и валидации, потому что они должны работать с результирующей скоростью, а не с ее промежуточным значением.

#### ***Мотивации смены полосы движения***

Во время движения водители сталкиваются с большим разнообразием ситуаций, которые побуждают или же принуждают их к смене полосы движения. Такие факторы, как качество дорожного покрытия на соседних полосах движения, объединённые с опытом водителей проезда по дорогам, зачастую являются самой распространённой причиной не самого логичного перестроения, например, с точки зрения правил дорожного движения. Объезд ям на дорогах сейчас превалирует среди других причин смены полосы движения, это продиктовано довольно плачевным состоянием дорожного покрытия во многих регионах России.

Помимо вопросов качества дорожного покрытия на принятие решения о необходимости перестроиться влияют разрешенные направления движения по полосам, а также направление движения водителей. Например, если текущая полоса не позволяет осуществить на ближайшем перекрестке поворот, то необходимо перестроиться в полосу движения, которая позволяет осуществить желаемый маневр.

Кроме необходимости осуществить поворот, также существенен случай, когда на перекрестке надо проехать прямо. Водители имеют склонность выбирать полосы с движением только прямо или прямо и направо в случае, если им не нужно осуществлять поворот на ближайшем перекрестке. Это объясняется тем, что полосы, где разрешен поворот налево и движение прямо, медленнее пропускают поток на перекрестке за счет необходимости пропустить встречный поток при повороте налево.

Помимо качества дорожного покрытия и возможностей направления движения по полосам, важным фактором также является наличие медленного автомобиля впереди и плотность движения по полосам. Водители предпочитают двигаться с максимально возможной скоростью, поэтому полоса с меньшей плотностью движения или же более высокой средней скоростью будут более предпочтительны.

Имея набор общих мотиваций смены полосы движения для среднестатистического водителя, формализуем эти правила для последующего моделирования. Важно также учитывать стохастическую природу принятия решения о

перестроении. Например, водитель может просто забыть осуществить запланированный поворот налево на перекрестке, и тогда ему придётся осуществлять этот манёвр уже на следующем пересечении и корректировать маршрут соответствующим образом.

Положим, что имеется двумерная матрица  $L$ , которая состоит из ячеек фиксированной длины. Параметры  $M$  и  $N$  определяют высоту (количество полос движения) и ширину (длину дороги) матрицы соответственно. В любой момент времени каждая ячейка может быть либо свободной, либо занятой транспортным средством (ТС). Длина каждого ТС может варьироваться и быть больше или равной одной ячейке.

Время  $t$  дискретно и имеет шаг, равный 1 секунде, что приблизительно равно среднему времени реакции водителя. Позиция  $i$ -го ТС определяется переменными  $m_i$  и  $n_i$ , где  $m_i$  определяет полосу движения, а  $n_i$  определяет порядковый номер ячейки в этой полосе.

Скорость  $v_i$  измеряется в ячейках, пройденных за временной шаг, который, как было указано ранее, равен 1 секунде.

Здесь и далее используются следующие условные обозначения:

- $t$  — текущий такт работы автомата;
- $t - 1$  — предыдущий такт работы автомата;
- $v_i$  — функция, возвращающая скорость  $i$ -го ТС;
- $g_i$  — функция, возвращающая расстояние от  $i$ -го ТС до едущего впереди.

Предложим новый набор мотиваций смены полосы движения:

1. В случае если дистанция до впереди едущего ТС меньше, чем скорость текущего ТС, и разница скоростей больше, чем дистанция принятия решения.

$$g_i(t - 1) < v_i(t - 1) \text{ and } v_i(t - 1) - v_{i+1}(t - 1) > v_{dif} \quad (1)$$

$v_{i+1}(t - 1)$  — возвращает скорость впереди едущего ТС на той же полосе движения.

$v_{dif}$  — дистанция принятия решения.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменные LTR1 и RTR1 устанавливаются.

В рассматриваемом контексте LTR означает — Left Turn Required (поворот налево необходим), а RTR означает — Right Turn Required (поворот направо необходим), соответственно.

2. В случае если качество дорожного покрытия на соседней полосе лучше, чем на текущей.

Следующая формула реализует проверку для левой ближайшей полосы:

$$q_s(m_i(t - 1) - 1, n_i(t - 1), d_q) > q_s(m_i(t - 1), n_i(t - 1), d_q) \quad (2)$$

$m_i(t - 1)$  — возвращает индекс полосы движения для текущего ТС.

$n_i(t - 1)$  — возвращает индекс ячейки полосы движения для текущего ТС.

$d_q$  — дистанция контроля качества дорожного покрытия.

$q_s$  — возвращает показатель качества дорожного покрытия с позиции текущего ТС на дистанции  $d_q$ .

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, переменная LTR2 устанавливается.

Следующая формула реализует проверку для правой ближайшей полосы:

$$\begin{aligned} q_s(m_i(t-1) + 1, n_i(t-1), d_q) \\ > q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) \end{aligned} \quad (3)$$

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR2 устанавливается.

3. В случае если существует необходимость повернуть на ближайшем пересечении проезжих частей, но текущая полоса движения не позволяет осуществить желаемый поворот, и дистанция до перекрестка меньше, чем дистанция принятия решения.

Следующая формула реализует проверку для необходимости осуществить поворот налево:

$$TL \text{ and } c_i(t-1) < d_c \text{ and } a_{lt}(m_i(t-1), n_i(t-1)) = F \quad (4)$$

$TL$  — необходимость осуществить поворот налево.

$c_i(t-1)$  — возвращает дистанцию до ближайшего перекрестка.

$d_c$  — дистанция принятия решения перед перекрестком.

$a_{lt}$  — проверяет, что поворот налево разрешен.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная LTR3 устанавливается.

Следующая формула реализует проверку для необходимости осуществить поворот направо:

$$TR \text{ and } c_i(t-1) < d_c \text{ and } a_{rt}(m_i(t-1), n_i(t-1)) = F \quad (5)$$

$TR$  — необходимость осуществить поворот направо.

$a_{rt}$  — проверяет, что поворот направо разрешен.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR3 устанавливается.

4. В случае если существует необходимость повернуть на ближайшем пересечении проезжих частей, на соседней полосе движения плотность ТС меньше, соседняя полоса позволяет осуществить желаемый поворот, и дистанция до ближайшего перекрестка меньше, чем дистанция принятия решения.

Следующая формула реализует проверку для необходимости осуществить поворот налево:

$$\begin{aligned} TL \text{ and } c_i(t-1) < d_c \text{ and} \\ a_{lt}(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1)) \text{ and} \\ p(m_i(t-1), n_i(t-1)) - p(m_i(t-1) - 1, n_i(t-1)) \\ > p\_dif \end{aligned} \quad (6)$$

$p$  — возвращает плотность ТС полосы относительно позиции текущего ТС.

$p\_dif$  — нижняя граница разницы плотностей.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная LTR4 устанавливается.

Следующая формула реализует проверку для необходимости осуществить поворот направо:

$$\begin{aligned} & TR \text{ and } c_i(t-1) < d_c \text{ and} \\ & a_{rt}(m_i(t-1)+1, n_i(t-1)) \text{ and} \\ & p(m_i(t-1), n_i(t-1)) - p(m_i(t-1)+1, n_i(t-1)) \\ & > p\_dif \end{aligned} \quad (7)$$

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR4 устанавливается.

5. В случае если необходимость повернуть куда-либо отсутствует, текущая полоса движения позволяет осуществлять поворот налево, и дистанция до ближайшего перекрестка меньше, чем дистанция принятия решения, то лучше сменить текущую полосу движения на ближайшую правую.

$$\begin{aligned} & TL = F \text{ and } TR = F \text{ and} \\ & a_{lt}(m_i(t-1), n_i(t-1)) \text{ and } c_i(t-1) < d_c \end{aligned} \quad (8)$$

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR5 устанавливается.

6. В случае если на текущей полосе движения существует препятствие, дистанция до него меньше, чем дистанция контроля качества дорожного покрытия, и для соседней полосы препятствие дальше либо же отсутствует вовсе.

Следующая формула реализует проверку для левой ближайшей полосы:

$$\begin{aligned} & q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) = 0 \text{ and} \\ & n_b(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) \\ & < n_b(m_i(t-1)-1, n_i(t-1), d_q) \end{aligned} \quad (9)$$

$n_b$  — возвращает дистанцию до ближайшего препятствия.

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная LTR6 устанавливается.

Следующая формула реализует проверку для правой ближайшей полосы:

$$\begin{aligned} & q_s(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) = 0 \text{ and} \\ & n_b(m_i(t-1), n_i(t-1), d_q) \\ & < n_b(m_i(t-1)+1, n_i(t-1), d_q) \end{aligned} \quad (10)$$

В случае если условия рассматриваемой мотивации выполнены, то переменная RTR6 устанавливается.

Все рассмотренные мотивации смены полосы движения необходимо анализировать вместе, потому что одновременно условия нескольких из них могут быть выполнены, тогда результирующая вероятность смены полосы движения должна быть максимальной из вероятностей применения всех сработавших мотиваций.

#### *Классификация мотиваций смены полосы движения*

Соответственно, с одной стороны, объявление своей собственной вероятности для каждой мотивации выглядит логичным, но с другой стороны, применение этого решения выливается во множество вероятностных параметров даже для однонаправленной многополосной модели. Если же речь идет о сложной модели для

обширной топологии УДС, то количество различных параметров и вероятностей будет чрезмерно, например, для эффективного применения алгоритмов машинного обучения.

Таким образом, необходимо уменьшить количество стохастических параметров модели настолько, насколько это возможно, в данном случае — с шести до меньшего числа. Для того чтобы достичь поставленной цели, введём разделение мотиваций по степени необходимости осуществить маневр перестроения на следующие три группы:

1. желательно: 1, 2, 4, 5;
2. необходимо: 3;
3. крайне необходимо: 6.

Таким образом, удастся уменьшить количество стохастических параметров с шести до трёх. Первая группа обладает наименьшей вероятностью срабатывания своих правил, в то время как последняя, соответственно, наивысшей. Важным преимуществом подобного разбиения на группы является тот факт, что оно позволяет сводить любое количество вероятностных переменных к трём, что, несомненно, ведет к упрощению работы с моделью.

#### *Алгоритмы анализа сработавших мотиваций*

Для того чтобы получить результирующую вероятность и направление для первой группы мотиваций, необходимо следовать следующему алгоритму действий:

В случае срабатывания первой или второй мотивации возможен вариант, когда приемлем как поворот налево, так и направо, или даже в обоих направлениях с вероятностью первой группы.

При срабатывании четвертой мотивации используется логика, рассмотренная для предыдущего случая, но с более высокой вероятностью, например 1,1 от базовой вероятности первой группы.

В случае срабатывания пятой мотивации, и если необходимость поворота направо уже была выставлена, то результирующим направлением первой группы будет поворот направо. Если же необходимость поворота направо не была выставлена на предыдущих шагах, то просто выставляем необходимость поворота направо. В обоих случаях в качестве результирующей вероятности осуществления маневра должен браться максимум среди вероятностей маневра, рассчитанный до этого, с базовой вероятностью первой группы.

Для того чтобы получить результирующую вероятность и направление для второй и третьей группы мотиваций, необходимо следовать следующему алгоритму действий:

В случае если правило группы мотиваций сработало, то необходимо установить результирующую вероятность как базовую вероятность соответствующей группы.

Заключительные общие шаги для всех групп:

В случае если как поворот налево, так и поворот направо приемлемы, то в качестве результирующего направления движения необходимо установить, что допустим поворот налево или направо.

В случае если существует только одно допустимое направление поворота, то необходимо установить его в качестве результирующего направления поворота.

#### *Результирующее направление и вероятность*

После расчёта результирующего направления и вероятности для каждой из трех групп мотиваций, необходимо рассчитать окончательное направление и вероятность совершения маневра перестроения. Схема алгоритма представлена на рис. 3.

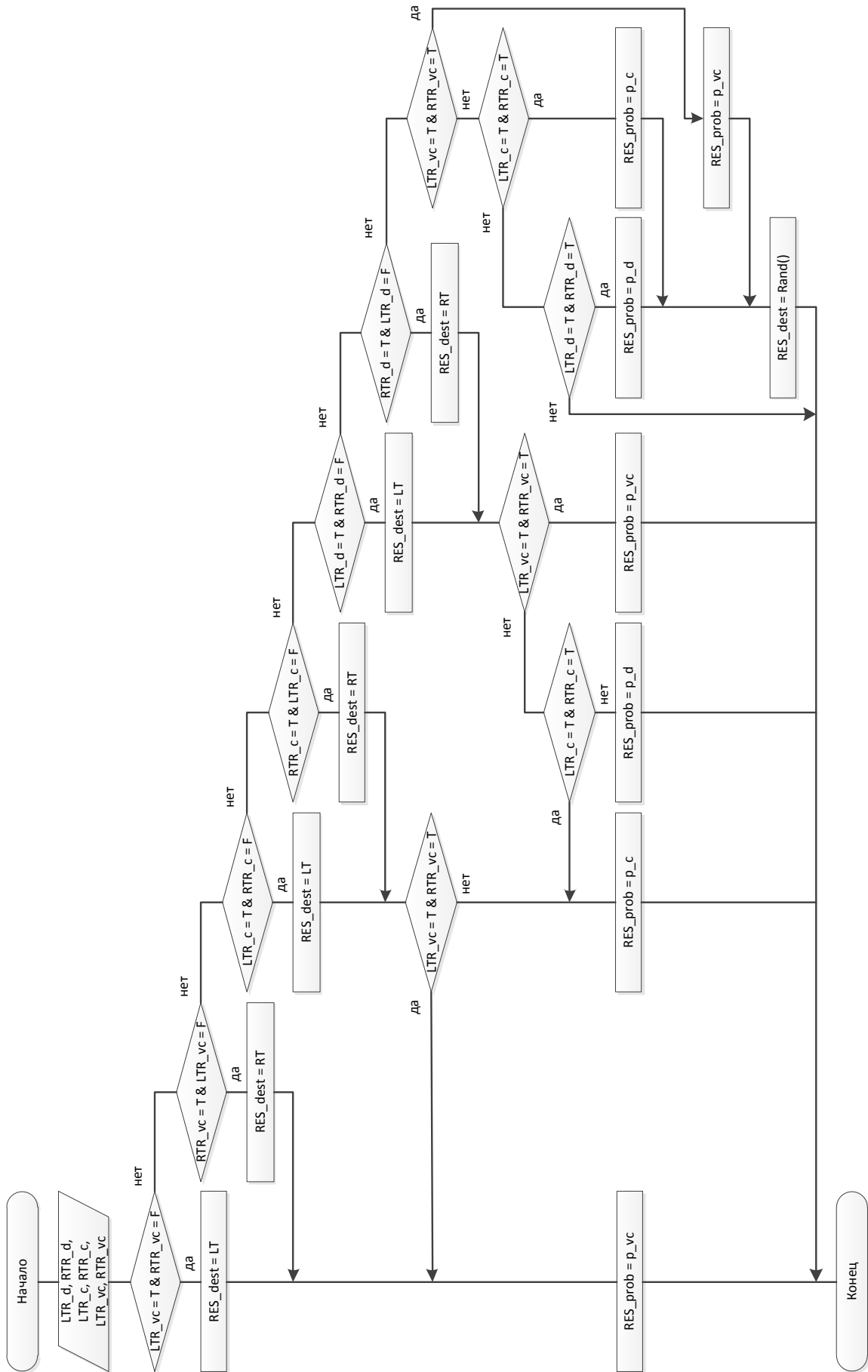


Рис. 3. Схема алгоритма определения результирующего направления и вероятности



Условные обозначения:

- LTR\_d — необходимость перестроиться на левую полосу для группы 1;
- RTR\_d — необходимость перестроиться на правую полосу для группы 1;
- LTR\_c — необходимость перестроиться на левую полосу для группы 2;
- RTR\_c — необходимость перестроиться на правую полосу для группы 2;
- LTR\_vc — необходимость перестроиться на левую полосу для группы 3;
- RTR\_vc — необходимость перестроиться на правую полосу для группы 3;
- RES\_dest — результирующее направление перестроения;
- LT — ближайшая левая полоса движения;
- RT — ближайшая правая полоса движения;
- RES\_prob — результирующая вероятность перестроения;
- Rand — функция выбора ближайшей полосы для перестроения, позволяющая избежать конфликта.

Таким образом, за счет введения групп мотиваций, удается достигнуть снижения количества стохастических параметров до фиксированного числа, что, как минимум, упрощает калибровку модели по экспериментальным данным, а также позволяет абстрагироваться от каждой конкретной мотивации и вести анализ и работу на более абстрактном уровне групп.

Рассмотренные алгоритмы определения результирующего направления маневра и вероятности его осуществления позволяют на примерах конкретных ситуаций перейти к общему алгоритму работы с представленными группами мотиваций по общим правилам, в независимости от количества правил в каждой из групп, их особенностей и сложности описания.

Проанализировав рассмотренные подходы, приходим к выводу, что получение направления и вероятности осуществления маневра смены полосы движения для каждого ТС происходит следующим образом:

- Определение сработавших мотиваций смены текущей полосы движения ТС.
- Расчет направлений и вероятностей для каждой сработавшей группы в отдельности.
- Расчет результирующего направления и вероятности осуществления маневра смены текущей полосы движения ТС.
- Определение осуществимости необходимого маневра.
- В случае если согласно рассчитанной вероятности маневр необходимо осуществить, то выполнить смену полосы движения текущего ТС, согласно необходимому направлению перестроения.

В качестве дальнейшего направления работы по моделированию динамики перестроений для моделей транспортного потока на основе ТКА можно рассматривать расширение предложенного набора базовых мотиваций смены полосы движения. Также при увеличении количества и изменении структуры групп рассмотренных мотиваций необходимо адаптировать описанные алгоритмы определения результирующего направления движения и вероятности осуществления маневра перестроения, если в этом есть смысл с точки зрения потенциально более комфортной ситуации на соседней полосе движения, или же если этот маневр необходим в связи с невозможностью продолжать движение в желаемом направлении на текущей полосе.

Помимо расширения возможностей, заложенных в базовой модели, также необходимо осуществлять контроль и сравнение адекватности экспериментальных данных с теми, что были получены в результате моделирования.

### **Однополосная однонаправленная модель передвижения**

Здесь и далее используются следующие условные обозначения:

- $v_{max}$  — максимально допустимая скорость ТС;
- $v_{l\ max_i}$  — скорость максимально допустимая ПДД;
- $v_m(c_i)$  — максимальная скорость, которую может развить данное ТС;
- $v_{rec_i}$  — рекомендуемая скорость, с учетом текущего положения ТС;
- $\xi$  — случайная величина, распределенная равномерно;
- $p$  — вероятность срабатывания правила случайного замедления;
- $p_s$  — вероятность срабатывания правила превышения скорости;
- $p_{sts}$  — вероятность срабатывания правила медленного старта;
- $d_{sts}$  — предельная дистанция, при которой правило медленного старта все ещё применимо;
- $p_{sa}$  — вероятность срабатывания, моделируемого в данном шаге, правила пространственного упреждения (*spatial anticipation*);
- $d_{sa}$  — предельная дистанция, при которой правило пространственного упреждения все ещё применимо;
- $b_i$  — признак включенного стоп-сигнала;
- $SSA$  — определяет возможность полной остановки ТС;

*Переход к шагу с адаптивным торможением*

Приведем первоначальное представление многофакторной модели, полученное в результате рефакторинга её исходного описания.

#### 1. Ускорение

$$\begin{aligned} &\text{if } \xi(t) < p_{sts} \text{ and } v_i(t-1) = 0 \text{ and } g_i(t-1) \leq d_{sts} \\ &\quad \text{then } v_i(t) = 0 \\ &\quad \text{else } v_i(t) = v_i(t-1) + 1 \end{aligned} \quad (11)$$

#### 2. Торможение

$$\begin{aligned} &b_i(t) = 0 \\ &\text{if } \xi(t) < p_{sa} \text{ and } v_i(t-1) > 0 \text{ and } v_{i+1}(t-1) > 0 \text{ and} \\ &\quad g_i(t-1) \leq d_{sa} \text{ and } (b_{i+1}(t-1) = 1 \text{ or } v_{i+1}(t-1) < \\ &\quad \quad v_i(t-1)) \\ &\quad \text{then } v_i(t) = v_{i+1}(t-1), b_i(t) = 1 \\ &\quad \text{if } v_i(t) > g_i(t-1) \text{ then } b_i(t) = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

#### 3. Случайное замедление

$$\text{if } \xi(t) < p \text{ then } v_i(t) = v_i(t) - 1 \quad (13)$$

#### 4. Валидация превышения рекомендованной и максимально допустимой правилами скоростей

$$v_i(t) = \min(v_i(t), v_{l\ max_i}(t-1), v_{rec_i}(t-1)) \quad (14)$$

#### 5. Превышение скорости

$$\begin{aligned} &\text{if } \xi(t) < p_s \text{ and } v_i(t-1) = v_{l\ max_i}(t-1) \\ &\quad \text{then } v_i(t) = v_i(t-1) + 1 \end{aligned} \quad (15)$$

#### 6. Валидация превышения максимально допустимой скорости

$$v_i(t) = \min(v_i(t), v_{max}, v_m(c_i)) \quad (16)$$

#### 7. Валидация снижения скорости до отрицательного значения

$$\text{if } v_i(t) < 0 \text{ then } v_i(t) = 0 \quad (17)$$

#### 8. Валидация остановки

$$\text{if } v_i(t) = 0 \text{ and } SSA = F \text{ then } v_i(t) = 1 \quad (18)$$

9. Валидация столкновения с впереди едущим ТС

$$\text{if } v_i(t) > g_i(t - 1) \text{ then } v_i(t) = g_i(t - 1) \quad (19)$$

10. Движение

$$n_i(t) = n_i(t - 1) + v_i(t) \quad (20)$$

Представленная модель объединяет в себе классическую однонаправленную однополосную модель передвижения, правило медленного старта, правило пространственного упреждения, случайное превышение скорости, а также ограничения предельно допустимой скорости ( $v_{max}$ ,  $v_{lmax_i}$ ,  $v_m(c_i)$ ,  $v_{rec_i}$ ).

*Введение шага адаптивного торможения*

Существенный недостаток данной модели — это шаг торможения. По причине того, что снижение скорости до скорости впереди едущего ТС происходит мгновенно и лишь в пределах дистанции реакции водителя на торможение лидера  $d_{sa}$ .

Возможна ситуация, при которой впереди едущий автомобиль снижает скорость, но все же движется быстрее текущего ТС, тогда произойдет ненужная адаптация скорости до большей, с последующим включением сигнала торможения  $b_i$ .

Формально данная модель использует стоп-сигнал  $b_i$ , но по факту это не классический стоп-сигнал во время торможения, это некий аналог, который в данном случае сигнализирует об адаптации скорости к скорости лидера.

В этой ситуации одним из сравнительно несложных и эффективных способов модернизации модели видится переработка шага торможения. Основной задачей, которую необходимо решить в данном случае, является реализация адекватного снижения скорости в ответ на стоп-сигнал впереди едущего ТС. С позиции реального дорожного движения это будет аналог постепенного снижения скорости с плавным сокращением дистанции до лидера.

Введем обозначение  $v_{dif_i}$ , которое будет выражать разницу скоростей текущего и впереди едущего ТС.

$$v_{dif_i} = v_i(t) - v_{i+1}(t) \quad (21)$$

Чтобы рассчитать количество тактов работы модели, при котором исключено столкновение с впереди едущим ТС, необходимо дистанцию до лидера  $g_i$  поделить на разницу скоростей  $v_{dif_i}$  и округлить до меньшего целого. Введем функцию  $Z_i$ , возвращающую количество тактов без конфликта.

$$Z_i = \left\lfloor \frac{g_i(t)}{v_{dif_i}(t)} \right\rfloor \quad (22)$$

Теперь, зная дистанцию до впереди едущего ТС  $v_{dif_i}$  и количество тактов движения без столкновения  $Z_i$  при сохранении текущей скорости, мы можем получить, насколько необходимо снизить скорость в текущем такте, чтобы за  $Z_i$ -тактов снизить скорость до скорости лидера. Данное значение снижения скорости можно рассчитать, как отношение разницы скоростей  $v_{dif_i}(t - 1)$  к количеству тактов без конфликтов  $Z_i(t - 1)$ .

$$\frac{v_{dif_i}(t - 1)}{Z_i(t - 1)} \quad (23)$$

Таким образом, изменение скорости в шаге торможения, при условии срабатывания предусловия, можно записать следующим образом

$$v_i(t) = v_i(t - 1) - \left\lfloor \frac{v_{dif_i}(t - 1)}{Z_i(t - 1)} K_{agr} \right\rfloor \quad (24)$$

В данном случае  $K_{agr}$  — коэффициент агрессивности торможения.

В целом же теперь шаг торможения будет выглядеть следующим образом

$$\begin{aligned} & \text{if } \xi(t) < p_{sa} \text{ and } g_i(t-1) \leq d_{sa} \text{ and } (b_{i+1}(t-1) = 1 \text{ or} \\ & \quad v_{dif_i}(t-1) > 0) \text{ and } 0 < Z_i(t-1) < Z_{upper} \\ & \quad \text{then } v_i(t) = v_i(t-1) - \left\lfloor \frac{v_{dif_i}(t-1)}{Z_i(t-1)} K_{agr} \right\rfloor \end{aligned} \quad (25)$$

В данном случае  $Z_{upper}$  — верхний предел количества тактов без конфликта, свыше которого торможение не целесообразно.

Помимо изменения формулы расчета новой скорости после торможения, из предусловия были убраны излишние проверки ненулевой скорости.

Теперь добавим перед шагом движения шаг оповещения о снижении скорости и включении стоп-сигнала:

$$\begin{aligned} & \text{if } v_i(t) < v_i(t-1) \\ & \quad \text{then } b_i(t) = 1 \\ & \quad \text{else } b_i(t) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Таким образом, на примере переработанного представления однополосной однонаправленной многофакторной модели транспортного потока был усовершенствован шаг торможения, его работа стала более плавной и похожей на то, как действуют водители во время торможения. Введены такие понятия, как количество тактов без конфликтов  $Z_i$ , коэффициент агрессивности торможения  $K_{agr}$ . Также была выведена формула (24), обеспечивающая плавное снижение скорости в ответ на торможение впереди едущего ТС в пределах дистанции принятия решения. Ответные действия в виде снижения скорости несут стохастический характер, а также не принимаются при условии, когда ещё имеется достаточное количество тактов движения без конфликта, которое определяется параметром  $Z_{upper}$ .

Также был изменен смысл сигнала  $b_i$ , в частности от псевдо стоп-сигнала удалось перейти к моделированию реального стоп-сигнала, включающегося при снижении скорости, и реакции на него транспортного потока. На примере стоп-сигнала был сформулирован четвертый общий тип шагов — оповещение или же сигнализация.

*Фундаментальные диаграммы разработанной однополосной однонаправленной модели передвижения*

На рис. 4 представлены зависимости интенсивности движения от плотности потока для трёх ситуаций: когда полная остановка запрещена, разрешена, и когда правило случайного замедления не работает.

Рассмотрев данные зависимости, делаем вывод, что треугольная форма фундаментальной диаграммы выполняется, т.е. макроскопические свойства транспортного потока воспроизводятся, а также, что изменение даже нескольких параметров позволяет регулировать результирующую пропускную способность полосы при разных плотностях движения. Большинство значений потока могут быть получены при двух значениях плотности, естественно, что наиболее предпочтительным является режим с меньшей плотностью, которому, согласно зависимостям, представленным на рис. 5, соответствует большее значение средней скорости движения транспорта.

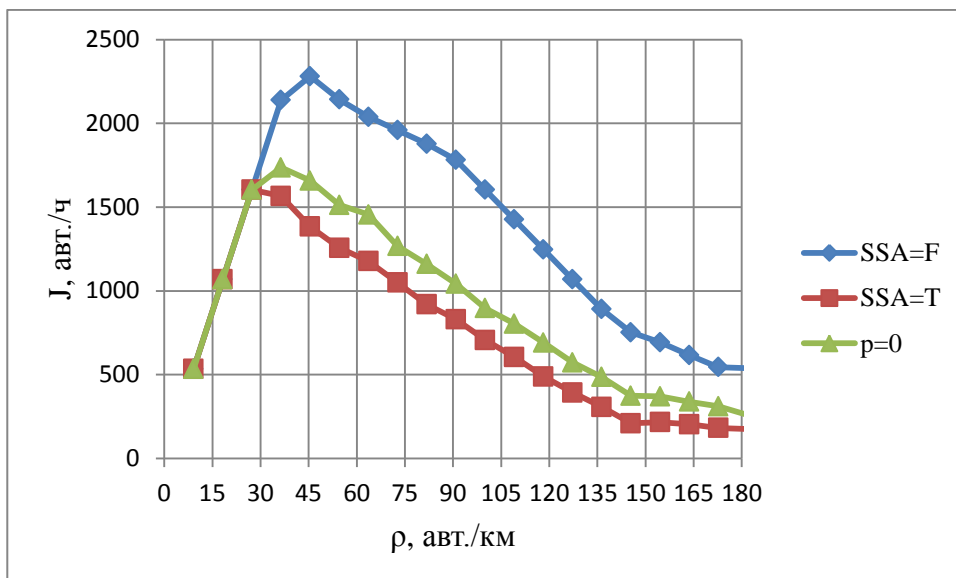


Рис. 4. Зависимость интенсивности движения от плотности потока

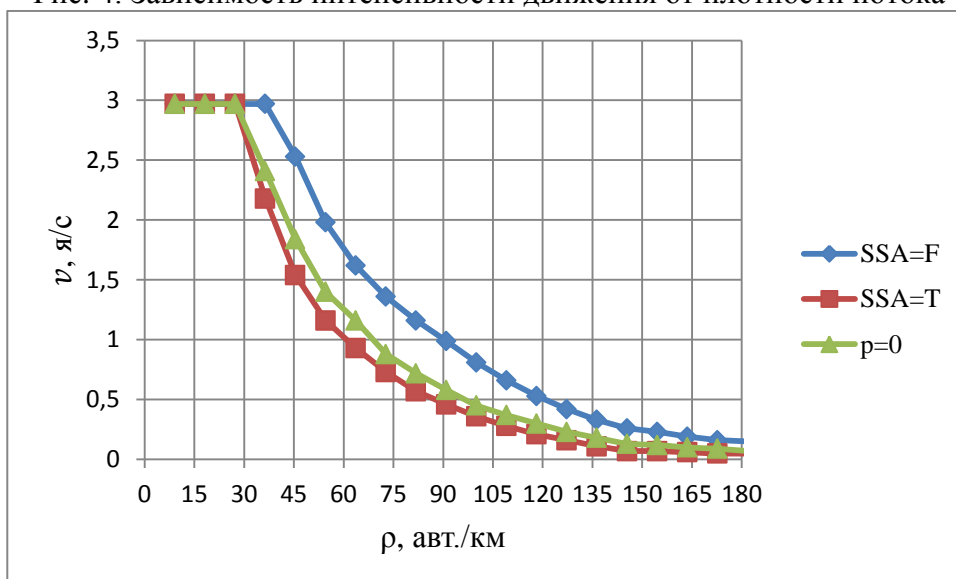


Рис. 5. Зависимость скорости движения от плотности потока  
*Практическое внедрение разработанных научных положений*

Разработанные модели, алгоритмы, методика и подходы прошли апробацию в городе Челябинске для участка улицы Труда от её пересечения с улицей Энгельса и до её пересечения с улицей Северо-Крымская. В качестве исходных данных для модели топологии выступают данные о схемах организации движения для соответствующих перекрёстков (пример в *приложении 1* — схема организации движения пересечения ул. Труда и ул. Энгельса) и параметрах транспортных потоков.

С учетом того, что сейчас в АСУДД, внедрённой в Челябинске, существует набор схем организации движения для рассматриваемых перекрестков, то при интеграции полученной модели топологии и подсистемы доступа «реального времени» к информации о характеристиках транспортного потока, появляется возможность моделировать все комбинации схем организации движения и осуществлять подбор наиболее оптимальных из них для оператора. Также возможно применять лучший вариант автоматически после проведения серии контролируемых испытаний, показывающих достаточную степень эффективности работы предлагаемой системы.

Модель, откалиброванная для данного участка УДС города Челябинска, позволяет перейти к анализу проектов развития рассматриваемой части УДС.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

Диссертационное исследование позволило решить важную научно-практическую задачу повышения эффективности и гибкости управления дорожным движением и развития УДС городов с помощью разработанной методики, математических моделей, алгоритмов и рекомендаций по практической реализации предлагаемых подходов и средств. Основные выводы и результаты диссертационного исследования состоят в следующем:

1. Выполненный в диссертации анализ различных подходов, методов и моделей, используемых для управления дорожным движением в крупных городах, показал, что они не обладают достаточной гибкостью и не позволяют обеспечивать упреждающее развитие улично-дорожной сети городов. Представлено обоснование того, что системы управления дорожным движением должны обеспечивать не только пропуск транспортных потоков через улично-дорожную сеть, но и давать возможность осуществлять её развитие в соответствии с динамикой транспортных потоков и неуклонно растущей нагрузкой на улично-дорожную сеть.

2. Разработаны алгоритмы и модели передвижения и смены полосы движения для группы моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов семейства микромоделей, которые позволяют в достаточной степени воспроизводить поведение водителей и способны отображать основные характеристики транспортного потока.

3. Разработан общий язык представления моделей транспортного потока на основе теории клеточных автоматов за счет формирования четырехступенчатого унифицированного представления моделей транспортного потока рассматриваемой группы. Это дало возможность дополнительно снизить сложность создания и доработки данных моделей, которые изначально имеют более естественные правила функционирования, нежели модели других семейств.

4. Сформированы методические положения по созданию систем управления дорожным движением и развития улично-дорожной сети городов, базирующиеся на разработанных в диссертации методах, математических моделях и алгоритмах. Предложен подход использования инструментов моделирования для проведения упреждающего развития улично-дорожной сети городов.

5. Осуществлена апробация основных научных положений и разработок диссертационного исследования на практике в городе Челябинске (на участке улицы Труда от её пересечения с улицей Энгельса и до её пересечения с улицей Северо-Крымская). Внедрение разработок, полученных в ходе диссертационного исследования, позволяет повысить пропускную способность заданного участка улично-дорожной сети не менее чем на 15%.

**Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в следующих печатных изданиях:**

*Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Логиновский, О.В. Развитие подходов к управлению и организации движения транспорта в крупных городах / О.В. Логиновский, А.А. Шинкарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – том 14, №4. – С. 51-58.

2. Шинкарев, А.А. Анализ и рефакторинг представления моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата / А.А. Шинкарев // В мире научных открытий. – 2015. – №4.1(64). – С. 585-595.

3. Shinkarev A.A. Traffic Lane Changing Motivations for Traffic Flow Mathematical Models Based on Cellular Automata Theory / A.A. Shinkarev // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – №3(61). – С. 48-51.

4. Shinkarev A.A. Traffic Flow Model Based on Cellular Automata with Adaptive Deceleration / A.A. Shinkarev // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2016. – том 16, №1. – С. 160-164. DOI: 10.14529/ctcr160115.

5. Логиновский, О.В. Анализ развития математического моделирования транспорта и перспективы использования клеточных автоматов в решении задач средних и крупных городов / О.В. Логиновский, А.А. Шинкарев // Динамика сложных систем — XXI век. – 2016. – №1. – С. 3-14.

6. Шинкарев, А.А. Построение систем управления движением транспорта на базе инструментов моделирования транспортных потоков / А.А. Шинкарев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – часть 2, №9(51). – С. 107-109. DOI: 10.18454/irj.2016.51.050.

*Прочие публикации по теме диссертационного исследования:*

7. Шинкарев, А.А. Мотивации смены полосы движения и их классификация для моделей транспортных потоков на основе клеточных автоматов / А.А. Шинкарев // Управление в социальных и экономических системах: сборник научных трудов / под ред. О.В. Логиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Вып. 3. – С. 110-112.

8. Шинкарев, А.А. Поддержка принятия решений по управлению УДС как сервис / А.А. Шинкарев // Управление в социальных и экономических системах: сборник научных трудов / под ред. О.В. Логиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Вып. 3. – С. 113-116.

9. Шинкарев, А.А. Управление движением транспорта в крупных городах / А.А. Шинкарев // Управление в социальных и экономических системах: сборник научных трудов / под ред. О.В. Логиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Вып. 3. – С. 117-125.

10. Шинкарев, А.А. Трехступенчатое унифицированное представление моделей транспортных потоков на основе клеточного автомата / А.А. Шинкарев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. часть 1, №3(34). – С. 126-128.

11. Shinkarev A.A. Prospects of Cellular Automata Usage for Middle and Large Cities Traffic Modeling / A.A. Shinkarev // Proceedings of the Workshop on Technologies of Digital Signal Processing and Storing. – 2015. – том 1, С. 104-107.

12. Шинкарев, А.А. Развитие улично-дорожной сети города и средства повышения эффективности ее работы / А.А. Шинкарев // Научный поиск: материалы восьмой научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 192-196.