

НАВОЙ Д.В.¹, КАПСКИЙ Д.В.¹, ФИЛИППОВА Н.А.², ПУГАЧЕВ И.Н.³

АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА В ПРИМЕНЕНИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

²Московский государственный автомобильно-дорожный технический университет (МАДИ), г. Москва, Российская Федерация

³Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск, Российская Федерация

При функционировании автоматизированных систем управления дорожным движением и их трансформации в интеллектуальные транспортные системы предъявляются современные требования к совокупному параметру – безопасности, который характеризует качество и эффективность дорожного движения, особенно при организации высокоскоростного нагруженного движения механических транспортных средств. В статье рассмотрены вопросы по применению для этих целей различных математических методов при моделировании транспортных процессов и систем, в том числе с учетом развития алгоритмов искусственного интеллекта, чтобы при принятии решений по управлению движением обладать достоверными прогнозными показателями, полученными по адекватным моделям. Выполнено сравнение моделей и даны рекомендации по их применимости и получаемым результатам для целей управления дорожным движением.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, моделирование, математические модели, прогнозирование, искусственный интеллект, управление движением

Введение

Системы управления дорожного движения в том или ином виде довольно успешно функционируют во всем мире, позволяя решать задачи по повышению безопасности дорожного движения, снижению экологического загрязнения от транспорта, повышению комфорта участников дорожного движения и др. И если «классические» методы математики при моделировании транспортных потоков и управлении ими хорошо изучены и нашли применение в промышленных системах управления дорожным движением, то применение искусственного интеллекта началось сравнительно недавно. К искусственному интеллекту относятся методы и подходы, которые имитируют биологически разумное поведение транспортно-пешеходных потоков для решения проблем оптимизации, что до сих пор было трудно решить с помощью «классической» математики.

В настоящее время методы искусственного интеллекта можно разделить на две категории:

– символический искусственный интеллект [1], основанный на высокоуровневом «символическом» (человеко читаемом) представлении задач, логики и поиска и фокусирующийся на экспертных системах [2]. Экспертные системы в свою очередь делятся на механизмы логического вывода (Inference engine) [3] и системы, основанные на знаниях (Knowledge-Based Systems – KBS) [4];

– вычислительный интеллект, который опирается на эвристические алгоритмы, используемые в нечеткой логике, искусственных нейронных сетях и эволюционном моделировании [5]. Также вычислительный интеллект охватывает такие области, как роевой интеллект (муравьиный алгоритм и т. д.), фракталы, теорию хаоса, вейтлеты и т. д.

1. 1. Системы, основанные на знаниях (Knowledge-Based Systems – KBS)

Системы, основанные на знаниях, состоят из независимых компонентов в виде правил, форм и объектов. Выбор того или иного вида компонента зависит от решаемой проблемы и инструментов, которые доступны для ее решения. Правило вида «если X, то Y» наиболее часто используется для выбора компонентов.

Концепция систем, основанных на знаниях была представлена в конце 70-х годов прошлого столетия. Работа над системами, основанными на знаниях в области управления дорожным движением началась в конце 80-х годов прошлого столетия [6], [7]. Примерами продуктов, созданных с использованием систем, основанных на знаниях, являются такие системы, как SCOOT [8], SCATS [9], OPAC [10], PROLYN [11], UTOPIA [12] и др.

Опыт использования систем, аналогичных SCOOT показал, что хорошие результаты в

управлении дорожным движением достигаются, когда дорожно-транспортная ситуация не критическая или заторовые ситуации возникают на кратковременные промежутки времени. В случае, если заторы носят долговременный характер, требуется вмешательство оператора по следующим причинам:

- оценка дорожно-транспортной ситуации системой может быть необъективной, так как детекторы транспорта иногда неэффективны для понимания процесса затора (так иногда длина очереди перед стоп-линией превышает расстояние от стоп-линии до детектора транспорта);

- ради устойчивого состояния сети, решения, принимаемые системой в виде текущих планов координации, слабо приспособлены к сложившейся ситуации и часто требуют более радикальных действий.

Исследования, представленные в ряде источников, показывают, что большинство систем управления дорожным движением предусматривают наличие функций оператора. Знания, которыми обладает оператор-человек, используются для разрешения таких проблем, как, например, структура транспортного спроса, выбор объездного маршрута при возникновении инцидентов и т. д.

1.1. Агентно-ориентированные системы (agent-based systems)

Агентно-ориентированные системы не отменяют присутствие оператора, но являются его помощниками при принятии решений. Примером агентно-ориентированной системы являются модели семейства системы TRYS [13], [14]. Интегрированная модель inTRYS [15], управляющая дорожным движением с помощью светофоров и дорожных информационных табло (variable message signs – VMS) состоит из набора моделей, которые функционируют на городском, междугороднем и смешанном уровнях. Транспортная сеть или город делятся на несколько контролируемых «проблемных зон». Агент, который «понимает» транспортные конфликты, которые могут возникнуть, обычное поведение транспортных средств в этом районе и сигналы светофоров и дорожных информационных табло, которые могут улучшить состояние трафика, контролирует каждую «проблемную зону». Контрольные предложения по улучшению дорожной обстановки, генерируемые каждым агентом, принимаются агентом более высокого уровня, называемым координатором, целью которого является создание глобального предложения для всего города путем объединения местных предложений, представленных агентами и устранения несоответствия между их предложениями. На рисунке 1 показана организация набора агентов на примере структуры

централизованной агентно-ориентированной модели inTRYS.

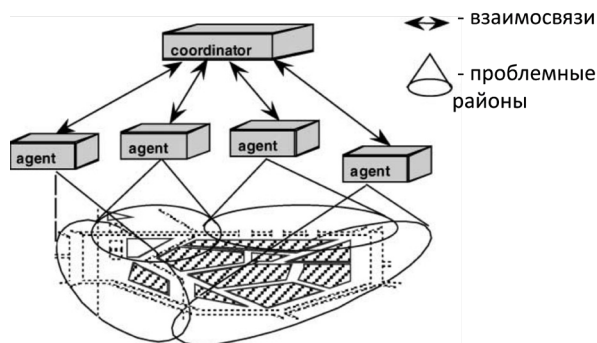


Рисунок 1. Структура централизованной агентно-ориентированной модели inTRYS [17]

Взаимодействие между inTRYS и системой управления дорожным движением позволяет модели inTRYS принимать входные данные (т.н. параметры скорости, прохождения, присутствия) от функционирующих в режиме реального времени устройств сбора исходных данных (через компьютер управления дорожным движением) и отправлять обратно управляющие воздействия на компьютер управления дорожным движением. В зависимости от системы управления дорожным движением, функционирующей в управляемом регионе (городе), управляющие воздействия разнятся от набора заранее рассчитанных планов координации из базы данных (или библиотеки управляющих воздействий для дорожных информационных табло), до набора ограничений на параметры настройки сигналов регулирования (то есть время цикла, продолжительность фаз и сдвиг) в полностью адаптивной системе.

В отличие от inTRYS вторая модель семейства TRYS- TRYS₂ [16] является децентрализованной. На рисунке 2 представлена структура модели TRYS₂.

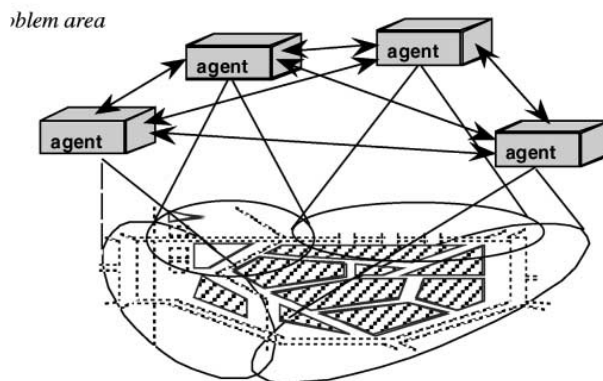


Рисунок 2. Структура децентрализованной агентно-ориентированной модели TRYS₂ [17]

В модели TRYSA₂ «проблемные зоны» контролируются автономными агентами, которые координируют свою работу с применением механизма структурной кооперации [17]. Необходимо отметить, что контрольные устройства "принадлежат" определенным агентам. При этом их соответствующие взаимные зависимости обеспечивают потенциал для взаимодействия. Это означает, что агенты могут обмениваться услугами, в отношении использования «своих» устройств. Вместе с тем, нормативные предписания допускают или запрещают использование некоторых устройств определенными агентами, изменяющим поведение агента, для того чтобы сделать его функциональным по отношению к эффективной функциональности управления трафиком [18].

В работе [19] предложена агентно-ориентированная модель, влияющая на распреде-

ление транспортного потока по сети с использованием навигационной информации.

В работе [20] предложена мульти-агентная адаптивная децентрализованная система управления светофорными объектами.

1.2. Рассуждения на основе прецедентов (Case-Based Reasoning - CBR)

Этот метод основан на принципе адаптации уже ранее известных решений под необходимые в соответствии с требуемыми задачами. Полный процесс рассуждений на основе прецедентов может быть представлен в виде цикла, состоящего из следующих задач: восстановить, повторно использовать, пересмотреть, проверить, сохранить. На рисунке 3 представлен цикл решения проблемы с помощью методов рассуждения на основе прецедентов.

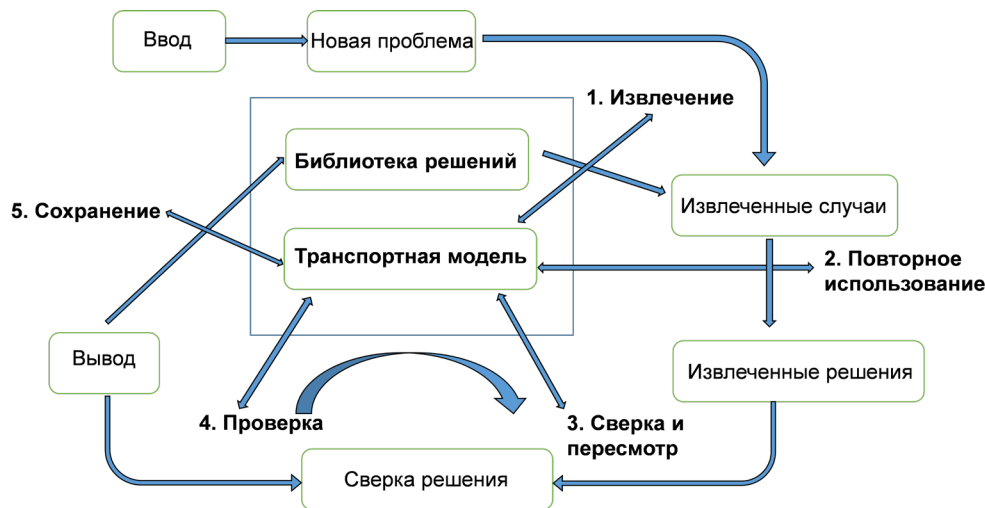


Рисунок 3. Цикл решения проблемы с помощью методов рассуждения на основе прецедентов [21]

Рассуждения на основе прецедентов привлекательны, потому что они напрямую касаются одной из самых сложных и наиболее дорогостоящих проблем, а именно выявления знаний. Рассуждения на основе прецедентов не требуют явной доменной модели или привлечения дорогих специалистов для своего развития. Таким образом, выявление становится задачей сбора базы данных возможных ситуаций, а реализация сводится к выявлению ситуации наиболее соответствующей происходящему, что является более простой задачей, чем создание модели. Применяя ситуации из базы данных, можно управлять большими объемами информации и рассуждения на основе прецедентов могут учиться, приобретая новые знания по мере решения тех или иных транспортных задач.

Методы рассуждения на основе прецедентов в зависимости от креативности (творческого подхода) делятся на четыре вида:

1. Методы, которые не обеспечивают появления новых решений.

2. Методы, которые обеспечивают появление адаптированных решений.

3. Методы, которые обеспечивают появление креативных (новых) решений.

4. Креативные методы, которые изначально разработаны для получения креативных (новых) решений.

В работе [22] метод рассуждения на основе прецедентов использован для выбора управляющих воздействий по снижению заторов. С помощью метода на основе прецедентов выявляются сходные черты между зафиксированными в базе данных «образов» заторов и выявленными в реальном режиме времени и выбираются сценарии влияния на основе выбора наиболее сходных по характеристикам «образов» затора.

В работе [23] разработаны прототипы инструментов поддержки принятия решений методом рассуждения на основе прецедентов и методом опорных векторов. Прототипы (модели), разработанные с применением данных методов,

предложены для оценки вероятных последствий реализации стратегий управления инцидентами на скоростной магистрали. Характеристики двух прототипов затем оцениваются путем сравнения их прогнозов условий движения с прогнозами, полученными от VISSIM. Результаты исследования показали, что предложенные модели могут использоваться в качестве инструментов для принятия решений для управления дорожным движением в реальном масштабе времени. При этом производительность модели с использованием метода опорных векторов была выше, чем у модели с использованием метода рассуждения на основе прецедентов. Однако автор делает вывод, что последующие исследования должны быть сосредоточены на объединении обеих парадигм для комплексной системы поддержки принятия решений для управления дорожным движением, в которой метод опорных векторов может использоваться для расширения возможностей системы на основе метода рассуждения на основе прецедентов.

В работе [24] предлагается для повышения качества дорожного движения на пересечениях использовать трехмодульную систему, состоящую из системы рассуждения на основе прецедентов,

продукта Имитационный менеджер и имитационного инструмента Aimsun. Имитационный менеджер на основе входных данных выбирает подходящий сценарий. Выбранный сценарий отправляется в систему рассуждения на основе прецедентов откуда возвращается прогнозируемый транспортный поток, основанный на функциях сценария. Затем рассчитывается план координации с использованием формулы Вебстера [25] для подсчета задержек и значений, полученных от норвежской дорожной администрации [26]. Результаты возвращаются в Имитационный менеджер. Затем полученный план, совместно с сопутствующей информацией сценария конфигурируется и направляется в Aimsun для имитационного моделирования. Результаты моделирования отображаются в Aimsun. Aimsun является специализированным программным обеспечением для имитационного моделирования движения транспортных потоков и получило известность за счет своего быстрого действия. В Aimsun можно проводить микро, мезо и макро моделирование транспортных потоков, с возможностью функциональной доработки программного обеспечения. Схема работы системы представлена на рисунке 4.

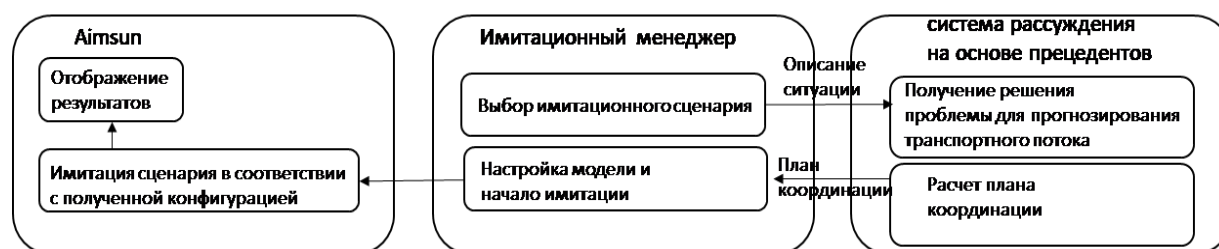


Рисунок 4. Функциональная схема трехмодульной системы

Имитационный менеджер разработан на языке Python и имеет доступ к Aimsun через интерфейс сценариев. Система рассуждения на основе инцидентов реализована на фреймворке jCOLIBRI, разработанному на Java. Взаимодействие между тремя модулями осуществляется с помощью программных разъемов (сокетов). Структура прецедентов основана на работе [27], в которой используются данные о времени (дата, день недели, время), погодных и температурных условиях, длина очереди для каждой полосы движения и специальные мероприятия (футбол, ремонтные работы и т. д.).

В работе [28] предложена гибридная методология рассуждения на основе прецедентов для управления локальным регулируемым перекрестком. Авторы объединили Метод k -ближайших соседей (Condensed Nearest Neighbour) с системой на основе правил (case based system). Алгоритм реализован на языке программирования Python и применен на модели локального перекрестка в среде VISSIM.

2. Нейронные сети

«Искусственная нейронная сеть – математическая модель или аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма» [29].

В настоящее время существует три поколения нейронных сетей:

1. Бинарные нейросети.
2. Частотно-скоростные нейросети.
3. Импульсные нейросети.

Примерами развитых и гибридных топологий нейросетей являются следующие типы сетей:

1. Модульная сеть (ModularNetwork) – высокое быстродействие, по сравнению с однородной сетью за счет реализации принципа «разделяй и властвуй», когда решение сложных систем выполняется набором локальных нейросетей.

2. Гибридная сеть анализа главных компонентов (Hybrid Principal Component Analysis Network) – используется для сжатия данных.

3. Коактивнаянейро-нечеткая логическая система (Coactive Neuro-Fuzzy Inference System) – универсальный аппроксиматор любой нелинейной функции.

4. Сеть Джордана-Эльмана (Jordan-Elman Network) – используется для изучения временных последовательностей или изменяющихся во времени шаблонов [30].

5. Частично рекуррентная сеть (Partially Recurrent Network) – упрощенная сеть Джордана-Эльмана без скрытых нейронов.

6. Сеть с обратной связью с задержкой по времени (Time-Lagged Feed-Forward Network) – применяется для управление процессом эксплуатации улично-дорожной сети и инженерия (для прогнозирования состояния покрытия проез-

жей части), краткосрочное прогнозирование загрузки улично-дорожной сети.

Для прогнозирования наиболее часто используются такие архитектуры нейросетей, как перцептрон [31] и сеть радиально-базисных функций [32]. Прогнозирование состояний транспортного потока с применением нейросетей представлено в работах [33], [34], [35].

В работе [36] искусственная нейронная сеть используется для построения прогнозов функционирования транспортного потока исследуемой транспортной системы города. Как правило адаптация искусственной нейронной сети осуществляется при помощи настройки весовых коэффициентов, в приближении их значений к величинам обучающей пары (рисунок 5) [36].

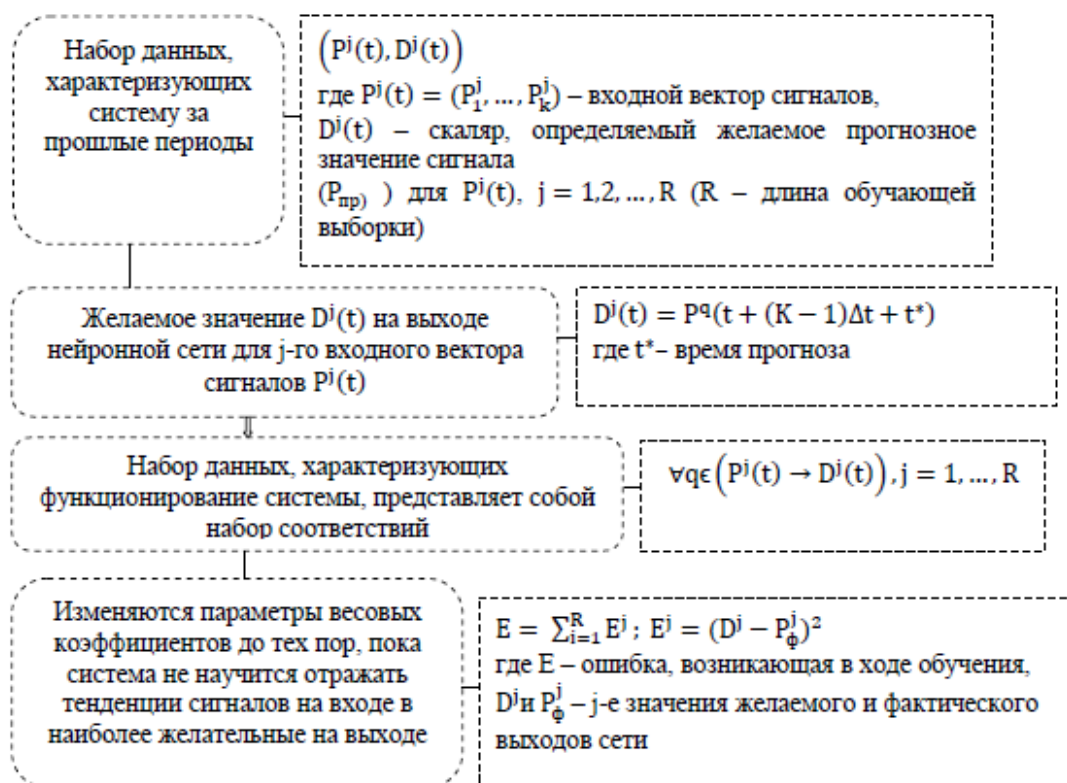


Рисунок 5. Последовательность реализации искусственной нейронной сети [36]

В качестве метода обучения искусственной нейронной сети использовался алгоритм обратного распространения ошибки, основанный на методе градиентного спуска.

Патент [37] использует предопределенный набор пикселей (плиток) для изучения форм и движения активных пикселей и анализа их с использованием программного обеспечения, основанного на нейросети, для идентификации транспортных средств и траекторий их движения. Открытая система используется, как система

предотвращения нарушений проезда на запрещающий сигнал светофора, а также для предотвращения дорожных коллизий и инцидентов.

В работе [38] предлагается модель прогнозирования интенсивности транспортных потоков с использованием перцептрона с одним скрытым слоем на основе данных, полученных от видеодетекторов.

В работе [39] предложено использовать видеонаблюдение и нейросеть для снижения уровня стресса в транспортной сети.

В работах [40], [41] предложено использовать нейросеть для классификации транспортного потока по информации, поступающей от видеокамер.

Для решения задач оптимизации наиболее подходят такие архитектуры нейросетей, как самоорганизующаяся карта Кохонена [42] и нейронная сеть Кохонена [43].

В работе [44] представлен нейросетевой подход для корректировки параметров сети дорог. Для определения параметров пропускных способностей в работе используется двухслойная неполно связная искусственная нейронная сеть. Архитектура искусственной нейронной сети выбирается соответственно взаимосвязям дорог на перекрестках, значения весов совпадают с параметрами пропускных способностей и распределений потоков. На вход подаются значения потоков на участках дорог в некоторый момент времени, а на выход – потоки на участках дорог в следующий момент времени.

Предлагаемый подход основан на представлении параметров пропускных способностей сетей двухслойной неполно связанной искусственной нейросетью, архитектура которой зависит от расположения и взаимосвязи пересечений в одном уровне, которые связывают между собой соответствующие участки улиц (дорог). Весовые значения строго коррелируют с параметрами пропускной способности и характеристиками транспортных потоков по сети, а также их распределения по ней. Таким образом, что вход представляет собой параметры потоков на отдельных участках улиц в определенный момент времени, а на выходе получаются сгенерированные транспортные потоки для этих же участков дорог и улиц в последующие временные отрезки. Причем чем точнее данный прогноз, тем реалистичней нейросеть описывает параметры и топологию транспортных сетей.

В некоторых работах рассматриваются вопросы управления локальными перекрестками с помощью клеточных нейронных сетей по критерию минимизации задержек перед стоп-линией [45]; иногда применяются сверточные нейросети («обучение с подкреплением») для адаптивного управления [46], с учетом длин фаз [47] и последовательности и периодичности их переключения [48], и многие другие аспекты, связанные с бионическим представлением транспортных сетей и их биологическими особенностями [49, 50].

3. Нечеткие алгоритмы

В работе [51] представлена симуляция нечеткого контроллера с использованием MATLAB

для регулирования движением транспортных потоков на локальном перекрестке. Контроллер позволяет изменять диаграмму и фазы работы светофорного объекта по параметрам оптимизации: минимальное время ожидания, длина очереди и задержки.

В работе [52] описан метод, который предназначен для реализации в среде онлайн-моделирования, позволяющей оптимизировать адаптивную стратегию управления движением. Показатели эффективности вычисляются с использованием нечеткой клеточной модели транспортного потока, сформулированной как гибридная система, сочетающая в себе как клеточные автоматы, так и нечеткую логику.

В работах [53], [54] предлагается использовать нечеткую логику для прогнозирования состояния транспортного потока.

В патенте [55] представлен метод адаптивной работы светофорного объекта, основанный на выборочном распределении предупреждающих сигналов для водителей, использующий нечеткую логику для определения оптимальной продолжительности фаз регулирования с использованием GPS.

В патенте [56] описан метод и система для осуществления контроля за дорожным движением, работы светофорных объектов, а также выбора информационных сообщений для водителей. Нечеткая логика используется для контроля работы светофорных объектов и обеспечения объективной информации для водителей, основанной на их геопозиции и направлении движения. GPS координаты транспортных средств рассчитываются в транспортных средствах, а нечеткий алгоритм определяет степень опасности для транспортного средства. Водитель уведомляется о ситуациях, которые необходимо избежать с помощью визуальных или голосовых сообщений.

4. Генетические алгоритмы

Основные принципы генетических алгоритмов впервые предложены в работе [57], основанной на механизме естественного отбора.

4.1. Муравьиный алгоритм оптимизации

В работах [58], [59] предлагается поиск оптимального пути с использованием муравьиного алгоритма оптимизации. Идея муравьиного алгоритма – моделирование поведения муравьев, связанного с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь. При своём движении муравей метит путь феромоном,

и эта информация используется другими муравьями для выбора пути. Это элементарное правило поведения и определяет способность муравьев находить новый путь, если старый оказывается недоступным [59].

Достоинствами муравьиного алгоритма оптимизации являются лучший результат, по сравнению с другими известными алгоритмами, в связи с чем используется для широкого спектра решаемых задач в технике, проектировании, медицине и пр.; легко адаптируется к различным изменениям и использует не только память предыдущего поколения, а всю, в связи с чем повышается вероятность принятия оптимального решения. Однако при гарантируемой сходимости он не ограничен временными рамками и требует применения дополнительных методов оптимизации, в связи с чем сильно зависит от экспериментально устанавливаемых параметров модели.

5. Синергетические системы

Данный класс моделей представляет собой симбиоз нейронных сетей и неч использованием нечетких алгоритмов и нейросети на базе дорожного контроллера [62], а также является гибридом генетических и нечетких алгоритмов. В работе [63] предлагается краткосрочный прогноз заторов на девяти километровом отрезке шоссе. Для прогнозирования заторов предлагается использовать иерархическую нечеткую систему. Для оптимизации параметров в иерархии нечеткой системы предлагается использовать комбинацию метода перекрестной энтропии (Cross Entropy) и генетический алгоритм. Результаты исследования показали, что совместное использование метода кросс-энтропии и генетического алгоритма дает более точный прогноз по заторам чем их раздельное использование.

В работах [64, 65] рассматривается гибридный генетического алгоритма и контроллера с нечеткой логикой в составе системы управления дорожным движением. Для выбора решений в системе управления дорожным движением используется контроллер с нечеткой логикой, а добавление генетического алгоритма для выбора из предлагаемых нечетким алгоритмом решений наиболее эффективных, позволяет получить хорошие результаты.

Упрощенная блок-схема алгоритма представлена на рисунке 9.



Рисунок 9. Блок-схема алгоритма

Заключение

Разработка и совершенствование интеллектуальной транспортной системы предъявляет новые требования к безопасности и эффективности дорожного движения, особенно при организации высокоскоростного нагруженного движения по автомагистралям и уличным сетям. Поэтому необходимо оперировать при принятии решений по управлению движением достоверными прогнозными показателями, полученными по адекватным моделям, составленным на основе искусственного интеллекта. Как показал анализ, модели на основе статистики имеют лучшую интерпретируемость, но несколько ограниченную адаптационную возможность, вместе с тем модели, основанные на машинном обучении, характеризуются как более гибкие.

Результаты анализа показали, что гибридный подход дает эффект на 34 % лучше по сравнению с классическими дорожными контроллерами и на 31 % лучше, по сравнению с дорожными контроллерами, работающими на основе нечеткой логики. Также возможно создание системы, в которой генетический алгоритм используется для формирования цифровой подписи участка улично-дорожной сети на основании данных о транспортном потоке, где информация о транспортном потоке используется для прогнозирования его поведения в заданный промежуток времени. С помощью нечеткой логики может определяться, являются ли прогнозируемые результаты поведения транспортного потока аномалией.

Следует отметить, что нечеткая логика используется в управлении дорожным движением

для анализа в реальном времени данных от различных видов транспорта, включая автономные автомобили, автобусы и трамваи.

На регулируемых пешеходных переходах внедряется искусственный интеллект для координации освещения. Следует также отметить что устранение в управлении т.н. «человеческого фактора» должно снизить количество дорожных аварий.

Как представляется, участники дорожного движения в ближайшем будущем смогут участвовать в безопасном дорожном движении и взаимо-

действовать между собой только при помощи цифровых инструментов без физически находящихся на улице дорожных контроллеров, дорожных знаков и разметки, транспортных и пешеходных светофоров, осуществляя движения по оптимальным цифровым маршрутам.

Установлено, что на качество программного обеспечения по организации и управлению движением влияет не только сами алгоритмы, созданные на основе искусственного интеллекта, но и количество и качество (достоверность) обучающих данных.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Капский Д.В.** Основы автоматизации интеллектуальных транспортных систем: Учебник / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.В. Богданович [и др.]. – Вологда: ООО "Издательство "Инфра-Инженерия", 2022. – 412 с.
2. **Скиркоцкий, С.В.** Теоретические и практические подходы к созданию и развитию интеллектуальной транспортной системы города / С.В. Скиркоцкий, Д.В. Капский, Д.В. Навой; Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь; Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2022. – 171 с.
3. **Пугачев И.Н.** Оценка экологических потерь в дорожном движении на основе GPS-данных о параметрах транспортных потоков и моделирования / И.Н. Пугачев, Д.В. Капский, Л.П. Майорова [и др.]. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2020. – 250 с.
4. **Капский, Д.В.** Анализ алгоритмов управления дорожным движением и их применимости на современном этапе развития ИИТС / Д.В. Капский, И.Н. Пугачев, Д.В. Навой // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2019. – № 1-1. – С. 259-264.
5. **Капский, Д.В.** Трехуровневая модель управления транспортными и пешеходными потоками / Д.В. Капский, И.Н. Пугачев, Д.В. Навой // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. – 2019. – № 1-1. – С. 265-270.
6. **Scemama G.** (1989) Creation of a knowledge-based system for urban traffic control: methodology. Recherche Transport Securite. English Issue 5, June 1990.
7. **Cuena J.** (1989) AURA: a second generation expert system for traffic control in urban motorways. IX Int. Workshop on Expert Systems. EC2. Avignon.
8. **Hunt, Robertson, Bretherton, Winton,** 1981. SCOOT. A traffic responsive method of coordinating signals. Transport and Road Research Laboratory, Report no. LR 1014, TRRL, Crowthorne, UK.
9. **Sims A.G.** and Dobinson K.W. 1981, "S.C.A.T. The Sydney co-ordinated adaptive traffic system: philosophy and benefits", Proceedings from symposium on computer control of transport, Institution of engineers, Australia, Canberra.
10. **N.H. Gartner,** OPAC: Strategy for Demand-responsive Decentralized Traffic Signal Control, Volume 23, Issue 2, September 1990, pp. 241-244.
11. **J.J. Henry, J.L. Farges, J. Tuffal.** The Prodyn Real Time Traffic Algorithm, Volume 16, Issue 4, April 1983, Pages 305-310.
12. **Mauro V., DiTaranto C.** UTOPIA. Control, Computers, Communications in Transportation, 1990, pp. 245-252. 8. Traffic control in oversaturated street networks. NCRHP report, 1978, no. 194, 152 p.
13. **Cuena, J., Hernandez, J.Z., Molina, M.** 1995. Knowledge-based models for adaptive traffic management systems. Transportation Research, Part C 3 (5), 311-337.
14. **Cuena, J., Hernandez, J.Z., Molina, M.,** 1996a. Knowledge oriented design of an application for real time traffic management: The TRYS system. In: Wahlster, W. (Ed.), Eur. Conf. on Artificial Intelligence, ECAI_96. John Wiley and Sons, New York, pp. 308-312.
15. **Cuena, J., Hernandez, J.Z., Molina, M.,** 1996b. An intelligent model of road traffic management in the motorway network around Barcelona. In: Proc. 14th Int. Federation on Information Processing (IFIP) World Computer Congr., IFIP_96. Chapman & Hall, London, pp. 173-180.
16. **Ossowski, S., Cuena, J., Garcia-Serrano, A.,** 1998. A case of multiagent decision support: using autonomous agents for urban traffic control. In: Proc. Iberoamerican Conf. of Artificial Intelligence, IBERAMIA-98.
17. **Ossowski, S., Garcia-Serrano, A.,** 1999. In: Social Structure as a Computational Co-ordination Mechanism in Societies of Autonomous Problem-solving Agents. Intelligent Agents V. Springer-Verlag, pp. 133-148.
18. **Ossowski, S.** 1999. Co-ordination in Artificial Agent Societies. LNAI 1535. Springer-Verlag, Berlin.

19. **Daniele Buscema, Matteo Ignaccolo, Giuseppe Inturri, Alessandro Pluchino, Andrea Rapisarda, Corrado Santoro, Salvatore Tudisco.** The impact of real time information on transport network routing through Intelligent Agent-Based Simulation, University of Catania, Italy, TIC-STH 2009.
20. Smart Urban Signal Networks: Initial Application of the SURTRAC Adaptive Traffic Signal Control System, Stephen F. Smith, Gregory J. Barlow, Xiao-Feng Xie, Zachary B. Rubinstein, Proceedings of the Twenty-Third International Conference on Automated Planning and Scheduling.
21. **Aha DW.** (1998). The omnipresence of case-based reasoning in science and application. *Knowledge-Based Systems* 11:261–273.
22. **Hao Zhang, GuangLong Dai.** The strategy of traffic congestion management based on case-based reasoning, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, February 2019, Volume 10, Issue 1, pp. 142-147.
23. **Mashrur Chowdhury, Adel Sadek, Yongchang Ma, Neeraj Kanhere, and Parth Bhavsar.** Application of Artificial Intelligence Paradigm to Decision Support in Real-Time Traffic Management, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1968, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2006, pp. 92-98.
24. **Anders Kofod-Petersen, Ole Johan Andersen, and Agnar Aamodt.** Case-based Reasoning for Improving Traffic Flow in Urban Intersections, 22nd International Conference, ICCBR 2014, Cork, Ireland, September 29, 2014 - October 1, 2014. Proceedings.
25. **Webster, F.V.** Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No. 39. Great Britain Road Research Laboratory (1958).
26. **Statens Vegvesen:** Trafikksignalanlegg: planlegging, drift og vedlikehold, Håndbok 142. (2007).
27. **Zhenlong, L., Xiaohua, Z.** A case-based reasoning approach to urban intersection control. In: 7th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA2008). (2008) 7113–7118.
28. **Ali LOUATI, Sabeur ELKOSANTINI, Saber DARMOUL and Lamjed BENSaid.** A Case-Based Reasoning System to Control Traffic at Signalized Intersections, *IFAC-Papers On Line* 49-5 (2016) 149-154.
29. **Пугачев И.Н.** Оценка качества дорожного движения на основе навигационной информации об условиях движения транспортных потоков / И.Н. Пугачев, Д.В. Капский, В.В. Касьяник [и др.]. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2018. – 148 с.
30. **X. Ma, H. Yu, Y. Wang, and Y. Wang.** Large-scale transportation network congestion evolution prediction using deep learning theory. *PloS one*, 10(3):e0119044, 2015.
31. **Капский Д.В., Кот Е.Н.** Концепция развития автоматизированных систем управления дорожным движением в Республике Беларусь // Научно-технический журнал «Вестник БНТУ» – Минск, 5'2005. – С. 63-66.
32. **Пугачев И.Н.** Синергия подходов к совершенствованию интеллектуальных транспортных систем городов в России и Белоруссии / И.Н. Пугачев, Д.В. Капский, Д.В. Навой [и др.]. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2020. – 230 с.
33. **S. Dunne, B. Ghosh.** Weather adaptive traffic prediction using neuro wavelet models. *IEEE Trans. Intell. Transportation Syst.* 14(1), 370-379 (2013).
34. **E. Mazloui, G. Rose, G. Currie, S. Moridpour.** Prediction intervals to account for uncertainties in neural network predictions: methodology and application in bus travel time prediction. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 24(3), 534-542 (2011).
35. **CPIJ van Hinsbergen, A Hegyi, JWC van Lint, HJ van Zuylen.** Bayesian neural networks for the prediction of stochastic travel times in urban networks. *IET Intell. Transport Syst.* 5(4), 259-265 (2011).
36. **Мартынова Е.С.** Оценка уровней обслуживания движения транспортных потоков на основе нечетких экспертных систем, диссертация на соискание научной степени кандидата наук, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2018.
37. Патент Glieretal. US 2002/0054210.
38. **Sergey V. Anfilets, Vasilij N. Shuts,** ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR ADAPTIVE MANAGEMENT TRAFFIC LIGHT OBJECTS AT THE INTERSECTION, Proceedings of the 10th International Conference “Reliability and Statistics in Transportation and Communication” (RelStat’10), 20–23 October 2010, Riga, Latvia, pp. 457-462. Transport and Telecommunication Institute, Lomonosova 1, LV-1019, Riga, Latvia.
39. **Ozkurt, C., Camci, F.** Automatic traffic density estimation and vehicle classification for traffic surveillance systems using neural network. *Math. Comput. Appl.* 14(3), 187-196 (2009).
40. **V. Murugan, V.R. Vijaykumar.** Automatic Moving Vehicle Detection and Classification Based on Artificial Neural Fuzzy Inference System, *Wireless Personal Communications*, June 2018, Volume 100, Issue 3, pp. 745-766.
41. **Ozkurt, C., & Camci, F. (2009).** Automatic traffic density estimation and vehicle classification for traffic surveillance systems using neural networks. *Mathematical and Computational Applications*, 14(3), 187-196.
42. **Врубель, Ю.А.** Координированное управление дорожным движением: монография / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Д.В. Рожанский, Д.В. Навой, Е.Н. Кот. – Минск: БНТУ, 2011. – 230 с.
43. **П. Пржибыл, М. Свитек.** Телематика на транспорте. М.: МАДИ (ГТУ), 2003 – 540 с.
44. **Д.Э. Казарян, В.А. Михалев, Е.А. Софронова.** Нейросетевые подходы к управлению потоками транспорта, *Вестник Российского университета Дружбы народов*, 2017. Vol. 18. No. 1, pp. 97-106.

45. **J.C.Chedjou, K. Kyamakya.** Cellular neural networks based local traffic signals control at a junction/intersection. Proceedings of the 1st IFAC Conference on Embedded Systems 2012 (CESCIT-2012) 3-5 April, 2012, Wurzburg, Germany, pp. 81-85.
46. **W. Genders, S. Razavi.** Using a deep reinforcement learning agent for traffic signal control. Submitted to IEEE for publication on 3 November 2016.
47. **C. Chedjou, K. Kyamakya.** Cellular neural networks based local traffic signals control at a junction/intersection. Proceedings of the 1st IFAC Conference on Embedded Systems 2012 (CESCIT-2012) 3-5 April, 2012, Wurzburg, Germany, pp. 81-85.
48. **W. Genders, S. Razavi.** Using a deep reinforcement learning agent for traffic signal control. Submitted to IEEE for publication on 3 November 2016.
49. **G.B. Castro, J.C. Martini, A. Hirakawa.** Biologically-inspired neural network for traffic signal control. Proc. of 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems 2014 (ITSC) 8-11 October, 2014, Qingdao, China, pp. 2144-2149.
50. **Абовский Н.П., Бабанин В.Б., Смолянинова Л.Г., Жуков В.И., Островский П.В.** Нейросетевой способ межрайонного координированного управления транспортными потоками, патент 2169946.
51. **Azura Che Soh / Lai Guan Rhung.** MATLAB simulation of fuzzy traffic controller for multilane isolated intersection. Int. J. Comput. Sci. Eng. 02(04), 924-933 (2010).
52. **Placzek, B.** Performance evaluation of road traffic control using a fuzzy cellular model. In: 6th International Conference on HAIS, Wroclaw, pp. 59-66. Proceedings, Part II, 23–25 May 2011.
53. **VP Vijayan, B Paul.** Multi objective traffic prediction using type-2 fuzzy logic and ambient intelligence, in Proceedings of 2010 International Conference on Advances in Computer Engineering (ACE) (Egypt, 2010), pp. 309-311;
54. **L Li, WH Lin, H Liu.** Type-2 fuzzy logic approach for short-term traffic forecasting. IEEProc. Intell. Transport Syst. 153(1), 33-40 (2006).
55. Патент Lemelsonetal. U.S. Pat. No. 6,633,238.
56. Патент Lemelsonetal. (U.S. Pat. No. 6,317,058).
57. **J.H. Holland.** "Genetic algorithms and the optimal allocation of trials," SIAM Journal on Computing, vol. 2, no. 2, pp. 88-105, 1973.
58. **Gambardella Luca M.** Ant colony optimization for ad-hoc networks. In: The first MICS workshop on routing for Mobile Ad-Hoc Networks, Zurich, 13 Feb 2003.
59. **Cyrille, B., Antoine, D., Sylvain, L., Damien, O.** Road traffic management based on ant system and regulation method (2006).
60. **Штовба С.Д.** Муравьиные алгоритмы // Экспонента Про. Математика в приложениях. – 2003. – №4. – С. 70-75.
61. **S. Araghi, A. Khosravi, D. Creighton.** Optimal design of traffic signal controller, using neural networks and fuzzy logic systems. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 2014 (IJCNN) 6-11 July, 2014, Beijing, China, pp. 42-47.
62. **S. Araghi, A. Khosravi, D. Creighton.** Optimal design of traffic signal controller, using neural networks and fuzzy logic systems. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 2014 (IJCNN) 6-11 July, 2014, Beijing, China, pp. 42-47.
63. **Pedro Lopez-Garcia, Enrique Onieva, Eneko Osaba, Antonio D. Masegosa, and Asier Perallos.** A Hybrid Method for Short-Term Traffic Congestion Forecasting Using Genetic Algorithms and Cross Entropy, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016. Vol. 17. Issue 2.
64. **S.M. Odeh, A.M. Mora, M.N. Moreno, and J.J.Merelo.** A Hybrid Fuzzy Genetic Algorithm for an Adaptive Traffic Signal System, Hindawi Publishing Corporation Advances in Fuzzy Systems, Volume 2015, Article ID 378156, 11 pages.
65. **Anderson Hiroshi Hamamoto, Luiz Fernando Carvalho, Lucas Dias Hiera Sampaio, Taufik Abrão, Mario Lemes Proença.** Network Anomaly Detection System using Genetic Algorithm and Fuzzy Logic. Expert system with application, Volume 92, February 2018, pp. 390-402.

NAVOI DMITRY¹, KAPSKI DENIS¹, FILIPPOVA NADEZDA², PUGACHEV IGOR³

ANALYSIS OF WORLD EXPERIENCE IN THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN TRAFFIC CONTROL SYSTEMS AT VARIOUS LEVELS

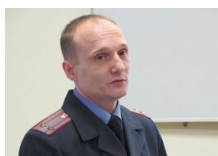
¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Russia

³Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia

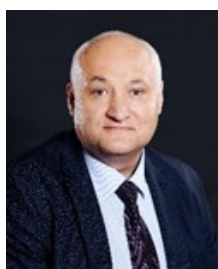
When operating automated traffic control systems and their transformation into intelligent transport systems, modern requirements are imposed on the overall parameter - safety, which characterizes the quality and efficiency of road traffic, especially when organizing high-speed loaded traffic of motor vehicles. The article discusses the use of various mathematical methods for these purposes when modeling transport processes and systems, including taking into account the development of artificial intelligence algorithms, so that when making decisions on traffic control, one can have reliable forecast indicators obtained from adequate models. A comparison of the models is made and recommendations are given on their applicability and the results obtained for traffic management purposes.

Keywords: intelligent transport systems, modeling, mathematical models, forecasting, artificial intelligence, traffic control



Навой Дмитрий Валерьевич, полковник милиции, начальник отдела дорожного движения главного управления ГАИ МВД, аспирант БНТУ. Основные научные направления: интеллектуальные транспортные системы; автоматизированных системы управления дорожным движением, алгоритмы управления и светофоре координированное регулирование, моделирование потоков.

E-mail: Nepei@mail.ru



Капский Денис Васильевич, доктор технических наук, доцент. Заместитель председателя ВАК Республики Беларусь. Проводит исследования в области организации движения, технических средств регулирования и информационно-алгоритмического обеспечения управления движением, транспортного планирования и математического моделирования процессов транспортных систем.

Kapski D.V., doctor of Science, Associate Professor. Deputy Chairman of the Higher Attestation Commission. Conducts research in the field of traffic management, technical means of regulation and information and algorithmic support for traffic control, transport planning and mathematical modeling of transport systems processes.

E-mail: d.kapsky@bntu.by



Филиппова Надежда Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильные перевозки» Московского государственного автомобильно-дорожного технического университета (МАДИ). Основные научные направления: интеллектуальные транспортные системы; развитие мультимодальной мобильности в условиях цифровой трансформации; транспортно-логистические центры на основе телекоммуникационной платформы; методы и средства автоматического контроля и мониторинга качества транспортных услуг и климатического воздействия на транспортную отрасль.

E-mail: filippova.n@s-vfu.ru, umen@bk.ru



Пугачев Игорь Николаевич, доктор технических наук, профессор, Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН). Основное направление научной деятельности связано с проблемными вопросами безопасности дорожного движения, эффективного развития автомобильной и дорожной составляющих транспортной системы России в условиях цифровизации, созданию интеллектуальных транспортных систем.

E-mail: i_pugachev@khfrc.ru