

Использование технологий машинного обучения для разработки оптимальных программ управления светофорными объектами

С.С. Панасенко, К.Н. Старков, Д.Д. Скоробогатченко

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: Одним из ключевых направлений развития интеллектуальных транспортных сетей (ИТС) является внедрение автоматизированных систем управления дорожным движением. В контексте этих систем особое внимание уделяется эффективному управлению светофорами, представляющими важный элемент автоматизированных систем управления дорожным движением. Статья посвящена разработке автоматизированной системы, направленной на составление оптимальной программы сигналов светофора на определенном участке дорожной сети. В качестве средства моделирования был выбран пакет моделирования трафика Simulation of Urban Mobility (SUMO), в качестве алгоритма оптимизации BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), в качестве метода машинного обучения использовался градиентный бустинг. Результаты практических исследований показывают, что разработанная система способна быстро и эффективно оптимизировать параметры фаз и длительности светофорных циклов, что значительно улучшает управление трафиком на соответствующем участке дорожной сети.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная сеть, управление трафиком, машинное обучение, пробка, светофор, фаза светофорного цикла, дорожный поток, моделирование дорожной сети, python, моделирование городской мобильности.

Согласно [1], водители в России проводят до 140 часов в год в пробках. В настоящее время индекс загруженности дорог в России достигает 61 % (см. рис. 1).

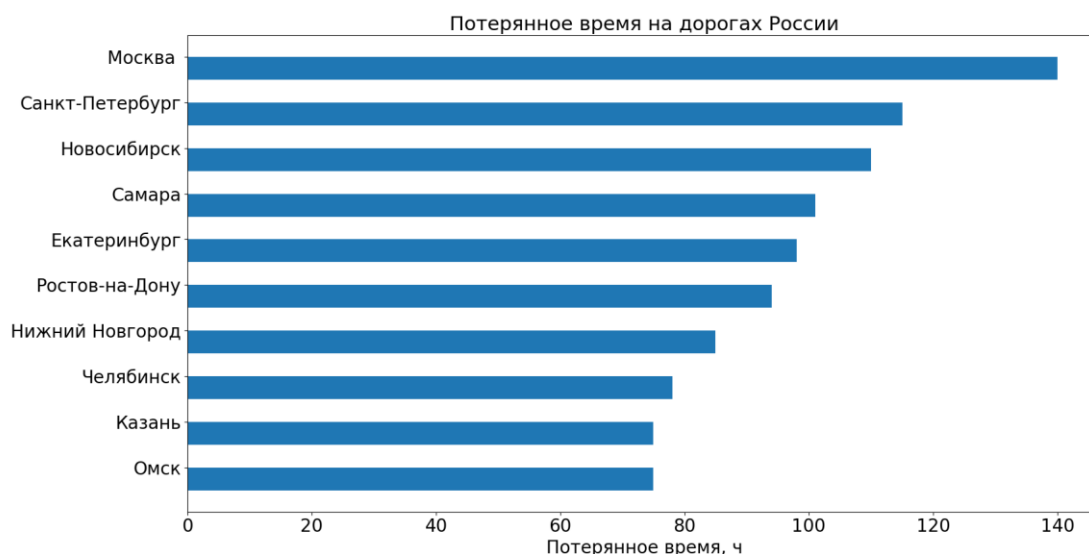


Рис. 1. – Потеря времени в пробках по городам России

Рост уровня автомобилизации требует соответствующего развития инфраструктуры в виде увеличения плотности сети автомобильных дорог, расширения парковочного пространства и совершенствования средств регулирования дорожного движения [2]

Низкая проходимость автомобильных дорог порождает ряд негативных последствий, включая нарушение функционирования экстренных служб, увеличение общего времени в пути и неспособность автомобилистов точно рассчитать время на маршруте. Это влечет за собой экономический ущерб, такой, как увеличение задержек, потери рабочего времени, повышение расхода топлива и износа автомобилей. Более того, данная ситуация сопровождается ростом числа дорожных происшествий, поскольку пробки вызывают дополнительное напряжение и стресс у водителей, а также сокращают безопасное расстояние между автомобилями [3].

Одним из эффективных способов снижения нагрузки на дорожную инфраструктуру в городской среде является внедрение адаптивных систем управления светофорами. Эти системы позволяют динамически реагировать на изменяющиеся условия на дороге, адаптируя время работы светофоров в реальном времени в зависимости от потока транспорта [4]. Однако данные разработки требуют наличия большого количества данных с датчиков, которые не всегда возможно получить [5, 6].

В связи с этим возникает необходимость разработки системы управления светофорами, способной функционировать без реальных данных, учитывая ограниченное пространство для строительства новых развязок и сложности в реконструкции существующей инфраструктуры, а также ограниченные ресурсы. Одним из лучших решений является использование имитационных моделей для предварительного анализа и оптимизации транспортного потока, что позволит улучшить дорожное движение на любом участке дороги, предоставленном системе [7].

Постановка задачи

В ряде случаев возможность установки датчиков и оборудования для реализации адаптивного управления сигналами светофоров существенно ограничена. Это вызывает необходимость разработки программ управления светофорами с жестко заданными параметрами, учитывающими особенности дорожного трафика. Эти программы могут быть оптимизированы на основе анализа трафикового потока и паттернов движения на конкретных перекрестках, чтобы минимизировать пробки и улучшить пропускную способность автомобильных дорог.

В связи с этим, целью данного исследования является разработка автоматизированной системы подбора оптимальных программ организации светофорных циклов, направленных на максимальное снижение загруженности дорожной инфраструктуры.

Материалы и методы

Работа основана на использовании комплекса мультиагентное моделирования с открытым кодом Simulation of Urban MObility (SUMO). Особенностью SUMO является возможность создания моделей "умных светофоров" в контролируемой виртуальной среде [8].

В качестве метода машинного обучения для подбора продолжительности фаз, авторами использовался градиентный бустинг [9]. С использованием бустинга разработана модель, позволяющая подбирать продолжительности и программы фаз, снижающие общие потери времени участников дорожного движения. Выбор градиентного бустинга обусловлен нелинейными зависимостями между переменными в исходных данных.

При реализации проекта использовалась библиотека SciPy в Python, которая предоставляет широкий набор функций для оптимизации. Одной из ключевых функций данной библиотеки, использованной в проекте является

`scipy.optimize.minimize`, которая применяется для численной минимизации (максимизации) скалярной функции с одной или несколькими переменными [10]. В контексте данного проекта библиотека используется для оптимизации параметров работы светофоров. Основной целью оптимизации является максимизация пропускной способности на участке дорожной сети. В качестве параметров оптимизации выступают фазы работы светофоров, включающие в себя их длительности и программы. Таким образом, с помощью этой функции исследуются различные варианты настройки светофоров с целью повышения эффективности движения транспорта.

Разработанная автоматизированная система оптимизации потоков на улично-дорожной сети города реализована в виде Python-приложения. Взаимодействие между модулями представлено на диаграмме потока данных в нотации DFD (см. рис. 2). Рассмотрим более подробно реализованные модули.

Основной модуль запуска последовательно инициирует все остальные модули приложения. Использование функции `random.seed()` позволяет внести элемент случайности в генерацию трафика для моделирования различных ситуаций в SUMO. Модуль моделирования использует инструменты SUMO для создания модели дорожной сети, которая является основой для дальнейших действия в приложении. Модуль управления файлами отвечает за подготовку и изменение файлов SUMO, а также за создание необходимых дополнительных файлов светофоров и результатов моделирования. Модуль машинного обучения используется для машинного обучения и прогнозирования интенсивности потока на участке дороги, основываясь на входных данных о программе сигналов светофора. Модуль оптимизации составляет оптимальную программу, опираясь на данные, полученные в результате моделирования дорожной сети. Данный модуль также включает в

себя использование модуля машинного обучения, о котором было написано ранее.

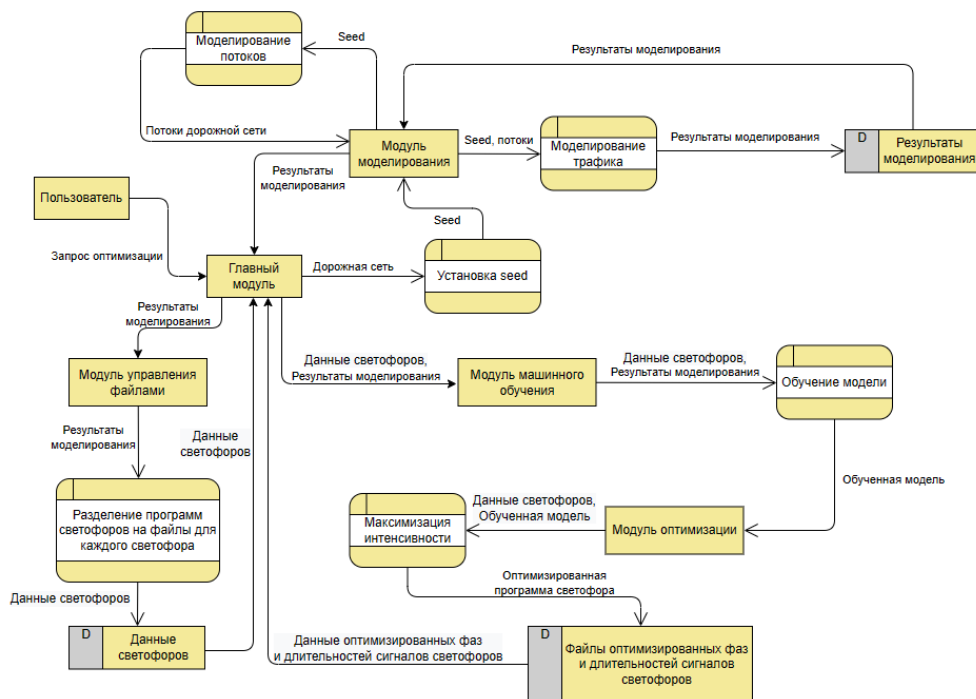


Рис. 2. – Диаграмма потока данных предлагаемой системы

Основной цикл программы включает в себя генерацию случайного трафика с разной скоростью прибытия, далее приложение запускает SUMO и процесс моделирования, затем производится сохранение выходных данных светофоров в временные файлы. На их основе формируются результаты моделирования, которые представляют собой данные о плотности и интенсивности на участке дороги. Далее происходит оптимизация циклов сигнала светофора, включающая подготовку данных (загрузку фаз светофоров и их длительностей из файлов), обучение модели интенсивности дорожного движения на основе предоставленных данных о фазах и их длительностях с использованием градиентного бустинга. В результате осуществляется поиск оптимального набора программ светофорных объектов и их длительностей с использованием метода minimize из библиотеки scipy.optimize. Оптимальный набор фаз и их длительности записываются в

дополнительный файл для SUMO, который содержит оптимизированные программы всех имеющихся на участке улично-дорожной сети светофоров.

Результаты

Для иллюстрации работы разработанного приложения был выбран участок улично-дорожной сети г. Волгограда (см. рис. 3). С помощью инструмента OpenStreetMap данный участок преобразован в поддерживаемую SUMO дорожную сеть.

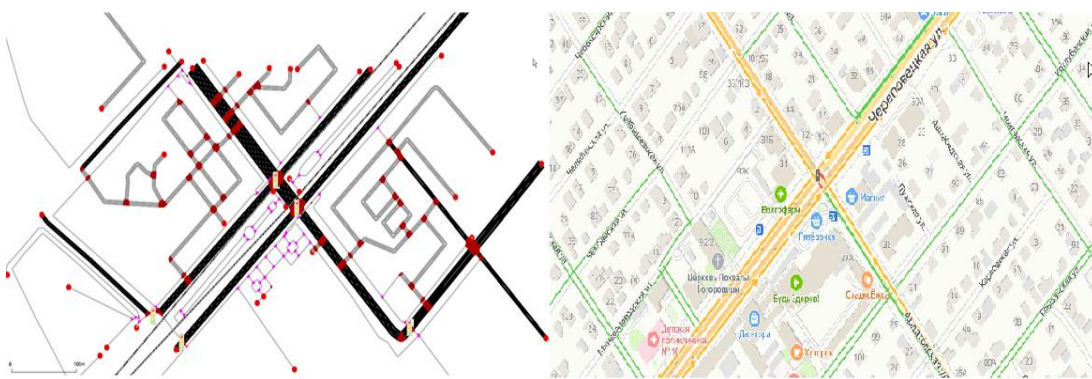


Рис. 3. – Расположение участка дорожной сети в Волгограде

Для получения данных с целью обучения модели в программе смоделировано заданное количество дорожных сценариев, с различными параметрами трафика. В результате собраны данные для обучения модели.

Далее, используя полученные данные, была обучена модель, и на ее основе получены оптимальные программы работы светофорных объектов на рассматриваемом участке улично-дорожной сети. Полученные оптимизированные программы записаны в дополнительный файл для SUMO в виде программ работы каждого из светофоров на рассматриваемом участке дороги. Пример полученного файла приведен на рисунке 4.

Эффективность работы разработанной системы определялась путем сравнения характеристик транспортного потока при работе существующих адаптивных светофоров с характеристиками, полученными при управлении

трафиком на основе оптимизированных программ, разработанных с использованием разработанной системы.

```
1 <?xml version="1.0" ?>
2 <additional xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:noNamespaceSche
3 <tllogic id="3718974586" programID="my_program" offset="0" type="static">
486 <tllogic id="419861252" programID="my_program" offset="0" type="static">
487 <param key="max-gap" value="3.0"/>
488 <param key="detector-gap" value="2.0"/>
489 <param key="vTypes" value="" />
490 <param key="show-detectors" value="false"/>
491 <param key="file" value="NULL"/>
492 <param key="freq" value="500"/>
493 <phase duration="7.00" state="rrrrrrGGggGGGG" minDur="5" maxDur="50"/>
494 <phase duration="4.00" state="rrrrrryyyyyyyy" minDur="5" maxDur="50"/>
495 <phase duration="7.00" state="GGGGGrrrrrrrrrr" minDur="5" maxDur="50"/>
496 <phase duration="4.00" state="yyyyyyrrrrrrrrrr" minDur="5" maxDur="50"/>
497 <phase duration="7.00" state="rrrrrrGGggGGGG" minDur="5" maxDur="50"/>
498 <phase duration="4.00" state="rrrrrryyyyyyyy" minDur="5" maxDur="50"/>
499 <phase duration="7.00" state="GGGGGrrrrrrrrrr" minDur="5" maxDur="50"/>
500 <phase duration="4.00" state="yyyyyyrrrrrrrrrr" minDur="5" maxDur="50"/>
501 <phase duration="7.00" state="rrrrrrGGggGGGG" minDur="5" maxDur="50"/>
502 <phase duration="4.00" state="rrrrrryyyyyyyy" minDur="5" maxDur="50"/>
503 <phase duration="7.00" state="GGGGGrrrrrrrrrr" minDur="5" maxDur="50"/>
504 <phase duration="4.00" state="yyyyyyrrrrrrrrrr" minDur="5" maxDur="50"/>
505 <phase duration="14.00" state="rrrrrrGGggGGGG" minDur="5" maxDur="50"/>
506 <phase duration="4.00" state="rrrrrryyyyyyyy" minDur="5" maxDur="50"/>
507 <phase duration="7.00" state="GGGGGrrrrrrrrrr" minDur="5" maxDur="50"/>
508 <phase duration="4.00" state="yyyyyyrrrrrrrrrr" minDur="5" maxDur="50"/>
509 <phase duration="14.00" state="rrrrrrGGggGGGG" minDur="5" maxDur="50"/>
510 <phase duration="4.00" state="rrrrrryyyyyyyy" minDur="5" maxDur="50"/>
```

Рис. 4. – Дополнительный файл с программами светофоров

На рисунке 5 представлены результаты этого сравнения по 50 различным сценариям, где для одинаковой плотности транспортного потока показана интенсивность движения (количество транспортных средств, проходящих через поперечное сечение дороги в определенном направлении или направлениях за единицу времени) при работе адаптивных и оптимизированных программ светофоров.

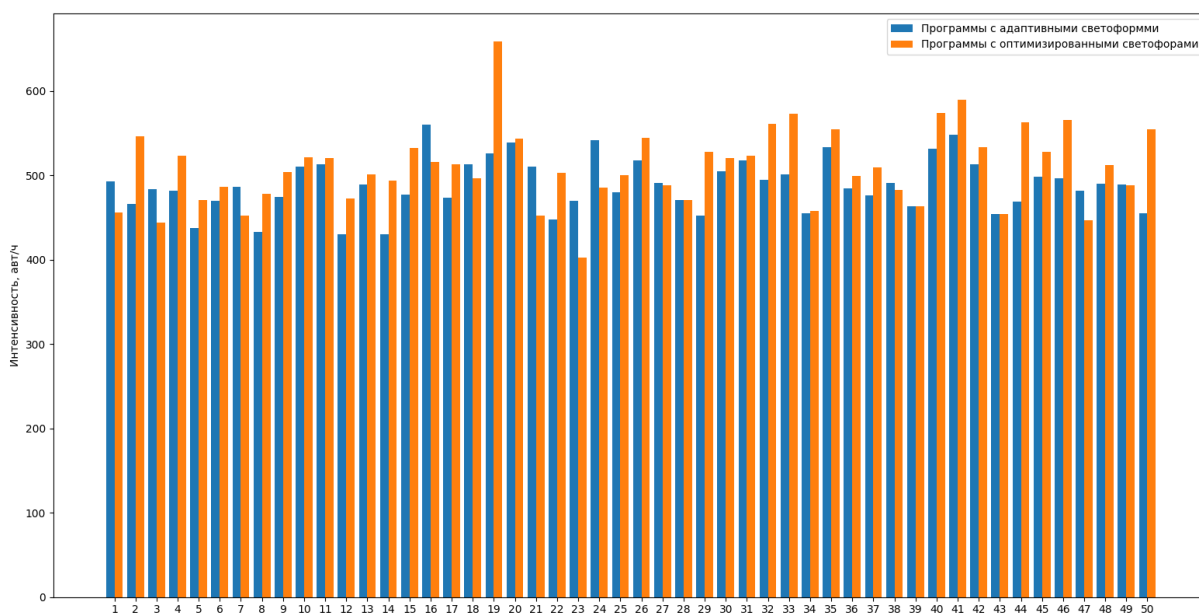


Рисунок 5. – Результаты моделирования эффективности функционирования участка дорожной сети

Таким образом, данный график демонстрирует, что разработанная система управления дорожным движением обеспечивает уровень эффективности, сопоставимый с адаптивными системами.

Заключение

Авторами предложена система оптимизации светофорных циклов улично-дорожной сети города. Разработанное приложение позволяет подобрать набор программ работы светофорных объектов, снижающих уровень загрузки транспортной инфраструктуры. При этом разработанная система позволяет обойтись без дополнительных затрат на установку датчиков или других необходимых инструментов для адаптивных светофоров. Результаты работы программы, позволяют пользователям системы принимать обоснованные решения по управлению транспортными потоками.

Литература

1. Рейтинг городов с самыми большими пробками 2023: топы по миру и в России // Рейтинги и новости URL: top-rf.ru/avto/558-rejting-gorodov-ro-probkam.html (дата обращения: 20.04.2024).
2. Скоробогатченко, Д. А. Моделирование адаптивных систем управления городским трафиком // Системный анализ в науке и образовании. 2022. № 2. С. 1-10.
3. Сербиновский Б.Ю., Чефранова О.В. Контроллинг в реализации политики и стратегии развития транспортно-дорожного комплекса (часть 1) // Инженерный вестник Дона, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/774.
4. Технологии для управления дорожным движением: роль искусственного интеллекта // АПНИ. URL: apni.ru/article/7761-tekhnologii-dlya-upravleniya-dorozhnim-dvizh (дата обращения: 20.04.2024).

5. Ossama Y., Nader M. Employing Cyber-Physical Systems: Dynamic Traffic Light Control at Road Intersections // IEEE Internet of Things Journal. 2017. V. 4. No. 6. pp. 2286-2296.

6. Swapnil M. S. Adaptive traffic light control system // International Conference on Intelligent Systems and Information Management (ICISIM). 2017. pp. 300-306.

7. Быков Д.В., Лихачёв Д.В. Имитационное моделирование как средство модернизации участка транспортной сети // Инженерный вестник Дона, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2388.

8. Aditya F, Nasution S, Virgono A Traffic Flow Prediction using SUMO Application with K-Nearest Neighbor (KNN) Method // International Journal of Integrated Engineering. 2020. V. 12. No.7. pp. 98-103.

9. Ritha N., Huixia L., Qiming D., Theogene H., François N. Automatic pavement damage predictions using various machine learning algorithms: Evaluation and comparison // Results in Engineering. 2022. V. 16. P. 100567.

10. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., Burovski E., Peterson P., Weckesser W., Bright J., Walt S.J., Brett M., Wilson J., Millman K.J., Mayorov N., Jones E., Kern R., Larson E., Carey C.J., Polat I., Feng Y., Moore E.W., VanderPlas J., Laxalde D., Perktold J., Cimrman R., Henriksen I. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. V. 17. pp. 261-272.

References

1. Рейтинг городов с самыми большими пробками 2023: топы по миру и в России. Рейтинги и новости [The rating of cities with the biggest traffic jams in 2023: tops around the world and in Russia. Ratings and news]. URL: top-rf.ru/avto/558-rejting-gorodov-po-probkam.html (accessed 20/04/24).

2. Skorobogatchenko, D. A. Sistemnyy analiz v nauke i obrazovanii, 2022. № 2. pp. 1-10.

3. Serbinovskiy B.Yu., Chefranova O.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/774.

4. Tekhnologii dlya upravleniya dorozhnym dvizheniem: rol' iskusstvennogo intellekta. APNI [Technologies for traffic management: the role of artificial intelligence. APNI]. URL: apni.ru/article/7761-tekhnologii-dlya-upravleniya-dorozhnim-dvizh (accessed 20/04/24).

5. Ossama Y., Nader M. IEEE Internet of Things Journal. 2017. V. 4. № 6. pp. 2286-2296.

6. Swapnil M. S. International Conference on Intelligent Systems and Information Management (ICISIM). 2017. pp. 300-306.

7. Bykov D.V., Likhachev D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2388.

8. Aditya F, Nasution S, Virgono A International Journal of Integrated Engineering. 2020. V. 12. №7. pp. 98-103.

9. Ritha N., Huixia L., Qiming D., Theogene H., François N. Results in Engineering. 2022. V. 16. P. 100567.

10. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., Haberland M., Reddy T., Cournapeau D., Burovski E., Peterson P., Weckesser W., Bright J., Walt S.J., Brett M., Wilson J., Millman K.J., Mayorov N., Jones E., Kern R., Larson E., Carey C.J., Polat I., Feng Y., Moore E.W., VanderPlas J., Laxalde D., Perktold J., Cimrman R., Henriksen I. Nature Methods. 2020. V. 17. pp. 261-272.

Дата поступления: 21.04.2024

Дата публикации: 5.06.2024