Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» https://resources.today
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 1 / 2025, Vol. 12, Iss. 1 https://resources.today/issue-1-2025.html

URL статьи: https://resources.today/PDF/04INOR125.pdf

DOI: 10.15862/04INOR125 (https://doi.org/10.15862/04INOR125)

2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Пелих, Д. А. Проектирование имитационной модели управления дорожным трафиком / Д. А. Пелих // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 1. — URL: https://resources.today/PDF/04INOR125.pdf.
DOI: 10.15862/04INOR125.

For citation:
Pelikh D.A. Designing a simulation model for traffic management. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(1): 04INOR125. Available at: https://resources.today/PDF/04INOR125.pdf.
DOI: 10.15862/04INOR125. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 681.3

Пелих Дмитрий Александрович
ФГБОУ ВО «Санкт-петербургский государственный университет телекоммуникаций», Санкт-Петербург, Россия
Аспирант, ассистент кафедры «Информационно-управляющих систем»
E-mail: elektronstandart@bk.ru

Проектирование имитационной модели управления дорожным трафиком

Аннотация. В статье описаны проблемы транспортной инфраструктуры растущих мегаполисов. Обоснована важность эффективных средств обеспечения пассажиропотока. Представлены методы увеличения пропускной способности городской дорожной сети. Описаны принципы функционирования проектируемой системы управления дорожным трафиком. Предложен объект управления в виде длительности фаз светофоров. Обоснована необходимость применения в системе модуля имитационного моделирования для количественной оценки реакции дорожной среды на изменение длительности фаз, рекомендуемых модулем принятия решений. Определены функциональные требования и требования по составу объектов дорожного движения и транспортной инфраструктуры к имитационной модели данной системы. Приведён пример имитационной модели участка дорожного движения, реализованный в среде AnyLogic. Описаны сложности построения моделей больших систем. Приведена логическая схема перекрёстка. Представлены сложности перехода к масштабированию модели до объёма всего города и обоснована необходимость проектирования на первоначальном этапе прототипа модели. Приведены варианты конфигураций проектируемой дорожной модели. Описаны и представлены схемы монолитной и инкрементной конфигураций этой модели. Представлены их основные преимущества и недостатки. Обоснована необходимость оценки влияния на эффективность управления трафиком упрощения модели ввиду отсечения от неё важных магистралей. Предложен метод такой оценки посредством расширенного объектно-ориентированного моделирования. В качестве примера приведены схемы участков и построены их объектно-ориентированные модели. Рассчитаны математические ожидания времени прохождения автомобилем представленных участков. Приведены выводы и результаты исследования.

Ключевые слова: имитационное моделирование; оптимизация; дорожный трафик; длительность фаз светофора; магистраль; AnyLogic

Введение

Развитие городов способствует увеличению числа жителей, что в свою очередь приводит к необходимости решения логистических задач. Проблемы транспортной инфраструктуры растущих мегаполисов представлены в [1; 2]. При этом строительство новых дорог, развязок и скоростных магистралей способствует уменьшению заторов и увеличению пропускной способности только в краткосрочной перспективе. Исследования, описанные в [3] показали, что такие меры приводят к увеличению автомобилизации города, что в свою очередь ведёт к возникновению заторов уже в больших масштабах. Корни данной проблемы во многом кроются в габаритах автомобиля, частное транспортное средство занимает слишком много площади дорожного полотна и обладает крайне низкой (по сравнению с общественным транспортом) пропускной способностью. Примером пути такого проектирования транспортной инфраструктуры может служить Лос-Анджелес (рис. 1), где ввиду наличия большого количества широких дорог и развязок отсутствует возможность построения удобных пешеходных маршрутов, что в свою очередь приводит к замедлению развития общественного транспорта, так как им неудобно пользоваться. Таким образом в городе не остаётся эффективных средств обеспечения пассажиропотока, что и обеспечивает заторы на дорогах.

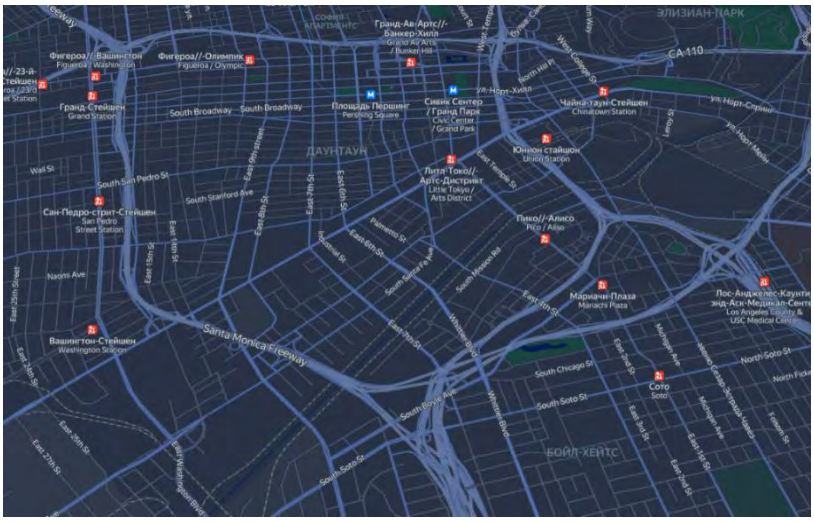

Рисунок 1. *Карта Лос-Анджелеса, район Даунтаун [4]*

Однако помимо развития общественного транспорта, обустройства пешеходных зон, строительства новых дорог и развязок, есть и другие методы увеличения пропускной способности городской дорожной сети:

1.1) ограничение скоростного режима и более жесткий контроль правил дорожного движения;

1.2) проектирование безопасной дорожной инфраструктуры;

1.3) быстрое реагирование на дорожно-транспортные происшествия.

ДТП вносят существенный вклад в возникновение непериодических заторов, а п. 1.1–1.3 способствуют минимизации аварий на дорогах или увеличению скорости устранения последствий.

2. Установка средств регулирования в местах, где они будут наиболее полезны.

3. Эффективное управление дорожным трафиком, в частности, посредством оптимизации длительности фаз светофоров. Этот подход и рассматривается в дальнейшей работе.

Основная часть

В исследованиях [4–7] представлены подходы решения задач управления транспортом. Данная работа основывается на исследованиях, проведённых в [8–10].

Функционирование системы основано на взаимодействии модулей обработки данных, имитационного моделирования, принятия решений, нейросетевого анализа и взаимодействия оператора.

Модуль имитационного моделирования в данном случае необходим для просчёта реакции среды на изменение длительности фаз [11], рекомендуемых модулем принятия решений.

Это нужно для оценки изменения дорожной ситуации, выраженной в виде количества заторов (а точнее количества автомобилей, движущихся медленнее порогового значения скорости). Пример построения такой модели приведён в [12].

Определение требований к имитационной модели

Для корректной работы системы к имитационной модели применяется ряд требований.

Функциональные требования:

1. Возможность моделирования дорожной ситуации через заданный промежуток времени.
2. Визуализация. Модель должна быть нанесена на карту с возможностью масштабирования и присутствия на ней динамической картины трафика. Это необходимо для оценки оператором системы дорожной ситуации после внедрения новых комбинаций длительностей фаз.
3. Построение логической схемы дорожного движения.
4. Указание расписания появления автомобилей в определенных участках модели.
5. Указание вероятностей поворота автомобилей на светофорах (для каждого из направлений).
6. Указание длительностей фаз светофоров (при наличии и для отдельных полос).
7. Сбор данных о местонахождении автомобилей в определенный момент времени.
8. Статистика и наглядная визуализация заторов.

Требования по составу объектов дорожного движения и транспортной инфраструктуры:

1. Дорожное полотно с определённым количеством полос в обоих направлениях.
2. Светофоры.
3. Автомобили.
4. Маршруты общественного транспорта.
5. Пешеходные переходы.
6. Другие элементы транспортной инфраструктуры.

Пример имитационной модели участка дорожного движения, реализованный в среде AnyLogic, приведён на рисунке 2.

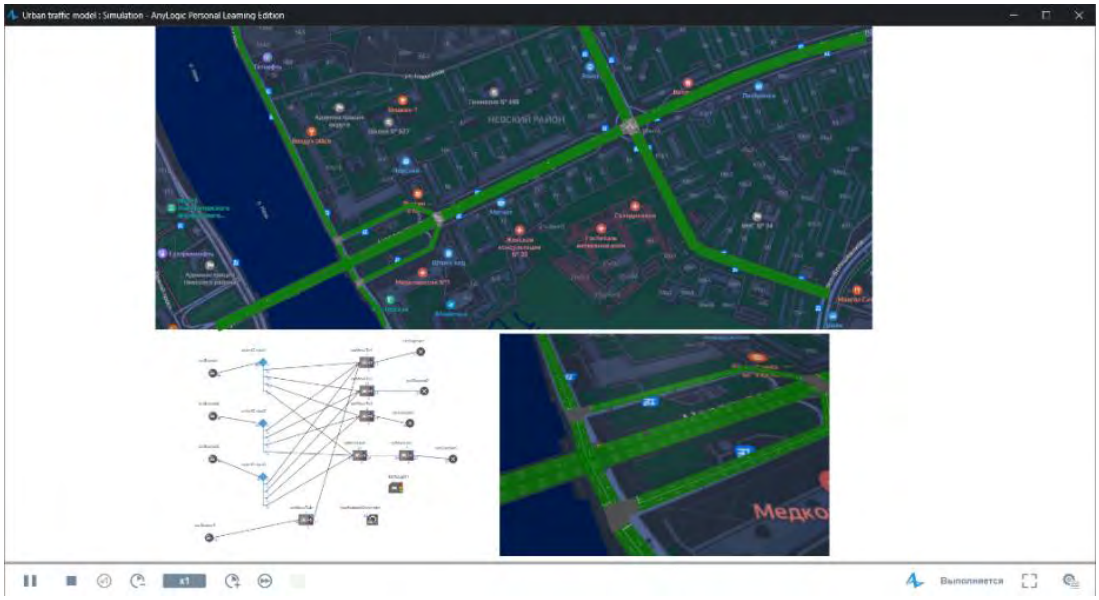

Рисунок 2. *Пример имитационной модели участка дорожного движения [6]*

Сложности построения моделей больших систем

Проектирование настолько больших систем сопряжено с рядом сложностей, в частности, на рисунке 2 приведена модель лишь участка дороги, а на рисунке 3 представлена логическая схема лишь одного перекрёстка. Проблема в том, что в городе обычно больше одного перекрёстка, и сложность схемы, формализующей движение автомобилей, резко возрастает с увеличением количества комбинаций поворотов.

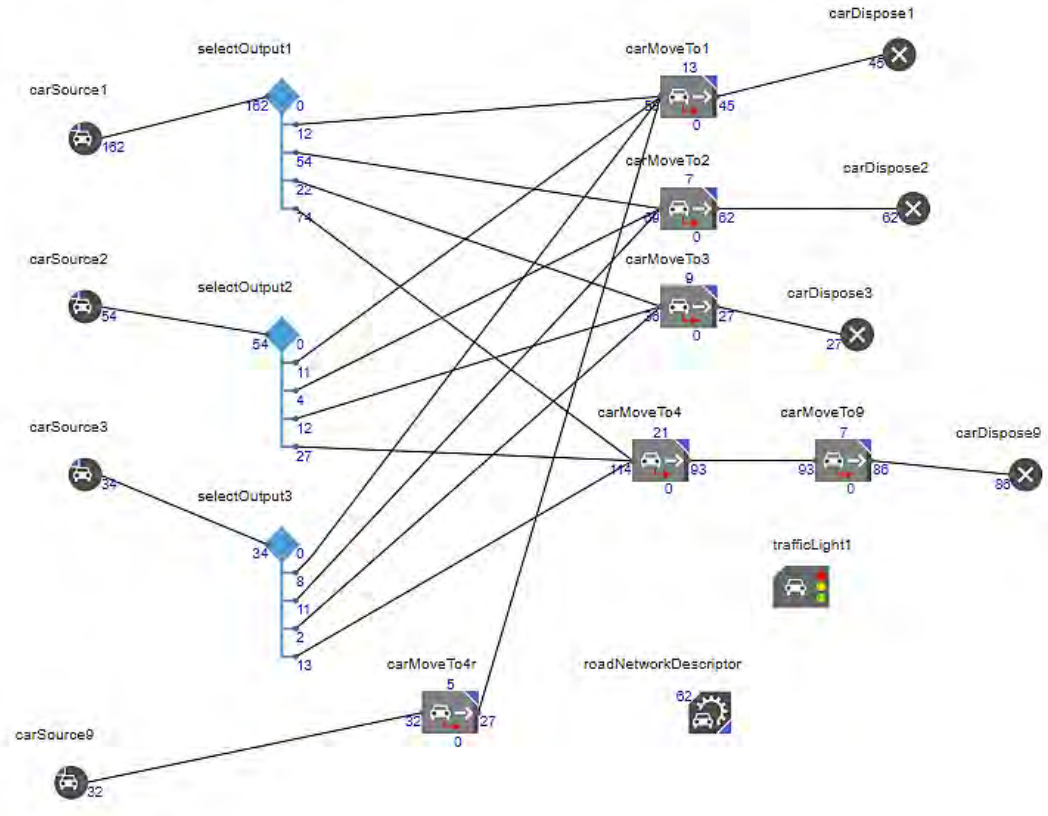

Рисунок 3 *Логическая схема перекрёстка [6]*

Переход к масштабированию модели до объёма всего города стоит большого количества человеческих ресурсов и времени, при этом нет гарантии, что разработанная система окажется жизнеспособной. Поэтому стоит рассмотреть проектирование прототипа модели, который будет простым в реализации, но при этом не перестанет отражать картину управления трафиком.

Выбор конфигурации проектируемой дорожной модели

Для упрощения процесса создания прототипа можно временно отказаться от некоторых требований к имитационной модели, например, маршрутов общественного транспорта, пешеходных переходов и других элементов транспортной инфраструктуры, однако это не спасёт ситуацию. Необходимо понимание конфигурации самой модели. Первым вариантом решения проблемы является монолитная конфигурация (рис. 4), представляющая собой упрощённую модель дорожной сети всего города.

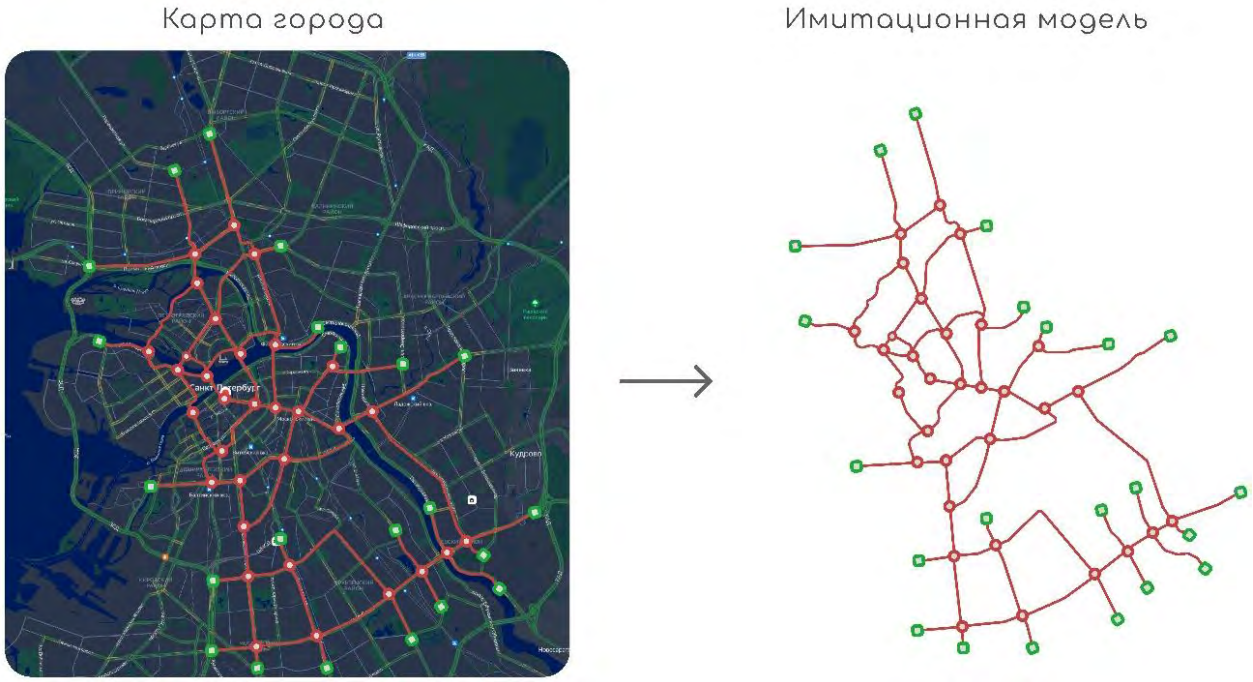

Рисунок 4 *Монолитная конфигурация проектируемой дорожной модели (разработано автором)*

На рисунке 4 красными линиями отмечены моделируемые дороги города Санкт-Петербурга, красными точками — регулируемые перекрестки (на которых и планируется управлять длительностями фаз светофоров), а зелеными квадратами — места появления и убытия автомобилей (конечные точки) на границах данной модели.

Важнейшим минусом такой конфигурации является её монструозность. Всё ещё сохраняется проблема громоздкости логической схемы дорожного движения, а также может просто не хватить отведенного средой имитационного моделирования пространства для этой схемы. Второй минус — это возможность некорректной оценки дорожной ситуации ввиду отсечения от модели важных магистралей. Однако у такого подхода есть и плюсы: возможность быстрого перехода к большим масштабам и визуализация модели всего города целиком.

Второй вариант — инкрементная (рис. 5), где дорожная сеть города разбита на несколько независимых локальных моделей, объединённых посредством передачи данных о количестве въезжающих и выезжающих из конечных точек транспортных средств.

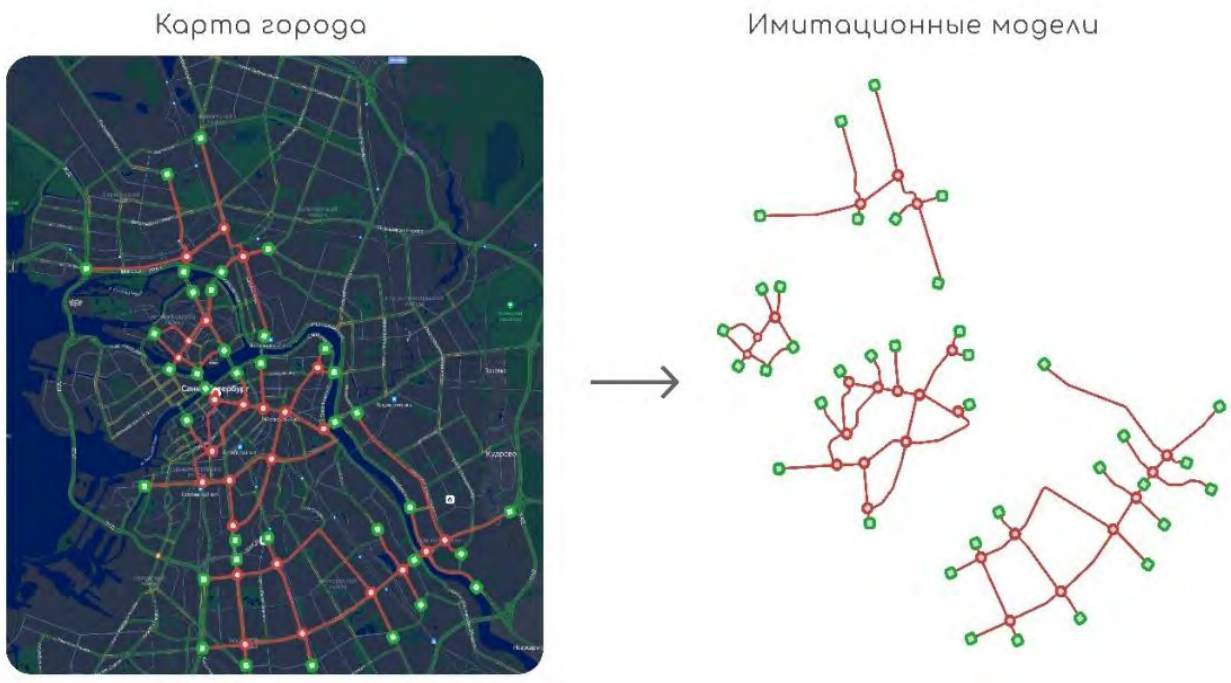

Рисунок 5. *Инкрементная конфигурация проектируемой дорожной модели (разработано автором)*

Преимуществом такой конфигурации является избавление от проблемы монструозности единой схемы управления, а также появляется возможность моделирования малыми силами участка дорожной сети для тестирования работы системы.

Оценка влияния на эффективность управления трафиком

Также упростить модель можно путём отсечения от неё некоторых магистралей и перекрёстков. Оценку влияния на эффективность управления трафиком такого изменения модели можно проводить с помощью расширенных объектно-ориентированных моделей [13]. В соответствии со стохастическим характером временных свойств прохождения автомобилем участка дорожного движения основным показателем качества выбирается математическое ожидание. На рисунках 6 и 7 приведены участки дорожной модели, на которых и предлагается провести такую оценку.

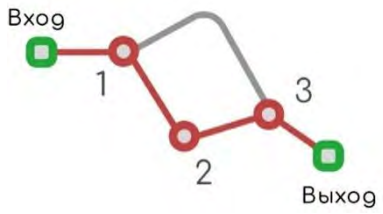

Рисунок 6. *Первый участок дорожной модели (разработано автором)*

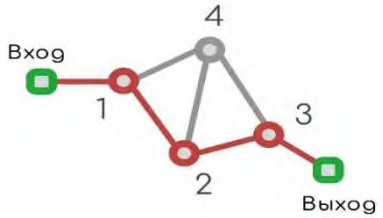

Рисунок 7. *Второй участок дорожной модели (разработано автором)*

При такой схеме (если не учитывать перекресток 4 на втором участке) количество автомобилей, выезжающих с перекрестка 1 равно количеству автомобилей, заезжающих на перекресток 2.

Построенная объектно-ориентированная модель первого участка приведена на рисунке 8, на рисунке 9 — она же, но с дополнительной связью между 1 и 3 перекрёстками, на рисунке 10 второго — участка.

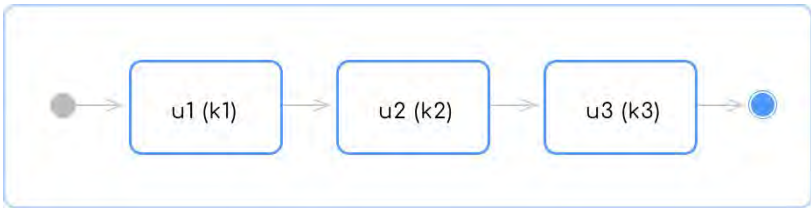

Рисунок 8. *Объектно-ориентированная модель первого участка (разработано автором)*

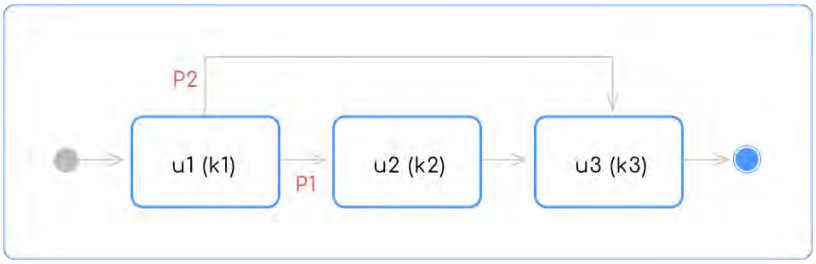

Рисунок 9. *Объектно-ориентированная модель первого участка с дополнительной связью между 1 и 3 перекрёстками (разработано автором)*

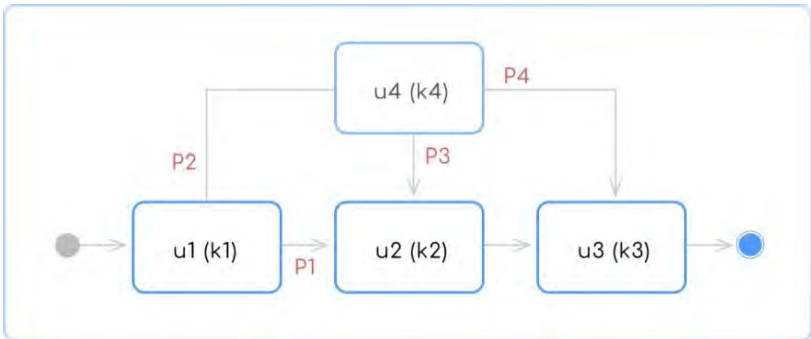

Рисунок 10. *Объектно-ориентированная модель второго участка (разработано автором)*

где:

$u_1(k_1)$ — плотность распределения вероятностей времени прохождения автомобилем первого светофора;

$u_2(k_2)$ — плотность распределения вероятностей времени прохождения автомобилем второго светофора;

$u_3(k_4)$ — плотность распределения вероятностей времени прохождения автомобилем третьего светофора;

$u_4(k_4)$ — плотность распределения вероятностей времени прохождения автомобилем четвертого светофора;

$P1$, $P2$, $P3$, $P4$, — вероятности поворота автомобиля на соответствующие направления. Оценить эти вероятности в перспективе можно путем нормализации усреднённого за определённый промежуток времени количества проезжающих перекресток автомобилей на основе реального массива данных о дорожном движении на выбранном участке.

Для анализа построенных моделей в целях нахождения зависимостей математических ожиданий времени прохождения автомобилем участка дороги выбирается метод свёртки. При реализации метода свёртки выделяются два типовых фрагмента: свёртка альтернативных процессов и свёртка цикла. Применяются правила преобразования альтернативных процессов и цикла [14]. Для упрощения расчётов примем вероятности поворотов автомобилей на любое из направлений на перекрёстке равными. При таком подходе математическое ожидание времени прохождения автомобилем первого участка будет составлять 1,3333, первого участка с дополнительной связью между 1 и 3 перекрёстками — 1,3636, второго участка — 1,6857.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что упрощение модели путём отсечения от неё важных магистралей и перекрестков приведёт к некорректной оценке самого трафика. Однако, если вероятность поворота на такую транспортную линию будет стремиться к нулю, погрешность также будет минимальной. Соответственно, с целью упрощения имитационной модели можно выбрать пороговое значение такой вероятности, которое и позволит исключить наименее значимые участки.

Заключение

В рамках представленной работы рассмотрены проблемы построения имитационной модели управления дорожным трафиком метода и возможные её конфигурации. Предложен метод оценки влияния на эффективность управления. Получены математические ожидания времени прохождения автомобилем участков дорожного движения.

Приведённых выше формализаций недостаточно для конкретной оценки влияния на эффективность управления трафиком, однако они могут быть использованы с этой целью при дальнейшем проектировании имитационной модели управления дорожным трафиком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Миронова А.В. Транспортная проблема и ее решение в мегаполисах — на примере Москвы и Нью-йорка: сравнительный анализ // Вестник РУДН, серия История России, 2015, № 1. С. 91–101.
2. Adeoye Olugbenga Adewolu Infrastructure Growth And Sustainable Development: Review Of Lagos City Profile // International Journal of Engineering Inventionse. 2023. Volume 12, Issue 5. P. 253–276.
3. Литвинов А.В., Донченко В.В. Взаимосвязь между уровнем автомобилизации населения и долей передвижений на легковых автомобилях в городах // International Journal of Advanced Studies, 2020. Vol. 10, No 3, 2020. P. 64–82. DOI: 10.12731/2227-930X-2020-3-64-82.
4. Сое Мое Аунг, С.А. Лупин, Д.А. Федяшин, Ба Хла Тхан Использование параллельных вычислений в интеллектуальной системе управления транспортными сетями // International Journal of Open Information Technologies. 2017. Vol. 5, no. 2. 2017. С. 9–13.
5. Dingyuan Fan, Fei Yang, Jinghao Ji and Zexi Zhang Research on Railway Passenger Volume Forecast Based on the Spline Interpolation and IPSO-Gradient Difference Acceleration Rule // Hindawi. Journal of Advanced Transportation. 2023. Volume 2023. P. 87–95.
6. Shuai Liu, Lin Liu, Dongmei Pei, Jue Wang. Bi-objective bus scheduling optimization with passenger perception in mind // Nature Portfolio. Scientifc Reports. 2023. № 13. P. 76–82.

7. Zhang, W.; Song, Y.; Zhou, G.; Song, Z.; Xi, C. Multiobjective-Based Decision-Making for the Optimization of an Urban Passenger Traffic System Structure // Sustainability. 2023. № 15. P. 10–19.

8. Бондаренко И.Б., Литвинов В.Л., Пелих Д.А., Рожкова Д.А., Филиппов Ф.В. Designing the Architecture of a Multi-agent CityManagement System Using AdvancedObject-Oriented Modeling // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Digital and Information Technologies in Economics and Management" (DITEM2023). 2023. № 21–23. P. 106–117. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-55349-3_9.

9. Бондаренко И.Б., Пелих Д.А. Мультиагентное планирование в управлении городской инфраструктурой // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2023). Всероссийская научно-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. Сборник лучших докладов: в 2 т. Т. 1.; под ред. Н.Н. Иванов. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2023. С. 365–368. URL: http://pkm.sut.ru/documents/Сборник%20лучших%20докладов%20конференции%20ПКМ-2023%20Том%201.pdf.

10. Пелих Д.А. Имитационная модель агентного управления дорожным трафиком // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / Под ред. Рабина А.В.; СПб.: СПбГУТ, 2024. С. 808–812. URL: https://apino.sut.ru/media/pages/works/2024/8dc46ebeff-1734102838/apino_2024_4tom_27_09.pdf.

11. Шепелев В.Д., Альметова З.В., Моор А.Д., Берстенева В.И. Оптимизация работы адаптивных светофоров на основе использования машинного зрения. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2020. Т. 14, № 1. С. 189–196.

12. Xinguang Li, Jun Zhan, Fuquan Pan, Tong Lv, Shen Wang A multi-objective optimization model of urban passenger transportation structure under low-carbon orientation considering participating subjects // Springer Nature. Environmental Science and Pollution Research. 2023. № 56. P. 16–23.

13. Ptitsyna, L.K., Zharanova, A.O., Ptitsyn, N.A., Belov, M.P.: Extended Object-Oriented Modeling of Intelligent Information Agent Planners. Proceedings of 2022 25th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2022, P. 60–63.

14. Птицына Л.К., Смирнов Н.Г. Системно-аналитическая основа интеграции сервисориентированных средств // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 5. С. 31–36.

Pelikh Dmitry Alexandrovich
Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia
E-mail: elektronstandart@bk.ru

Designing a simulation model for traffic management

Abstract. The article describes the problems of the transport infrastructure of growing megacities. The importance of effective means of ensuring passenger traffic is substantiated. Methods of increasing the capacity of the urban road network are presented. The principles of functioning of the projected traffic management system are described. A control object is proposed in the form of the duration of the phases of traffic lights. The necessity of using a simulation module in the system to quantify the reaction of the road environment to changes in the duration of the phases recommended by the decision-making module is substantiated. The functional requirements and requirements for the composition of traffic facilities and transport infrastructure for the simulation model of this system are defined. An example of a traffic section simulation model implemented in the AnyLogic environment is given. The difficulties of building models of large systems are described. A logical diagram of the intersection is shown. The difficulties of the transition to scaling the model to the volume of the entire city are presented and the need for design at the initial stage of the prototype model is justified. The configuration options of the projected road model are given. The monolithic and incremental configurations of this model are described and presented. Their main advantages and disadvantages are presented. The necessity of assessing the impact of simplification of the model on the effectiveness of traffic management due to the cutting off of important highways from it is substantiated. A method for such an assessment through advanced object-oriented modeling is proposed. The diagrams of the sites are given as an example and their object-oriented models are constructed. The mathematical expectations of the passage time of the car of the presented sections are calculated. The conclusions and results of the study are presented.

Keywords: simulation modeling; optimization; road traffic; duration of traffic light phases; highway; AnyLogic