

Применение средств визуализации для задач оптимизации транспортной модели

Р.Б. Адаев¹, О.А. Ветрова²

РГУ им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-9323-8231, adaevrb@yandex.ru

² ORCID: 0000-0001-6935-0787, ve-olga@rambler.ru

Аннотация

Статья посвящена задаче, в которой объединяются проблемы имитационного моделирования транспортной системы и вопросы визуализации результатов оптимизационного эксперимента. Имитационные модели широко распространены в логистике и цепочках поставок, здравоохранении, транспорте, в управлении складами и перевозками, финансами, бизнес-процессами, сервисными системами, железными дорогами, в стратегическом планировании и менеджменте. В статье обсуждается решение задачи оптимизации управления перекрёстком дорог транспортной сети мегаполиса с помощью одного из инструментов имитационного моделирования AnyLogic. В среде разработки AnyLogic используется объектно-ориентированный подход, который помогает в организации и представлении сложных систем. Встроенные средства анимации позволяют легко визуализировать имитационную модель, а также интерпретировать поведение сложных систем. В статье описан процесс визуализации построения перекрёстка и решения задачи расчёта оптимальной продолжительности фаз светофора при помощи оптимизационного эксперимента.

Ключевые слова: Визуализация эксперимента, имитационное моделирование, транспорт, транспортная система, инструмент имитационного моделирования, перекрёсток, дорога, светофор, оптимальная продолжительность, оптимизационный эксперимент.

1. Введение

В настоящее время неотъемлемой частью исследований является цифровое моделирование изучаемых объектов. Здесь моделирование есть метод исследования объектов познания с помощью их математического описания, способ построения и изучения реально существующих явлений и концентрируемых объектов на базе математических формул. Его можно отнести к одному из общенаучных методов познания, наравне с наблюдением, измерением, экспериментом и сравнением.

Зачастую для решения практических задач строятся имитационные модели [1-6]. Построение различных моделей применяется в ситуациях, когда осуществление экспериментов с реальными системами невозможно или неразумно, например, из-за длительности осуществления эксперимента в полном масштабе времени или высокой себестоимости [1-7].

Моделирование заключается в разработке и выполнении на компьютере программной системы, отражающей структуру и функционирование моделируемого объекта или явления во времени [6-9].

Под моделированием какой-либо системы обычно понимается воспроизведение и исследование другого объекта, подобного оригиналу, в форме, удобной для исследования, и перенос полученных сведений на моделируемый объект.

Существует несколько методов имитационного моделирования: метод системной динамики; дискретно-событийный метод; агентный метод моделирования.

Под методом системной динамики понимают моделирование, использующееся для создания точных компьютерных моделей сложных систем с целью проектирования более эффективной организации и политики взаимоотношений с данной системой [10].

Системно-динамические модели используются в долгосрочных, стратегических моделях и принимают высокий уровень абстракции. Люди, продукты, события и другие дискретные элементы представляются в моделях системной динамики не как отдельные элементы, а как система в целом.

Если же отдельные элементы модели важны, то для полной или частичной обработки модели используется агентный или дискретно-событийный метод моделирования.

Дискретно-событийный метод (процессно-ориентированный) позволяет абстрагироваться от непрерывной природы явлений и рассматривать только некоторые «важные моменты» («события») в жизни моделируемой системы. Подход к построению имитационных моделей, предлагающий аппроксимировать реальные процессы такими событиями, и называется «дискретно-событийным» моделированием.

В этом методе функционирование системы представляется как хронологическая последовательность событий. Событие происходит в определенный момент времени и знаменует собой изменение состояния системы. С помощью этого метода можно исследовать системы массового обслуживания [10].

Метод агентного моделирования исследует поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом. В отличие от системной динамики аналитик определяет поведение агентов на индивидуальном уровне, а глобальное поведение возникает как результат деятельности множества агентов (моделирование «снизу-вверх»). Агентная модель представляет собой ряд взаимодействующих активных объектов, которые отражают объекты и отношения в реальном мире, упрощают понимание и управление совокупностью сложных социальных и бизнес-процессов.

Сеть автомобильных дорог (дорожная сеть) является сложной, крупномасштабной системой, которая предназначена для обеспечения круглогодичного безопасного движения [11]. Дорожная сеть является основой для функционирования экономики и общества посредством движения людей, товаров и услуг. Сегодня можно сказать о существующем дисбалансе между спросом в транспортной отрасли и предложениями в ней. Транспортные потоки в крупных городах достигают своих предельных значений, и падает пропускная способность дорог [12, 13].

Задача эффективной организации дорожного движения с каждым годом становится все актуальнее. Постоянный рост числа автомобилей и объема перевозок требует совершенствования методов и алгоритмов управления движением. Такое совершенствование становится возможным за счет повсеместного распространения глобальных систем навигации и позиционирования [14].

На эффективность функционирования транспортной системы влияют внешние и внутренние факторы. К внешним факторам относятся растущий уровень автомобилизации населения и развитие транспортных сетей. Перечислим внутренние факторы: оптимизация маршрутов городского транспорта; оптимизация транспортных потоков на городских дорогах; совершенствование взаимодействия транспортных средств и пешеходов [15]. Управление взаимодействием автомобилей и пешеходов обеспечивается пешеходными переходами и светофорами на дорогах.

Технология визуального анализа сводится к разработке конвейера визуализации, который позволяет представить полученные данные в наглядном виде [16].

Наша работа посвящена задаче оптимизации управления перекрестком на основе смены фаз светофоров. Для оценки эффективности решения поставленной задачи обычно применяются количественные и расчетные показатели. В нашем случае

подходят такие показатели, как число транспортных единиц в разных направлениях, количество пешеходов, средняя скорость движения транспортного потока, режим работы светофоров [13].

Визуализация помогает наглядно оценить такие показатели и может избавить от процедуры проведения дополнительных вычислений.

Сформулируем критерии эффективности применения таких инструментов по сравнению с существующими подходами к решению задач оптимизации [17-20]. Во-первых, средства визуализации обеспечивают выбор оптимального режима работы светофоров без статистической обработки графиков динамики движения автомобилей и пешеходов. Во-вторых, визуальный анализ на основе имитационного моделирования по сравнению с методами математического программирования позволяет решать задачу оптимизации управления движением на перекрестке без жестких формальных ограничений и допускает оптимизацию по нескольким показателям (параметрам). Наконец, применяя визуализацию модели движения на перекрестке, аналитик может быстро и наглядно оценить способность перекрестка пропустить максимальные потоки автомобилей и пешеходов, а также пространственную эффективность перекрестка.

Кроме того, использование средств визуализации очень важно для наглядного и понятного отображения динамики изменения параметров модели или системы во времени. Обычно при этом используют простые двумерные визуальные образы: графики, диаграммы, гистограммы. Но перед нами стоит задача многокритериальной оптимизации многокомпонентной транспортной модели в динамике, а затем визуальной интерпретации полученных результатов. Наши эксперименты могут привести к значительному увеличению объемов данных об управлении перекрестком, усложнению их структуры. В итоге может оказаться, что источники информации станут сложными по структуре. Поэтому для задач оптимизации транспортной модели требуются новые инструменты, позволяющие сочетать визуализацию и анализ многомерных, многокомпонентных и сложных по структуре данных о ситуации и событиях на перекрестке. Среда разработки AnyLogic предоставляет такие инструменты. Средства визуализации AnyLogic можно использовать в различных областях, где необходимо наглядно представить динамику многомерных данных [5, 21, 22].

Результаты визуального анализа на основе имитационной модели помогут человеку принять решение по оптимизации управления перекрестком без дополнительных расчетов и статистической обработки данных.

Объектом оптимизации транспортной сети мегаполиса могут являться перекресток или сеть перекрестков [2, 23-25].

В нашей работе ставится задача моделирования и оптимизации нагрузки на перекресток из четырех дорог. Каждая из дорог содержит несколько полос (рядов), автомобили двигаются в обоих направлениях. Светофоры обеспечивают проезд автомобилей по обеим дорогам, включая левый и правый повороты автомобилей, а также переход через эти дороги пешеходов. Каждая фаза светофора длится определенное число секунд.

Имитационная модель служит для исследования характера возникающих на перекрестке автомобильных дорог заторов и их рассасывания в зависимости от плотностей потоков автомобилей и режимов работы светофоров. Автомобили должны появляться на концах каждой из дорог случайным образом, проезжать по ним со скоростью, заданной при их появлении, притормаживая и останавливаясь при необходимости на перекрестке, и исчезая после проезда всей дороги на ее противоположном конце.

Цель решения поставленной задачи – изучение различных режимов работы светофоров и поиск режима их оптимальной работы. Результаты решения важны, так как неудачное управление приводит к нежелательному эффекту пробок на дороге, когда поток транспорта, поступающий на перекресток, не может преодолеть его.

2. Подход к визуализации данных в задачах оптимизации транспортной модели

Для достижения цели авторы статьи предлагают использовать инструменты имитационного моделирования и визуализации движения объектов среды разработки AnyLogic [1, 2], которая обеспечивает подход многоагентного моделирования.

С помощью инструментов программной системы AnyLogic для решения задачи оптимизации управления перекрёстком были созданы визуальные образы перекрёстка, дорог, пешеходов, автомобилей, светофоров, настроены свойства и параметры дорог, движения автомобилей и пешеходов по дорогам, переключения фаз светофоров. Средства среды разработки AnyLogic обеспечили визуализацию логики модели перекрёстка в дорожной сети, процесса движения транспорта, правил и ограничений для участников движения, действий при смене фаз светофоров.

Мы считаем, что инструменты имитационного моделирования среды разработки AnyLogic позволяют предложить новый наглядный подход к решению задач многокритериальной оптимизации транспортной модели на основе визуализации результатов экспериментов по управлению движением с многими участниками.

В задачах оптимизации управления перекрёстком транспортной системы важно учесть различные действия всех участников, особенно при смене фаз светофоров, что очень затруднительно выполнить при использовании методов математического программирования [17, 19, 20] и статистического анализа данных [26, 27]. А визуализация с помощью программной системы AnyLogic предоставляет человеку, принимающему решение, совершать различные действия и операции над объектами определенной транспортной сети. При этом человек будет видеть понятную картинку, меняющуюся в зависимости от его действий и операций с дорогами, автомобилями, пешеходами, светофорами. Кроме того, инструменты AnyLogic обеспечивают дополнительную информативность за счет наглядного представления двухмерных графиков для различных характеристик дорожного движения таких, как число машин на дорогах, число остановок на автомобиль, средняя скорость потока автомобилей и так далее.

С помощью средств визуализации AnyLogic результаты оптимизации можно представить в форме, обеспечивающей эффективную работу исследователя задач управления перекрёстком дорог транспортной сети мегаполиса. Такую форму принято называть визуализацией данных [28]. Эта форма позволяет перегонять большие наборы данных в визуальную графику и таким образом обеспечить понимание сложных отношений внутри данных. Средства визуализации в отличие от обычного графического интерфейса обеспечивают: краткость (способность одновременного отображения большого числа разнотипных данных); относительность и близость (способность демонстрировать в результатах запроса кластеры, относительные размеры групп, схожесть и различие групп, выпадающие значения). Главная цель визуализации — упростить и ускорить восприятие информации. Выбранный формат должен этому способствовать, а не мешать.

Инструменты AnyLogic позволяют провести визуальный анализ данных в задачах оптимизации транспортной модели перекрёстка. Визуальный анализ данных помогает человеку непосредственно взаимодействовать с результатами исследования, строить выводы и заключения на основе наглядного представления данных, понять их сущность [29].

По сравнению с подходами интеллектуального анализа [29] и статистической обработки данных [26, 27] визуальный анализ интуитивно понятен и не требует сложных математических или статистических алгоритмов обработки экспериментальных результатов. Поэтому применение визуализации может дать более хороший результат, чем статистические и автоматические методы анализа данных [29].

Среда разработки AnyLogic состоит из множества библиотек для моделирования процессов [1, 2]. В частности, возможно моделировать дорожное движение [2, 23, 24, 30]. Для решения нашей задачи оптимизации используется библиотека дорожного движения.

2.1. Визуализация движения на перекрёстках с использованием среды разработки AnyLogic

Для визуализации использованы блоки: Car Source – создание автомобилей; Car Move To – управление движением автомобилей; Car Dispose – удаление машины из модели; Traffic Light – модель светофора; Road Network Descriptor – управление всеми транспортными средствами, находящимися в одной дорожной сети; Ped Source – создание пешеходов; Ped Go To – обязательный переход пешеходов в заданное место моделируемого пространства; Ped Sink – удаление поступивших в объект пешеходов из моделируемой среды; Ped Area Descriptor – описание области, определяющей правила и/или устанавливающей ограничения на скорость пешеходов.

Предлагаемая модель состоит из трех компонентов: 1) пространственное представление перекрестка; 2) система управления сигналами светофоров; 3) поведение водителей автомобилей. Для построения модели используется технология мульти-агентного моделирования.

В модели по умолчанию имеются один тип агента Main и эксперимент Simulation. Агенты есть главные строительные блоки модели AnyLogic. Агент Main служит местом, в котором задается логика модели: здесь находится дорожная сеть и задается движение транспорта на диаграмме процесса. В модель можно добавить спутниковый снимок дороги (рис. 1). AnyLogic позволяет строить дороги и прочие объекты (рис. 2). В панели свойств (рис. 3) можно настроить параметры дороги: количество полос, ширину и цвет разделительной полосы.

Процесс движения транспорта задается при помощи диаграмм из блоков. Каждый блок задает определенную операцию, которая будет совершаться над проходящими по диаграмме автомобилями.

Диаграмма процесса в AnyLogic создается путем добавления объектов библиотеки из палитры на графическую диаграмму, соединения их портов и изменения значений свойств блоков в соответствии с требованиями модели (рис. 4).

Свойства блока генерации автомобилей представлены на рис. 5.

Для корректной работы модели нужно создать её 3D-анимацию. По умолчанию автомобили отображаются прямоугольниками. Можно задать автомобилям другую форму. Для этого «Тип автомобиля» перетащен в графический редактор. В открывшемся диалоговом окне выбран тип «автомобиль». Далее на диаграмме Main выделен блок Car Source в графическом редакторе; раскрыта секция «Автомобиль» в панели «Свойства» и выбран Car из раскрывающегося списка «Новый автомобиль».

В схеме добавлены ограничения, чтобы пешеходы не двигались беспорядочно по дороге. Можно проводить эксперименты по регулированию дорожного движения. Снимок анимации представлен на рис. 6. Светофоры контролируют движение по всем дорогам.

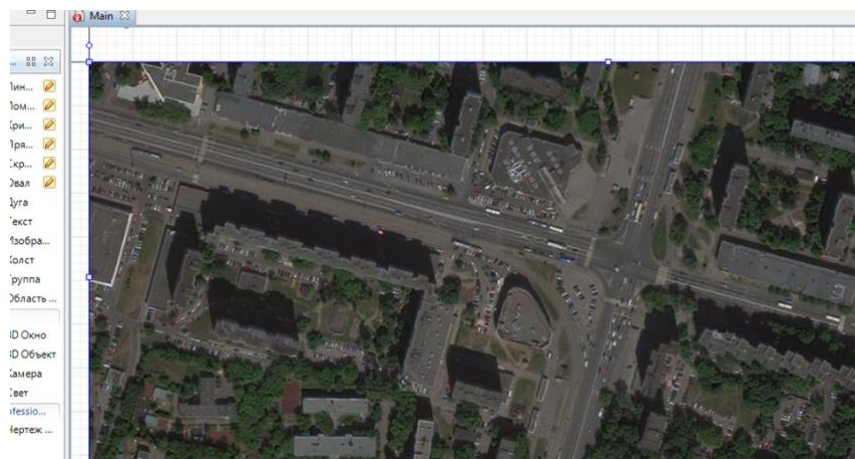


Рис. 1. Изображение в Main

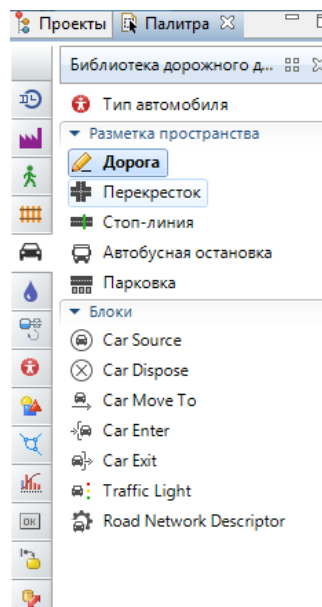


Рис. 2. Доступные объекты

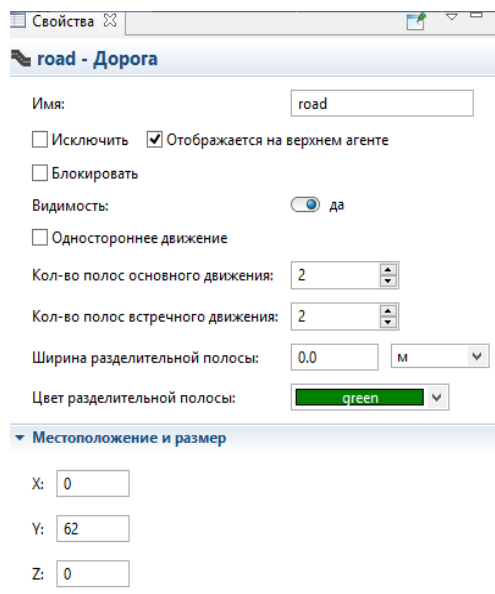


Рис. 3. Свойства дороги

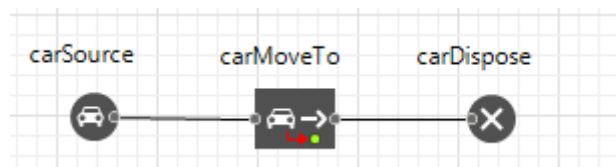


Рис. 4. Блоки для диаграммы

Свойства

carSource - CarSource

Имя: carSource

☒ Отображать имя ☐ Исключить

Прибывают согласно: Интенсивности

Интенсивность прибытия: 1000 в час

Считать параметры агентов из БД: ☐

Ограниченное кол-во прибытий: ☐

Появляется: ☒ на дороге ☐ на парковке

Дорога: road

Помещается на полосу: ☒ основного движения ☐ встречного движения

Случайная полоса: ☒

Рис. 5. Свойства блока Car Source



Рис. 6. Анимация

2.2. Результаты экспериментов

2.2.1 Результаты первого эксперимента

Четыре светофора контролируют только движение пешеходов (пешеходы движутся по пяти направлениям). Результаты работы программной системы AnyLogic для первого эксперимента представлены на рис. 7-13.

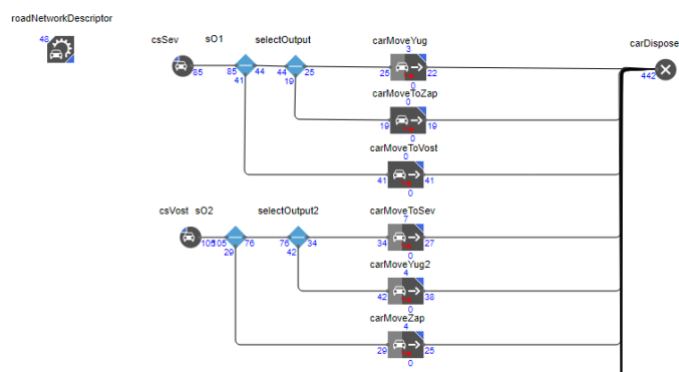


Рис. 7. Данные о движении автомобилей в первом эксперименте для первого и второго светофора

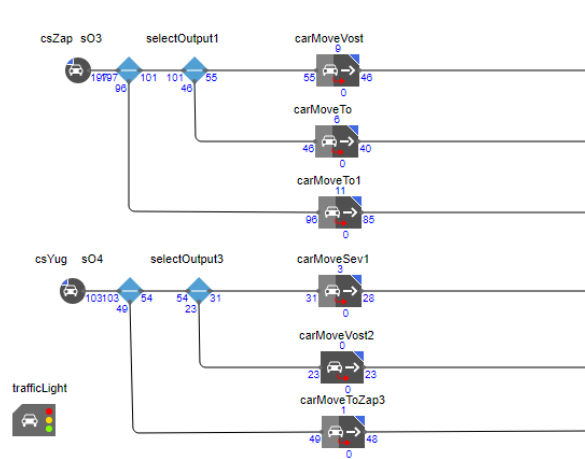


Рис. 8. Данные о движении автомобилей в первом эксперименте для третьего и четвертого светофора

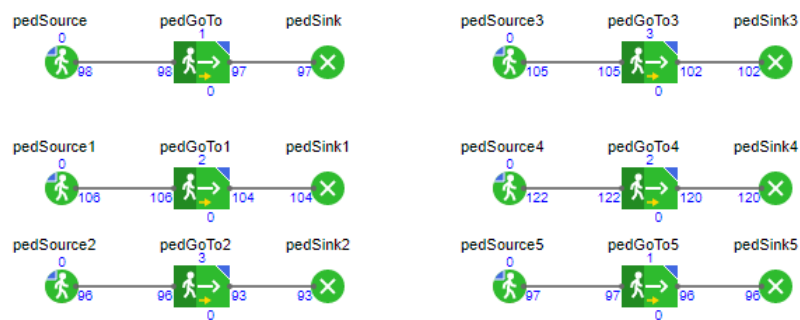


Рис. 9. Данные о движении пешеходов в первом эксперименте

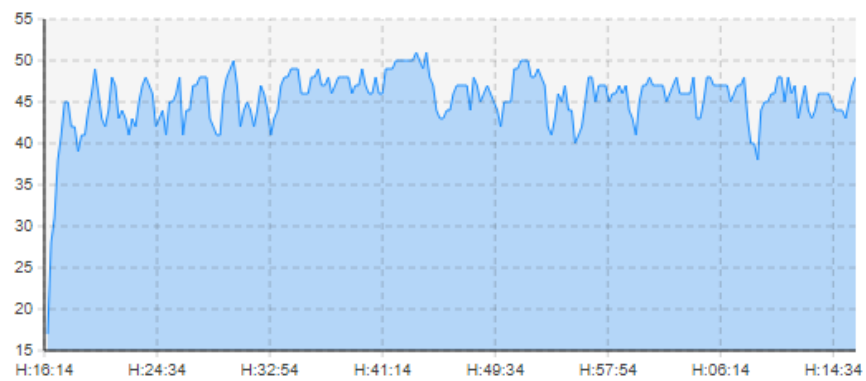


Рис. 10. Число машин в системе первого эксперимента

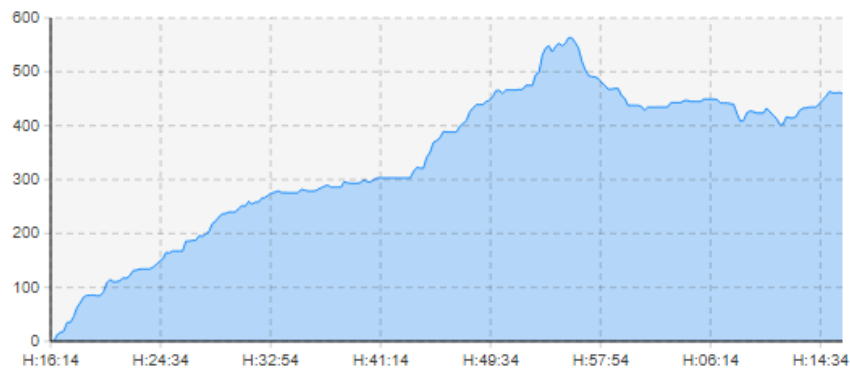


Рис. 11. Среднее время в системе первого эксперимента, секунды

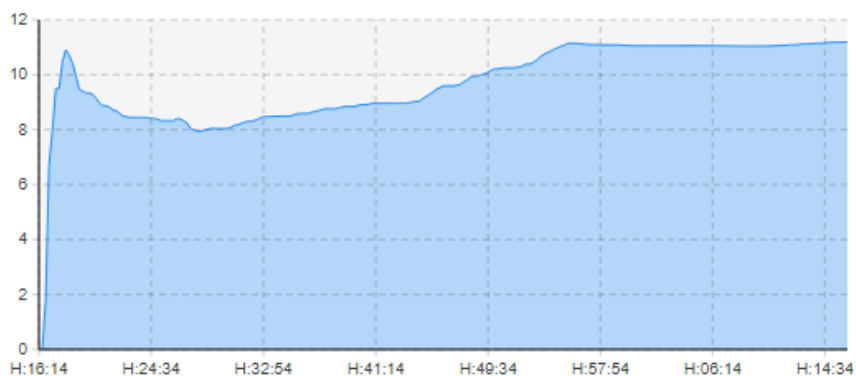


Рис. 12. Число остановок на автомобиль в первом эксперименте

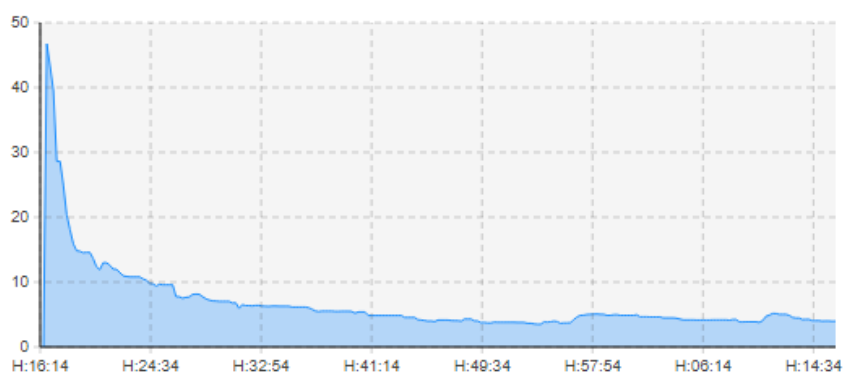


Рис. 13. Средняя скорость в первом эксперименте, км/ч

2.2.2 Результаты второго эксперимента

Четыре светофора контролируют движение по всем дорогам. Снимок фаз для одного светофора представлен на рис. 14. Результаты работы системы AnyLogic для второго эксперимента представлены на рис. 15-19.

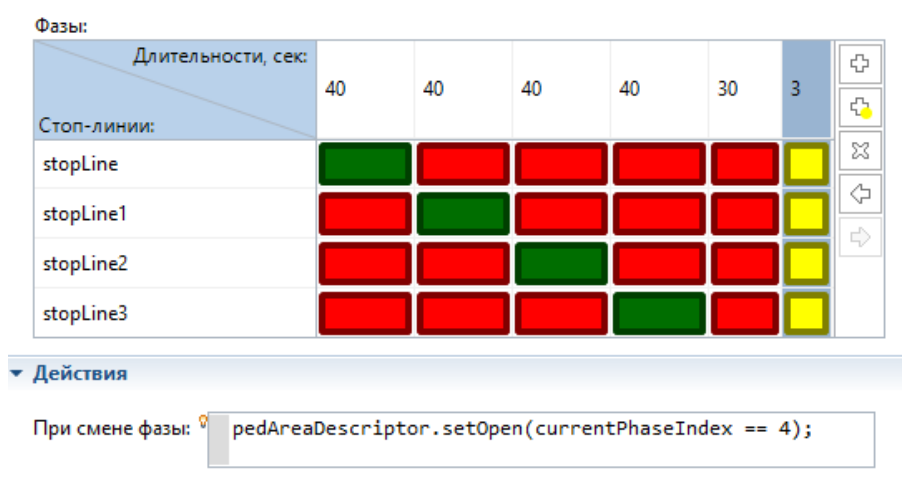


Рис. 14. Фазы светофора



Рис. 15. Снимок работы модели

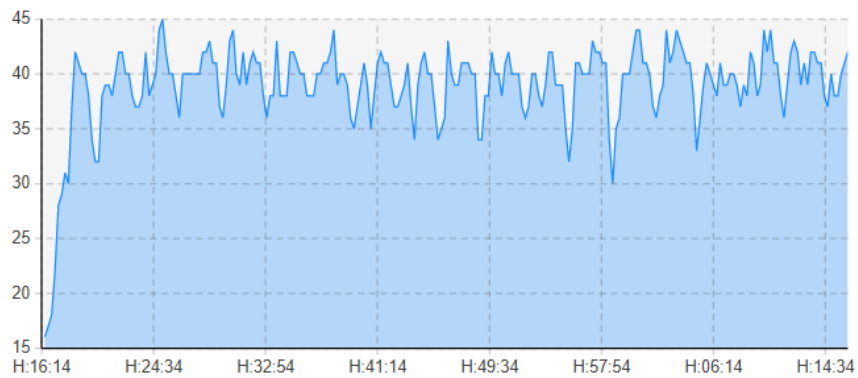


Рис. 16. Число машин в системе второго эксперимента



Рис. 17. Среднее время в системе второго эксперимента, секунды

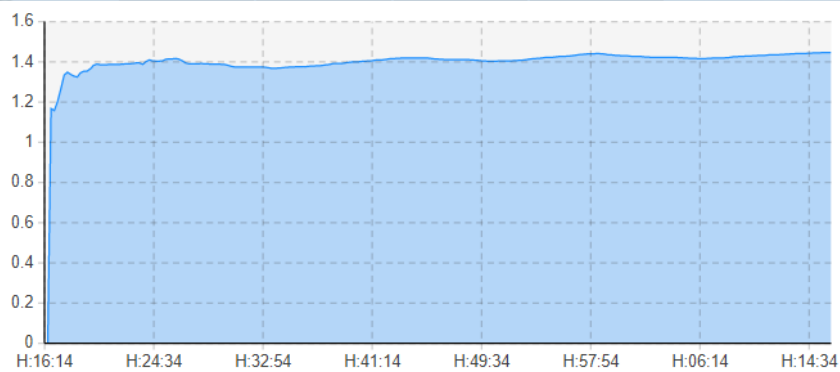


Рис. 18. Число остановок на автомобиль во втором эксперименте



Рис. 19. Средняя скорость во втором эксперименте, км/ч

Из графиков (рис. 16-19) можно увидеть, что среднее время в системе второго эксперимента сократилось по сравнению с первым экспериментом, число остановок на автомобиль также сократилось, средняя скорость движения увеличилась.

2.2.3 Результаты эксперимента оптимизации

В программной системе AnyLogic возможно создать эксперимент оптимизации (рис. 20). Исходные данные для оптимизации показаны на рис. 21. Создано четыре параметра: параметр p_1 разрешает движение по западной дороге, параметр p_2 – по северной, параметр p_3 – по восточной, параметр p_4 – по южной. Эти параметры в ходе эксперимента будут варьироваться в диапазоне от 5 до 90.

Результаты оптимизации представлены на рис. 22. Из результатов эксперимента следует, что лучшие значения для параметров: $p_1=65$, $p_2=35$, $p_3=50$, $p_4=20$. Данные о дорожном движении выводятся в виде графиков, которые изображены на рис. 23-26.

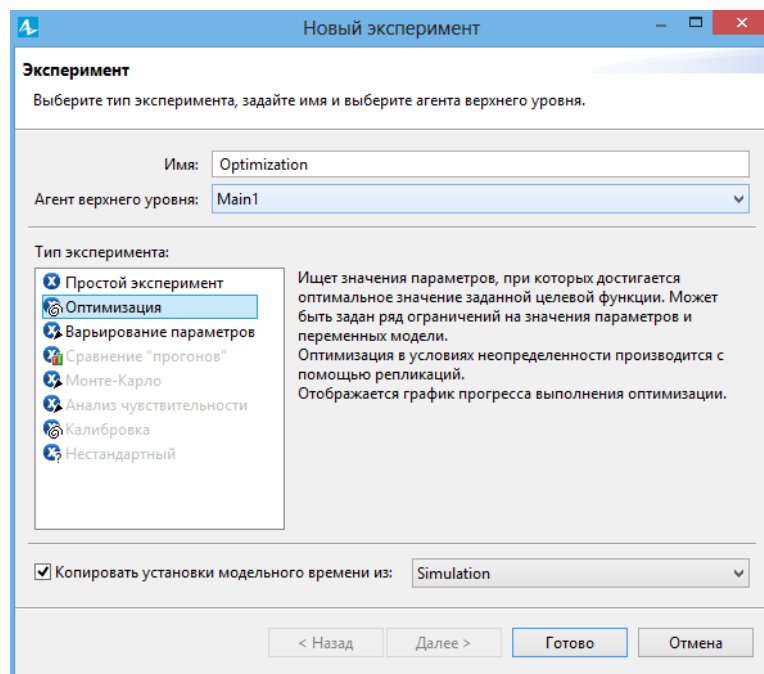


Рис. 20. Выбор эксперимента оптимизации в системе AnyLogic

Optimization - Оптимизационный эксперимент

Имя: ☐ Исключить

Агент верхнего уровня:

Целевая функция: ☒ минимизировать ☐ максимизировать

☒ Количество итераций:

☐ Автоматическая остановка

Максимальный размер памяти: M6

Параметры

Параметры:

Параметр	Тип	Значение			
		Мин.	Макс.	Шаг	Начальное
p2	дискретный	5	90	5	5
p1	дискретный	5	90	5	5
p3	дискретный	5	90	5	5
p4	дискретный	5	90	5	5

Рис. 21. Входные данные эксперимента оптимизации

Car Traffic : Optimization

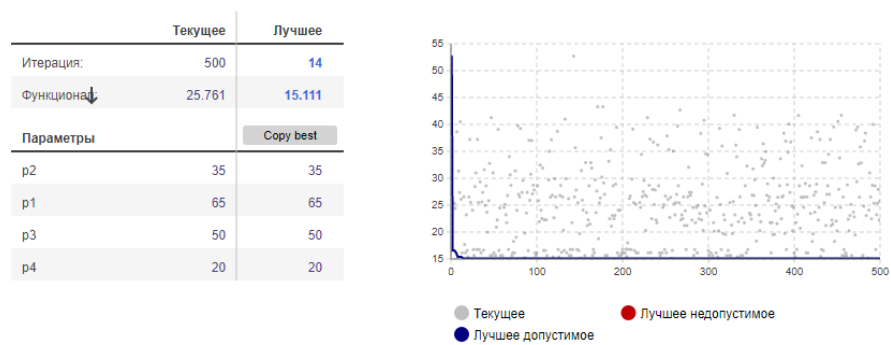


Рис. 22. Выходные данные эксперимента оптимизации

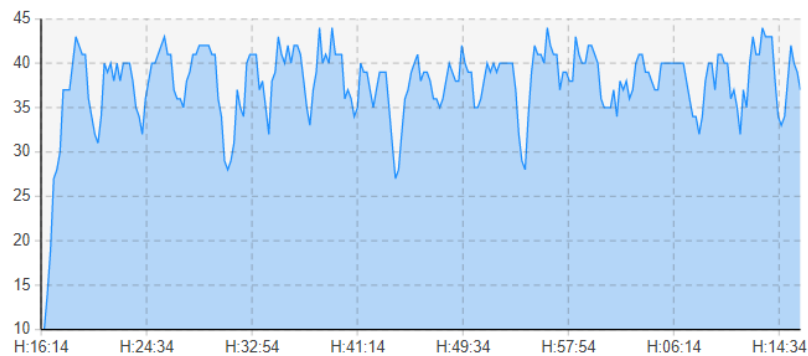


Рис. 23. Число машин в системе эксперимента оптимизации



Рис. 24. Среднее время в системе эксперимента оптимизации, секунды

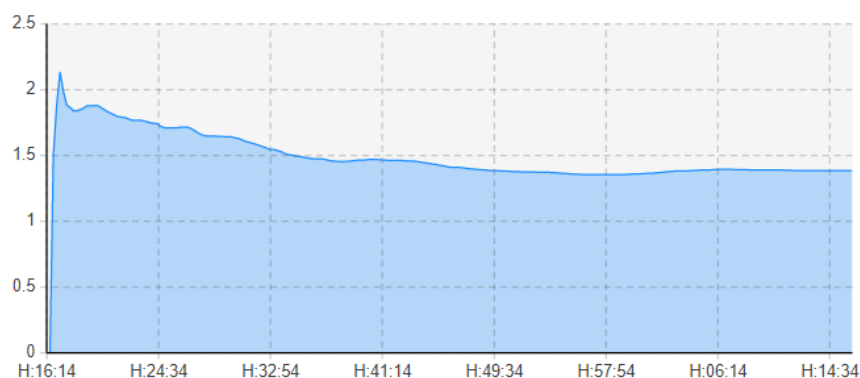


Рис. 25. Число остановок на автомобиль в эксперименте оптимизации



Рис. 26. Средняя скорость в эксперименте оптимизации, км/ч

2.3. Обсуждение экспериментов по визуализации задачи оптимизации

Понятие оптимизации может рассматриваться с разных сторон. Для вопросов строительства эффективность методов оптимизации можно выразить минимизацией строительных затрат. В наших экспериментах распределения транспортных потоков можно выделить множество

$F = \{(c_1, x_1) \cup (c_2, x_2) \cup (c_3, x_3) \cup (c_4, x_4)\}$, где x_1 — множество изменяющихся во времени значений средней скорости в км/ч, x_2 — множество изменяющихся во времени значений числа остановок на автомобиль, x_3 — множество изменяющихся во времени значений числа машин, x_4 — множество значений в динамике среднего времени в секундах, c_1, c_2, c_3, c_4 — числовые значения весовых коэффициентов, соответственно, множеств x_1, x_2, x_3, x_4 , и обозначить F как критерий оптимизации по четырем множествам x_1, x_2, x_3, x_4 . В особых случаях можно присвоить какому-то множеству наибольший вес. В наших трех экспериментах весовым коэффициентам были присвоены значения $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 1$. В обсуждаемых экспериментах множества отображаются визуальными образами, двухмерными графиками, показанными на рис. 10-13, 16-19, 23-26, что позволяет наглядно сравнить результаты моделирования и оптимизации, не прибегая к статистической обработке графиков.

Обсудим три описанных эксперимента по моделированию загрузки дорожной сети. В результате оптимизационного (симуляционного) эксперимента автоматически найдено оптимальное значение фаз светофора для перекрестка (см. рис. 22). При изменении интенсивности движения автомобилей эксперимент может быть повторен.

В статье рассмотрена проблема визуализации решения задачи оптимизации транспортной сети мегаполиса.

Особенности визуализации моделируемых данных состоят в том, что необходимо посмотреть и попробовать все варианты модели, а их бесконечное множество, затем

выбрать наилучший вариант. Эти особенности накладывают ограничения для использования традиционной статистической обработки графиков, так как при статистической обработке необходимо отбросить наихудшие и наилучшие результаты моделирования. А среди отброшенных результатов может оказаться как раз наиболее подходящий для управления конкретным перекрёстком или перекрёстками. Поэтому необходимо создавать и использовать новые инструменты имитационного моделирования транспортных систем, визуализации и визуального анализа результатов оптимизации управления перекрёстком дорог транспортной сети. Такие инструменты наглядно и быстро показывают результат оптимизации, позволяют скорее принять решение об изменении управления светофорными фазами. При этом анализируются все возможные решения, в том числе наилучшие и наихудшие, в отличие от статистической обработки.

Визуализация позволяет быстро увидеть и наглядно, напрямую, проанализировать влияние таких показателей на движение по перекрёстку. Без визуализации пришлось бы получать расчетные значения показателей на основе статистической обработки экспериментальных результатов. В случае аналитического или численного анализа пришлось бы переходить к безразмерным параметрам, что является достаточно сложной задачей. При визуальном анализе переход к безразмерной задаче не требуется. Мы считаем, что инструменты имитационного моделирования и встроенные в них средства визуализации являются основой оптимизации управления движением на перекрестке. Визуализация и визуальный анализ делают понятными и наглядными результаты оптимизации управления перекрестком человеку, принимающему решение.

Для проверки эффективности предложенного подхода к решению задачи оптимизации с помощью средств визуализации AnyLogic был проведен ряд экспериментов в авторской среде моделирования. В качестве показателей эффективности были использованы средняя скорость, число остановок на автомобиль, число машин, среднее время. В результате наш подход показал хорошие результаты, обеспечив более высокую пропускную способность перекрестка за счет регулирования фаз светофоров (10-15 % как следует из сравнения результатов первого и третьего экспериментов).

При наличии перекрестков с большим потоком нередко устанавливают светофоры. Для эффективного использования светофоров требуется оптимизировать фазы их работы с учётом направлений движения. Для моделирования работы светофоров на перекрестке используем среду имитационного моделирования AnyLogic. Платформа Any Logic включает различные библиотеки, позволяющие строить модели и оптимизировать их параметры. В AnyLogic можно задавать определенные ограничения для движения. Удобный интерфейс и многочисленные средства поддержки разработки моделей в AnyLogic делают не только использование, но и создание компьютерных имитационных моделей в этой среде моделирования доступным даже для начинающих. Поэтому среду разработки AnyLogic можно применить в учебном процессе для изучения, например, информационных технологий в транспортной логистике.

3. Заключение

В статье была рассмотрена задача оптимизации транспортной сети на примере управления движением на перекрёстке. Для реализации поставленных целей была построена имитационная модель транспортной системы со светофорами, пешеходами и автомобилями, а также предложен критерий оптимизации F . В работе рассмотрены вопросы визуализации результатов оптимизационного эксперимента на базе среды разработки AnyLogic. Оптимизационный эксперимент показал, что можно с высокой точностью и минимальными временными затратами установить оптимальные фазы

светофорного цикла, что в итоге позволит увеличить интенсивность транспортных потоков и исключить появление пробок на дороге. Результаты могут быть использованы на практике, в дорожном хозяйстве.

Данная тема уже освещалась в науке под разными ракурсами [10-15, 23-26, 30, 31]. Новизна наших исследований заключается в том, что разработана модель, позволяющая на основе визуального анализа без значительных финансовых и временных ресурсов решать вопросы организации дорожного движения на местности, в том числе оптимизации управления движением на перекрёстках.

Из сравнения результатов первого и третьего (оптимизационного) экспериментов следует, что после внедрения на практике пропускная способность дорожной сети может увеличиться на 10-15% только за счет регулирования светофорных фаз. В книге [2, с. 360] утверждается, что «...оптимизация управления транспортным парком компании позволяет снизить издержки по сравнению с работой на уровне опыта и интуиции до 25%».

Использование средств визуализации и других инструментов AnyLogic дает определенные преимущества: небольшая стоимость внедрения; наглядные прогнозируемые результаты; возможность попробовать все варианты модели и выбрать лучший из них.

Список литературы

1. Акопов А.С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата. — М.: Издательство «Юрайт», 2014. — 389 с.
2. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 400 с.
3. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем: учеб. пособие. — Норильск: НИИ, 2015. — С. 135.
4. Адаев Р.Б. Моделирование движения подвижного состава в среде Unity // Инженерный вестник Дона, № 11(95), 2022, С. 362-370.
5. Лобанов В.А., Гуро-Фролова Ю.Р. Визуализация САЕ-решений частных задач ледового судоходства. Совместное маневрирование судов // Научная визуализация, Т. 14, № 1, 2022, С. 32-40 (DOI 10.26583/sv.14.1.03).
6. Кузьмин В.А., Кикеев В.А., Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Гандурин В.П., Трепалов Н.А., Косяк Е.Г., Кузнецов П.Г. Моделирование и визуализация взрыва в песчаном грунте. Расчет и эксперимент // Научная визуализация, Т. 12, № 3, 2020, С. 79-88 (DOI 10.26583/sv.12.3.07).
7. Кузьмина Т.М., Ветрова О.А., Белевитин А.А. Программная система визуализации маршрутов движения роботов по оптимальным траекториям внутри промышленного цеха // Инженерный вестник Дона, № 4 (76), 2021, С. 194-203.
8. Назаров А.А. Имитационное моделирование объектов агропромышленного комплекса региона / Проблемы и перспективы развития социально-экономического потенциала российских регионов: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 13–14 декабря 2018 года. — Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. — С. 241-244.
9. Худякова Е. В., Блаkitная Н.А. Имитационное моделирование систем массового обслуживания в среде AnyLogic как метод совершенствования бизнес-процессов на предприятии АПК // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина», № 2(58), 2013, С. 65-68.
10. Таратун В. Е. Анализ средств имитационного моделирования для оптимизации транспортных потоков // Системный анализ и логистика, № 2(13), 2016, С. 52-59 (EDN X1HWIL).

11. Асанбаев Р. Б., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. Ф. Проектирование участка автомобильной дороги с применением переходной кривой переменной скорости движения VGV KURVE : сб. ст. IX международной научно-практической конференции «Наука в современном информационном обществе» / НИЦ «Академический», 2016. – С. 128-132.
12. Волков Д.О., Гаричев С.Н., Горбачев Р.А., Мороз Н.Н. Математическое моделирование нагрузки транспортной сети с целью оценки жизнеспособности построения новых типов сетевых систем // Производство по МФТИ, вып. 7, № 3, 2015. С. 69-77.
13. Андреева Е.А. и др. Управление транспортными потоками в городах: монография / под общ. ред. А.Н. Бурмистрова и А.И. Солодкого. – М.: ИНФРА-М, 2022. – 207 с.
14. Климович А.Н., Шуть В.Н. Алгоритм управления перекрестком на основе V2I взаимодействия // Системный анализ и прикладная информатика, № 4, 2018, С. 21-27.
15. Макаров И.Н. Эффективность функционирования и развития транспортной системы крупного города и городской агломерации: критерии оптимизации, необходимость мультимодального взаимодействия // Вестник Иркутского государственного технического университета, т. 22, № 1, 2018, с. 209-217.
16. Пилюгин В.В., Мильман И. Визуальная аналитика и ее использование в деятельности лаборатории «Научная визуализация» НИЯУ МИФИ // Научная визуализация, т. 11, № 5, 2019, с. 46-55 (DOI: 10.26583/sv.11.5.05).
17. Карманов В.Г. Математическое программирование: Учебное пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 264 с.
18. Дегтярёв Ю.И. Исследование операций: Учеб. для вузов по спец. АСУ. – М.: Высшая школа, 1986. – 320 с.
19. Himmelblau D.M. Applied Nonlinear Programming. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1972, – 498 p.
20. Грешилов А.А. Математические методы принятия решений: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 584 с.
21. Трубакова А.А., Трубаков А.О. Метод визуального анализа динамики изменения структурированных данных на основе цветовых маркеров // Научная визуализация, т. 12, № 4, 2020, С. 85-97 (DOI: 10.26583/sv.12.4.08).
22. Игнатьев А.И., Соловьева И.П. Критериальная оценка эффективности транспортного обслуживания субъектов промышленного производства // Молодой ученый, № 22.2 (126.2), 2016, С. 6-8.
23. Кутузов В.В., Демиденко Р.С., Зубков Е.А. Имитационное моделирование транспортных потоков на Т-образных перекрестках / Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилев, 24–25 окт. 2019 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2019. – С. 133.
24. Садыкова А. Н. Модель управляемого перекрестка в среде AnyLogic / Научное и образовательное пространство: перспективы развития: Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 29 января 2017 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью «Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2017. – С. 134-135.
25. Алейникова А.В., Денисова М.И., Цинько В.В., Иванов О.В. Использование программы AnyLogic при моделировании транспортных потоков / Интеграция современных научных исследований в развитие общества: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 27 сентября 2017 г. – Кемерово: ООО «Западно-Сибирский научный центр», 2017. – С. 269-271.
26. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика: Учебник. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 352 с.
27. Балдин К.В. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. – М.: Дашков и К⁰, 2010, – 259 с.

28. Паклин Н. Б., Орешков В. И. Визуализация данных / Бизнес-аналитика. От данных к знаниям. 2-е изд. — СПб.: Питер, 2013. — С. 173—210.
29. Барсегян А. А. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, И. И. Холод, М. Д. Тесс, С. И. Елизаров. 3-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 512 с.
30. Голенков В.А. Оптимизация организации движения на основе имитационного моделирования // Наука и техника в дорожной отрасли, № 3 (73), 2015, С. 5-7.
31. Rivalcoba I., Toledo L., Rudomín I. Towards urban crowd visualization // Scientific Visualization, volume 11, number 2, 2019, pp. 39-55, (DOI: 10.26583/sv.11.2.04).

Application of Visualization Tools for Optimization Problems of the Transport Model

R.B. Adaev¹, O.A. Vetrova²

A.N. Kosygin RSPU (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0002-9323-8231, adaevrb@yandex.ru

² ORCID: 0000-0001-6935-0787, ve-olga@rambler.ru

Abstract

The article discusses the combination of problems of transport system simulation and the visualization of the results of the optimization experiment. Simulation is widely used in logistics and supply chains, healthcare, transport, warehouse and transportation management, finance, business processes, service systems, railways, strategic planning and management. The paper discusses the solution to the optimisation problem for management of the intersection of roads of the megalopolis transport network taking advantage of one of the AnyLogic simulation tools. The AnyLogic development environment uses an object-oriented approach that helps in the organization and presentation of complex systems. Built-in animation tools make it easy to visualize the simulation model, as well as interpretation of the behavior of complex systems. The manuscript describes the visualization of the construction of an intersection and solving the problem of calculating the optimal duration of traffic light phases using an optimization experiment.

Keywords: Experiment visualization, simulation modeling, transport, transport system, simulation tool, intersection, road, traffic light, optimal duration, optimization experiment.

References

1. Akopov A.S. Imitatsionnoe modelirovanie: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata. — M.: Izdatel'stvo «Yurayt», 2014. — 389 s. [in Russian].
2. Karpov Yu.G. Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5. — SPb.: BKhV-Peterburg, 2005. — 400 s. [in Russian].
3. Kupriyashkin A.G. Osnovy modelirovaniya sistem: ucheb. posobie. — Noril'sk: NII, 2015. — S. 135. [in Russian].
4. Adaev R.B. Modelirovanie dvizheniya podvizhnogo sostava v srede Unity // Inzhenernyy vestnik Dona, № 11(95), 2022, S. 362-370. [in Russian].
5. Lobanov V.A., Guro-Frolova Yu.R. Visualization of CAE-Solutions of Ice Navigation Partial Problems. Joint Maneuvering of Vessels // Scientific Visualization, volume 14, number 1, 2022, pp. 32-40, (DOI 10.26583/sv.14.1.03).
6. Kuzmin V.A., Kikeev V.A., Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Gandurin V.P., Trepalov N.A., Kosyak E.G., Kuznetsov P.G. Modeling and visualization of an explosion in sandy soil. Numerical simulation and experiment // Scientific Visualization, volume 12, number 3, 2020, pp. 79-88, (DOI: 10.26583/sv.12.3.07).
7. Kuzmina T.M., Vetrova O.A., Belevitin A.A. Programmaya sistema vizualizatsii marshrutov dvizheniya robotov po optimal'nykh traektoriyam vntri promyshlennogo tsekha // Inzhenernyy vestnik Dona, № 4 (76), 2021, S. 194-203. [in Russian].
8. Nazarov A.A. Imitatsionnoe modelirovanie ob"ektov agropromyshlennogo kompleksa regiona / Problemy i perspektivy razvitiya sotsial'no-ekonomicheskogo potentsiala rossiyskikh regionov: materialy VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Cheboksary, 13–14 dekabrya 2018 goda. — Cheboksary: Chuvashskiy gosudarstvennyy universitet imeni I.N. Ul'yanova, 2018. — S. 241-244. [in Russian].

9. Khudyakova E. V., Blakitnaya N.A. Imitatsionnoe modelirovanie sistem massovogo obsluzhivaniya v srede AnyLogic kak metod sovershenstvovaniya biznes-protsessov na predpriyatii APK // Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina», № 2(58), 2013, S. 65-68. [in Russian].
10. Taratun V. E. Analiz sredstv imitatsionnogo modelirovaniya dlya optimizatsii transportnykh potokov // Sistemnyy analiz i logistika, № 2(13), 2016, S. 52-59 (EDN XIHWIL). [in Russian].
11. Asanbaev R. B., Vdovin E. A., Mavliev L. F. Proektirovanie uchastka avtomobil'noy dorogi s primeneniem perekhodnoy krivoy peremennoy skorosti dvizheniya VGV KURVE: sb. st. IX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka v sovremennom informatsionnom obshchestve» / NITs «Akademicheskoy», 2016. – S. 128-132. [in Russian].
12. Volkov D.O., Garichev S.N., Gorbachev R.A., Moroz N.N. Matematicheskoe modelirovanie nagruzki transportnoy seti s tsel'yu otsenki zhiznesposobnosti postroeniya novykh tipov setevykh sistem // Proizvodstvo po MFTI, vyp. 7, № 3, 2015, S. 69-77. [in Russian].
13. Andreeva E.A. i dr. Upravlenie transportnymi potokami v gorodakh: monografiya / pod obshch. red. A.N. Burmistrova i A.I. Solodkogo. – M.: INFRA-M, 2022. – 207 s. [in Russian].
14. Klimovich A.N., Shut' V.N. Algoritm upravleniya perekrestkom na osnove V2I vzaimodeystviya // Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika, № 4, 2018, S. 21-27. [in Russian].
15. Makarov I.N. Effektivnost' funktsionirovaniya i razvitiya transportnoy sistemy krupnogo goroda i gorodskoy aglomeratsii: kriterii optimizatsii, neobkhodimost' mul'timodal'nogo vzaimodeystviya // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, t. 22, № 1, 2018, S. 209-217. [in Russian].
16. Pilyugin V.V, Milman I. Visual analytics and its use in the NRNU MEPhI “Scientific Visualization” laboratory activities // Scientific Visualization, volume 11, number 5, 2019, pp. 46-55 (DOI: 10.26583/sv.11.5.05).
17. Karmanov V.G. Matematicheskoe programmirovaniye: Uchebnoe posobie. – M.: FIZMATLIT, 2004. – 264 s. [in Russian].
18. Degtyarev Yu.I. Issledovanie operatsiy: Ucheb. dlya vuzov po spets. ASU. – M.: Vysshaya shkola, 1986. – 320 s. [in Russian].
19. Himmelblau D.M. Applied Nonlinear Programming. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1972, – 498 p.
20. Greshilov A.A. Matematicheskie metody prinyatiya resheniy: Ucheb. posobie dlya vuzov. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006. – 584 s. [in Russian].
21. Trubakova A.A., Trubakov A.O. Visual Analysis of Dynamic Changes in Structured Data on the Basis of Colour Markers // Scientific Visualization, volume 12, number 4, 2020, pp. 85-97 (DOI: 10.26583/sv.12.4.08).
22. Ignat'ev A.I., Solov'eva I.P. Kriterial'naya otsenka effektivnosti transportnogo obsluzhivaniya sub"ektov promyshlennogo proizvodstva // Molodoy uchenyy, № 22.2 (126.2), 2016, S. 6-8. [in Russian].
23. Kutuzov V.V., Demidenko R.S., Zubkov E.A. Imitatsionnoe modelirovanie transportnykh potokov na T-obraznykh perekrestkakh / Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, Mogilev, 24–25 okt. 2019 g. – Mogilev: Belorus.-Ros. un-t, 2019. – S. 133. [in Russian].
24. Sadykova A. N. Model' upravlyaemogo perekrestka v srede AnyLogic / Nauchnoe i obrazovatel'noe prostranstvo: perspektivy razvitiya: Sbornik materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Cheboksary, 29 yanvarya 2017 goda. – Cheboksary: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «Tsentr nauchnogo sotrudnichestva «Interaktiv plyus», 2017. – S. 134-135. [in Russian].

25. Aleynikova A.V., Denisova M.I., Tsин'ko V.V., Ivanov O.V. Ispol'zovanie programmy AnyLogic pri modelirovanii transportnykh potokov / Integratsiya sovremennykh nauchnykh issledovaniy v razvitie obshchestva: Sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Kemerovo, 27 sentyabrya 2017 g. – Kemerovo: ООО «Zapadno-Sibirskiy nauchnyy tsentr», 2017. – S. 269-271. [in Russian].
26. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. Matematicheskaya statistika: Uchebnik. – M.: Knizhnyy dom «LIBROKOM», 2014. – 352 s. [in Russian].
27. Baldin K.V. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnik. – M.: Dashkov i K^o, 2010, – 259 s. [in Russian].
28. Paklin N. B., Oreshkov V. I. Vizualizatsiya dannykh / Biznes-analitika. Ot dannykh k znaniyam. 2-e izd. – SPb.: Piter, 2013. – S. 173–210. [in Russian].
29. Barsegyan A. A. Analiz dannykh i protsessov: ucheb. posobie / A. A. Barsegyan, M. S. Kupriyanov, I. I. Kholod, M. D. Tess, S. I. Elizarov. 3-e izd., pererab. i dop. – SPb.: BKhV-Peterburg, 2009. – 512 s. [in Russian].
30. Golenkov V.A. Optimizatsiya organizatsii dvizheniya na osnove imitatsionnogo modelirovaniya // Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli, № 3 (73), 2015, S. 5-7. [in Russian].
31. Rivalcoba I., Toledo L., Rudomín I. Towards urban crowd visualization // Scientific Visualization, volume 11, number 2, 2019, pp. 39-55, (DOI: 10.26583/sv.11.2.04).