



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Серия Математика и информационные технологии. 2024, № 1, с. 1-6.

Поступила: 30.11.2023

Окончательный вариант: 11.03.2024

© УлГУ

УДК 303.094.7

## Анализ трафика дорожного движения методами имитационного моделирования

Андреев Д.С.<sup>\*</sup>, Бутов А.А.

[\\*d.s.andreev@mail.ru](mailto:d.s.andreev@mail.ru)

Ульяновский государственный университет, Россия

---

В статье представлена математическая модель трафика дорожного движения, описанная в терминах случайных процессов и исследованная с использованием методов имитационного моделирования. Модель может служить основой для моделирования более сложных сценариев регулирования транспортных потоков и использована на практике для улучшения трафика дорожного движения.

*Ключевые слова:* имитационная модель, случайный процесс, трафик дорожного движения

---

### Введение

Пробки на дорогах являются серьезной проблемой в городских районах, вызывая задержки, неудобства и экономические потери, а также являются одной из главных причин загрязнения воздуха. Потребность в эффективных стратегиях управления дорожным движением становится все более актуальной из-за повышения количества транспортных средств на дороге. В настоящее время существует большое множество различных методов и подходов в моделировании дорожного трафика. Проводя сравнительный анализ, можно сказать, что самым современным является моделирование с применением нейронных сетей [1-2]. Из плюсов данного метода можно отметить высокую степень точности и работу напрямую с изображением с камер наблюдения, а из минусов – зависимость точности модели от количества данных, на которых происходило обучение нейронной сети и затраты на модернизацию оборудования. К “традиционным” методам можно отнести различные системы имитационного моделирования транспортных сетей, такие как AIMSUN, PARAMICS, VISSIM и другие [3]. Преимущества данных систем заключаются в разнообразных вариантах их применения, но все они имеют один недостаток: ограничения в скорости работы и размера транспортной сети. Одним из самых распро-

страненных ПО для моделирования сложных систем и процессов, с пользовательским интерфейсом и обширным инструментарием является AnyLogic [4]. Данная программная платформа сочетает профессиональные средства агентного моделирования, дискретно-событийное моделирование и системную динамику. Дискретно-событийный метод применяется, когда систему можно представить как одну последовательность операций. Однако не всегда просто определить, какой метод моделирования лучше всего подходит к данной ситуации. Например, если более просто описать поведение каждого отдельного объекта, чем разработать общий рабочий процесс, то лучше использовать агентное моделирование. Аналогично, если важны общие оценки явлений, а не взаимодействия между отдельными объектами, то более удобно моделировать систему с помощью системной динамики. Комбинируя методы, можно проще и быстрее построить адекватную модель и приступить к анализу. Широкий функционал позволяет точно настроить параметры и поведение активных объектов (агентов), установить связи между ними и задать окружающую среду для анализа поведения моделируемой системы. К минусам подхода моделирования с помощью Anylogic можно отнести требовательность к навыкам пользователя при создании модели, ограниченность в элементах моделирования из-за зависимости от готового инструментария и значительную ресурсоемкость.

В этой статье мы рассмотрим альтернативный подход к построению математической модели для анализа автомобильного трафика. На ее основе разработана компьютерная модель, которая не имеет ограничений по функционалу и в дальнейшем может быть улучшена. Основная цель работы – изучить возможность применения модели, построенной на основе случайных процессов, к задаче анализа дорожного движения.

## 1. Основные предположения

Разработанная компьютерная модель описывает прибытие и убытие транспортных средств (ТС) на регулируемый перекресток с одной полосой движения. В рамках моделирования в работе светофора выделяются две основные фазы: красного и зеленого сигналов. Время действия желтого сигнала не учитывается (в новых моделях светофоров его место занимает таймер красного или зеленого сигналов). Время от начала красного и до конца зеленого сигнала будем считать одним периодом. Во время первой фазы движение запрещено, происходит накопление очереди ( $N_{t=0} = 0, N_t \geq 0$ ) ТС с интенсивностью  $\lambda > 0$  – это среднее число ТС, прибывших до начала второй фазы. Значение интенсивности  $\lambda$  на практике зависит от плотности движения на конкретном участке дороги и времени суток (в часы пик оно значительно выше). Во время второй фазы движение разрешено и происходит проезд перекрестка ТС (убытие из очереди) с интенсивностью  $\mu > 0$ . Значение  $\mu$  получается на практике путем замера среднего количества ТС, покидающих очередь за время второй фазы; здесь мы полагаем его равным 0,5 единиц за 1 секунду. Условимся, что длительности первой и второй фаз равны. ТС, которые прибыли после начала действия разрешающего сигнала и прошли его за отведенное время, учитываться не будут, так как они не влияют на накопление очереди.

## 2. Математическая модель

Определим интервалы периодов работы светофора:  $t \in [\zeta_k, \zeta_{k+1})$   $k = 0, 1, 2, \dots$ , где  $\zeta_k$  – начало  $k$ -го периода. Каждый период состоит из двух фаз  $U$  и  $V$  с временем действия  $t \in [\zeta_k, \sigma_k)$ , и  $t \in [\sigma_k, \zeta_{k+1})$ , соответственно. Компьютерная модель может включать в себя несколько таких периодов, их количество задает пользователь. При этом размер очереди ТС в конце  $k$ -го периода, равен размеру очереди в начале  $k+1$ -го периода.

Опишем поток прибывающих ТС случайным процессом  $A = (A_t)_{t \geq 0}$ , с пуассоновским распределением, так как ТС прибывают на перекресток с некоторой фиксированной средней интенсивностью  $\lambda$  и независимо друг от друга [5].  $D = (D_t)_{t \geq 0}$ , – линейный так как ТС убывают один за другим с интенсивностью  $\mu$  без стохастического поведения. Для процесса  $A = (A_t)_{t \geq 0}$  компенсатор определяется как:

$$\tilde{A} = \int_0^t \lambda I(s \in U) ds, \quad (1)$$

где  $U = \bigcup_{k=1}^{\infty} [\zeta_k, \sigma_k)$ ,  $s$  – текущее время. Для процесса  $D = (D_t)_{t \geq 0}$  компенсатор определяется следующим образом:

$$\tilde{D} = \int_0^t \mu I(X_s > 0) I(s \in V) ds, \quad (2)$$

где  $V = \bigcup_{k=1}^{\infty} [\sigma_k, \zeta_{k+1})$ . Тогда число ТС в очереди можно описать следующим процессом:

$$X_t = A_t - D_t \quad (3)$$

## 2. Компьютерная модель

Компьютерное моделирование было реализовано с применением инструментальных средств языка программирования C# и среды разработки ПО Visual Studio.

Проверим точность и адекватность компьютерной модели на реальных данных. Для примера рассмотрим работу светофора на перекрестке проспекта Туполева и проспекта Созидателей. Заполним параметры: интенсивность  $\lambda = 0.75$  ТС в секунду (получена на практике, путем замера среднего числа ТС, пересекающих перекресток), длительность периода действующего на перекрестке светофора – 90 секунд. Для наглядности смоделируем 1 траекторию с 10 периодами и ограничением очереди в 20 ТС. Поведение модели при этих значениях параметров представлено на рис.1.

Экспериментальные данные были получены на практике путем замера среднего размера очереди за 10 периодов. Аналогично было подсчитано среднее значение размера очереди для модели. Сравнивая полученные результаты (табл. 1), можно сказать, что результаты моделирования близки к реальной ситуации.

По результатам моделирования можно заметить, что при текущей интенсивности длительность периода в 90 секунд избыточна, так как превышено максимальное количество ТС в очереди, и присутствует значительное ее накопление между периодами. Такой ситуации необходимо избегать. Разработанная компьютерная модель предоставляет рекомендации для корректировки. Расчет рекомендуемой длительности периода происходит авто-

матически, путем нескольких итераций вычислений поиска максимальной длительности периода, при которой длина очереди останется в допустимых пределах. Также производится расчет пропускной способности – число ТС, покинувших перекресток за время работы зеленого сигнала светофора. Рекомендуемая длительность периода и пропускная способность отображаются в окне программы.

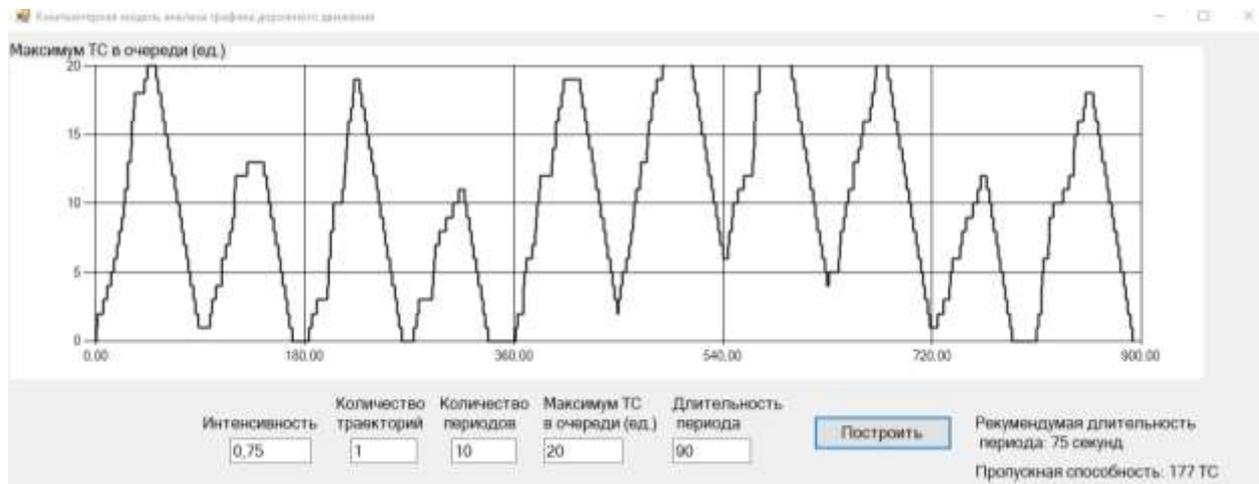


Рис. 1. Компьютерная модель анализа трафика дорожного движения с первым набором параметров

Таблица 1. Средние значения размера очереди и пропускной способности

	Средний размер очереди	Пропускная способность
Модель	17,7	177
Эксперимент	16,9	170

Последуем рекомендации и сократим длительность периода до 75 секунд (рис. 2). В этом случае наблюдается отсутствие превышения порога в 20 ТС и уменьшение накопления очереди ценой незначительного падения пропускной способности, что говорит о корректном выборе длительности периода для текущей интенсивности.

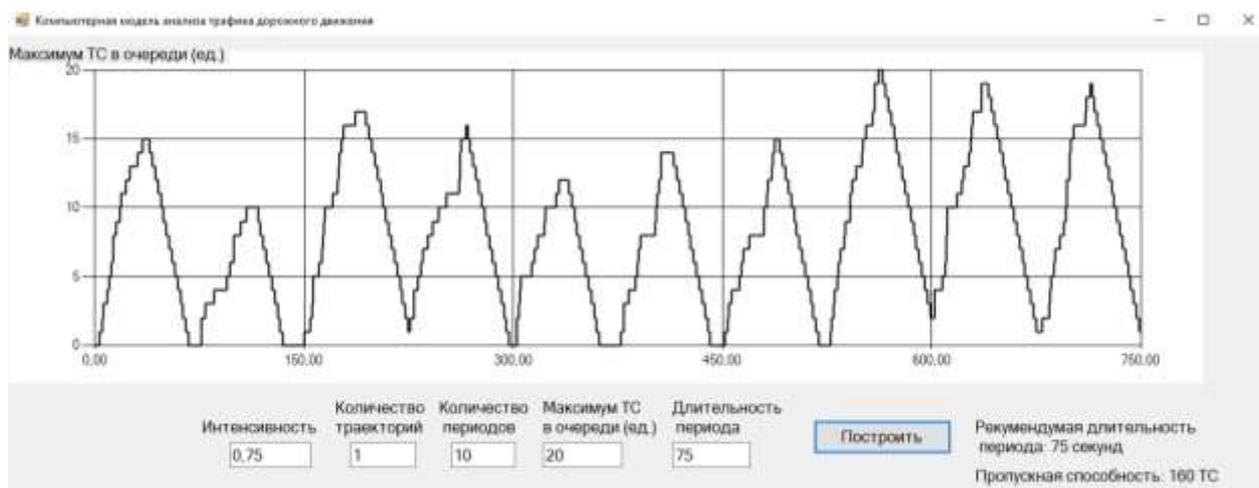


Рис. 2. Компьютерная модель анализа трафика дорожного движения со вторым набором параметров

Данная компьютерная модель включает в себя несколько ограничений на входные данные, например, минимальная длительность одного периода равна 20 секундам. Опытным путем было выявлено, что при значениях интенсивности близких к единице (0.8 и больше) образование заторов на дороге неизбежно.

Компьютерная модель позволяет моделировать сразу несколько траекторий для большей наглядности (рис. 3).

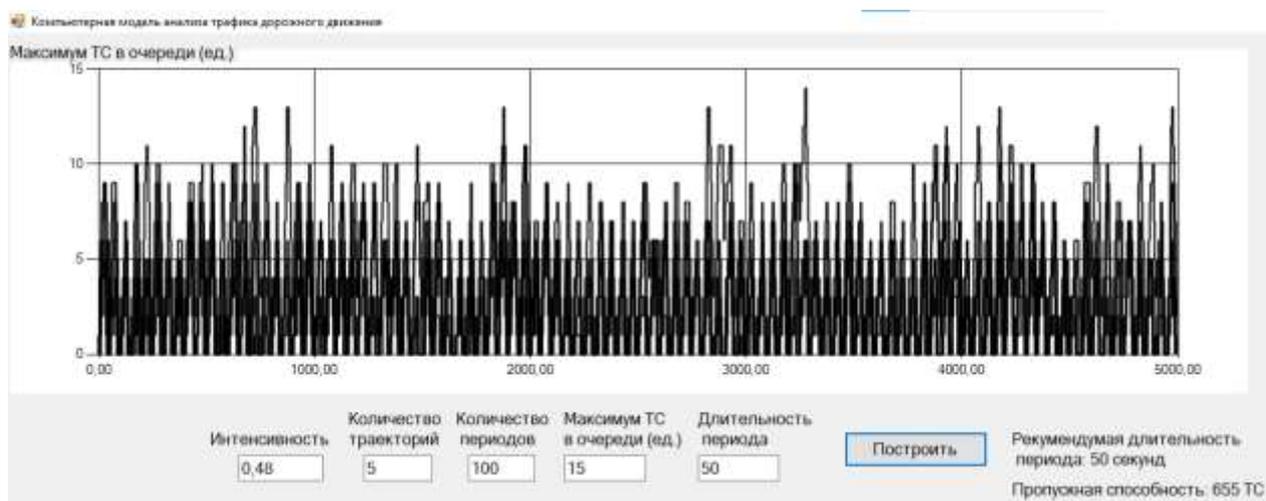


Рис. 3. Компьютерная модель анализа трафика дорожного движения с первым набором параметров

## Заключение

Практическое применение компьютерной модели заключается в следующем: проводятся замеры интенсивностей потока ТС, устанавливается ограничение на максимальное количество ТС в очереди и длительность периода. Затем проводится корректировка работы светофора (либо первоначальная настройка нового), согласно результатам работы модели.

Сравнивая данную модель с существующими, можно отметить, во-первых, достаточно высокую точность и не требующий больших затрат подход с имитационным моделированием на основе случайных процессов. Во-вторых, простой и понятный интерфейс. И, в-третьих, наличие возможности для дальнейших изменений, без ограничений платформы под нужды пользователя.

В настоящее время, большинство светофоров на практике работают с фиксированной длительностью периода, хотя по результатам работы данной компьютерной модели, можно заметить, что длительность периода должна быть скорректирована в зависимости от значения интенсивности потока ТС. Разработанная модель может быть применена при настройке новых светофоров и корректировке работы существующих.

## Список литературы

1. Зацерковный А. В., Нурминский Е. А. Нейросетевой анализ транспортных потоков городских агломераций на основе данных публичных камер видеобзора // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2021, т. 13, № 2, с. 305–318.
2. Петрушин В.А., Бугаков П.Ю. Разработка программного обеспечения на основе нейросети для оптимизации и анализа дорожного трафика // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2020, т. 7, № 1, с. 93–98.
3. Ие О.Н. Имитационное моделирование транспортных систем: программные средства и направления их совершенствования // *Актуальные вопросы современной экономики*. 2020, № 5, с. 428–439.
4. Маликов, Р.Ф. *Практикум по имитационному моделированию сложных систем в среде AnyLogic 6: учеб. пособие*. Уфа: Изд-во БГПУ, 2013. 296 с.
5. Бутов А.А., Сухарева А.Ю. Методы математического моделирования процессов рандомизации для эффектов отражения // *Ученые записки УлГУ. Серия Математика и информационные технологии*. 2018, № 1, с. 29–33.

## A study of road traffic using the methods of simulation modelling

*Andreev, D.S.* \*, *Butov, A.A.*

\* [d.s.andreev@mail.ru](mailto:d.s.andreev@mail.ru)

Ulyanovsk State University, Russia

The paper presents a mathematical model of traffic flow, described in terms of random processes and investigated using simulation modelling methods. The model can serve as a basis for modelling more complex scenarios of regulation of traffic flows and is applicable in practice to improve traffic flow.

**Keywords:** *simulation model, random process, road traffic*