

развития. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. 2019. С. 219–221.

11. IEEE Foundation for Intelligent Physical Agents. URL: <http://www.fipa.org>.

12. Искандеров Ю.М., Свистунова А.С., Чумак А.С. Системный анализ показателей качества комплексных логистических технологий при доставке грузов // В сборнике: Системный анализ в проектировании и управлении сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. С. 251–262.

13. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учеб. пособие для вузов / Под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М.: Высш. шк., 2004. 616 с.

14. Моделирование систем и процессов: учебник для академического бакалавриата / В.Н. Волкова, Г.В. Горелова, В.Н. Козлов [и др.]; под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. М.: Издательство Юрайт, 2014. 592 с.

УДК 303.732.4

doi:10.18720/SPBPU/2/id20-175

*Ласкин Михаил Борисович*¹,

канд. физ.-мат. наук, доцент,

стар. науч. сотр., СПИИРАН;

*Свистунова Александра Сергеевна*²,

мл. науч. сотр. СПИИРАН;

*Талавиря Александр Юрьевич*³,

аспирант НИУ ВШЭ, СПИИРАН

ОЦЕНКА СУТОЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПУНКТА ВЗИМАНИЯ ПЛАТЫ НА СЪЕЗДЕ ВНУТРИГОРОДСКОЙ ПЛАТНОЙ ДОРОГИ

^{1, 2, 3} Санкт-Петербургский Института Информатики и Автоматизации
Российской Академии Наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Россия,

¹ laskinmb@yahoo.com, ² svistunova_alexandra@bk.ru

³ Национальный Исследовательский Университет

Высшая Школа Экономики (НИУ ВШЭ),

Департамент логистики и управления цепями поставок

в Санкт-Петербурге, Санкт-Петербург, Россия,

³ a.talaviryia@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена платным дорогам как объекту современной транспортной инфраструктуры. На примере платной дороги Западный Скоростной Диаметр производится оценка суточной интенсивности движения на пункте взимания платы путем приближения эмпирического ряда наблюдений несколькими первыми членами тригонометрического, определены коэффициенты и

оценена точность приближения ряда. Приведены возможные варианты практического применения результатов анализа.

Ключевые слова: платная дорога, пункт взимания платы, система взимания платы, интенсивность движения.

*Mikhail Laskin*¹,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor,
Senior Researcher of SPIIRAS;
*Alexandra Svistunova*²,
Junior Researcher of SPIIRAS;
*Alexander Talavirya*³,
Postgraduate of HSE, SPIIRAS

EVALUATION OF THE DAILY INTENSITY OF TRAFFIC AT THE ROAD EXIT TOLL PLAZA OF THE INTRAURBAN TOLL ROAD

^{1, 2, 3} St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia,

¹ laskinmb@yahoo.com, ² svistunova_alexandra@bk.ru

³ Higher School of Economics, Department of Logistics and Supply Chain
Management, St. Petersburg, Russia,
³ a.talavirya@yandex.ru

Abstract. This article is devoted to toll roads as an object of modern transport infrastructure. On the example of the Western High-Speed Diameter toll road, the daily traffic intensity at the toll plaza is estimated by approximating empirical observation series by some numbers of trigonometric series, the coefficients are determined, and the accuracy of the approximation of the series is estimated. Possible options for the practical application of the analysis results are given.

Keywords: toll road, toll plaza, toll collection system, traffic intensity.

Введение

В 2020 году можно уверенно утверждать, что платные дороги стали неотъемлемым элементом транспортной инфраструктуры Российской Федерации, доказав свою эффективность как для частных, так и для коммерческих пользователей. Являясь новым витком развития автодорожной отрасли, феномен отечественных платных дорог, использующий в своей основе принципиально новые и современные транспортные технологии, формирует новые тенденции поведения транспортно-логистического и социального рынков. При перевозке грузов будут высвобождаться дополнительные оборотные средства предприятий, а при перевозке пассажиров – время людей, которое может быть эффективно

распределено на другие цели. Увеличение скорости перевозок по скоростным и внутригородским платным дорогам позволяет связать ключевые центры экономического роста, повысить качество жизни населения и уровень деловой активности, и создать более благоприятные условия для реализации потенциальных экономических и социальных возможностей каждого субъекта Российской Федерации.

Текущий состав реализуемых проектов направлен уже не столько на расширение локальной транспортной инфраструктуры и социально-экономического развития окружающих территорий, сколько на создание полноценных транспортных коридоров, позволяющих обеспечить быстрое и безопасное перемещение на дальние расстояния по автомобильным дорогам, способствуя развитию внутренних и внешних коммерческих перевозок и автомобильного туризма. Количество анонсированных федеральных и региональных проектов самых различных регионах страны, вплоть до Дальнего Востока, наглядно показывает непрерывный рост данного сегмента отрасли, и не перестает вызывать повышенный интерес со стороны крупных инвесторов.

Сегодня Россия уже обладает достаточным портфелем транспортных проектов дорог, эксплуатируемых на платной основе. Несмотря на это, специфика транспортного управления платными дорогами, связанная с явлениями и процессами, возникающими при внедрении и эксплуатации подобных инфраструктурных проектов, является до сих пор недостаточно изученной научным сообществом.

Вместе с тем, углубленное теоретическое изучение данных процессов и явлений может способствовать разработке дополнительных механизмов оптимизации затрат на этапах строительства и эксплуатации объектов, а также выработке нормативной базы и закреплению успешных применяемых практик в регламентирующих документах. С увеличением темпов внедрения платных дорог в отечественную транспортную инфраструктуру, актуальность результатов исследований подобного формата будет неизменно расти.

Отметим, что на протяжении более девяноста лет с момента первого появления платных дорог (в их современном представлении), процесс взимания платы системы взимания платы (далее – СВП) претерпел незначительные изменения, связанные исключительно с появлением или развитием технологий способов оплаты проезда на пунктах взимания платы (далее – ПВП). В рамках данной статьи будут рассмотрены процессы, происходящие в классических СВП барьерного типа, специфика безбарьерных СВП типа «Свободный поток» рассматриваться не будет.

Существующие проекты платных дорог можно условно разделить на два класса: скоростные и внутригородские.

Скоростные платные дороги преимущественно расположены за пределами городской черты, и образуют междугородные корреспонденции, обеспечивающие связность между ключевыми центрами экономического роста, основными центрами потребительской, производственной и рекреационной активности. Пользователями дорог данного класса являются как коммерческие компании, осуществляющие междугородные транзитные корреспонденции, а также корреспонденции на связях города с другими населенными пунктами, так и частные пользователи, которые проживают за городской чертой, осуществляют загородные (рекреационные) поездки в «дачном» направлении, а также практикуют автомобильный туризм. Последние две категории пользователей формируют на ПВП повышенный трафик «выходного дня».

Внутригородские платные дороги располагаются непосредственно в городской черте и, в первую очередь, предназначены для разгрузки уличной городской сети (далее – УДС), ускорения перемещения между районами, повышения мобильности городского населения. Согласно руководству по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах [28], пользователями внутригородских дорог являются пользователи индивидуального легкового транспорта, осуществляющие регулярные трудовые (работа – дом) и деловые корреспонденции. Повышенная загрузка ПВП, расположенных в центральных и спальных районах города, происходит по будним дням. Отметим, что грузовой транспорт, как на скоростных, так и внутригородских платных дорогах, в отличие от личного, распределяется в течение дня более равномерно, не создавая регулярных скоплений на ПВП. Обратной является ситуация с поездками, образуемыми некоммерческими пользователями платных дорог (трудовые, деловые и рекреационные корреспонденции), которые носят регулярный и повторяющийся характер. Оценка транспортных данных таких корреспонденций дает возможность более подробно изучить закономерности возникающего потока транспортных средства (далее – ТС), позволяет построить математическую модель трафика, проходящего через ПВП.

Несмотря на наличие более чем десятилетнего опыта строительства и эксплуатации платных дорог в России, отечественным исследованиям проблематики данных объектов транспортной инфраструктуры отведена крайне незначительная доля отечественных исследований. Работы А.В. Домбаляна и Г.А. Галкина [27], а также В. Пирона и А.А. Федотова [24], описывают теоретические основы и принципы проектирования платных дорог, в частности, основные показатели эффективности работы ПВП [27], и методы математического моделирования [24], применяемые в отечественной практике на этапе проектно-исследовательских работ (далее – ПИР).

Наибольший интерес связан с оценкой расчетной интенсивности платной дороги, определяемой на этапах ПИР и создания проектной документации, с целью оценки возврата планируемых инвестиций в инфраструктурный проект, а также определения основных параметров объекта строительства. Так, работа В.В. Гасиловой, С.С. Уваровой и Д.А. Целковнева [25] посвящена описанию методики, уточняющей прогнозные значения интенсивности проектируемого участка дороги на примере строящегося платного участка трассы М-4 «Дон» км 1070 – км 1091. Заметим, что теоретическая база, используемая при исследованиях проблематики платных дорог, может свободно применяться для задач проектирования и строительства дорог общего пользования. Так, в работе О.В. Сапрыкиной, О.Н. Сапрыкина и Т.И. Михеевой [29] рассматривается вопрос прогнозирования интенсивности на УДС дорог общего пользования, используются методические материалы, применяемые для проектирования платных дорог [30].

Более глубокие и нетривиальные аспекты строительства и эксплуатации платных дорог рассматриваются в зарубежных исследованиях. Безусловно, невозможно не отметить, что значимая часть статей затрагивает важнейший социальный-экономический аспект любой платной дороги – расчет стоимости проезда. Изучению данного вопроса в равной степени посвящены исследования авторов Западных (США, Канада), Европейских (Италия, Испания, Великобритания, Норвегия, Швеция, Босния и Герцеговина) и Азиатских (КНР, Тайвань, Малайзия) стран, затрагивающие вопросы как анализа влияния стоимости оплаты проезда [1, 3, 5, 8, 13, 16, 18, 21, 22], так и моделирования формируемой тарифной стоимости [6, 7, 10, 11, 14, 20].

Не менее важным вопросам подсчета и прогнозирования транспортного потока на платных дорогах посвящены статьи [2, 4, 9, 12, 15, 17, 19, 23]. В данной области исследований большое внимание уделяется разработке соответствующих моделей. Так, в статье [4] под авторством Dharmawan W. I., Sjafruddin A., Frazila R. B., Zukhruf F. представлен обзор исследований, касающихся модели прогнозирования движения нарастающего трафика в период запуска платной дороги, а также представлена и продемонстрирована модель дезагрегации на основе агентской модели и имитационного моделирования по методу Монте-Карло. В статье Jin Y., Gao Y., Wang P., Wang J., Wang L. [9], на примере ПВП платной дороги «Хесизай» в г. Сиань, Китай, авторами предложена модель прогнозирования транспортного потока в зоне ПВП для расчета работы количества полос, производящих сбор платы с помощью кассиров-операторов. Работа Neuholda R., Garollab F., Sidlab O., Fellendorfa M. [15] описывает модель краткосрочного и среднесрочного прогнозирования на платной дороге А-13 «Шенберг», г. Тироль, Австрия, способствующую

оптимизации управления оператором, а также оптимизации транспортного потока в зоне ПВП путем выработки системы автоматической навигации водителей на ПВП, основанной на результатах прогноза. Статья Odeck J., Welde M. [17] посвящена анализу и расчету точности прогнозирования интенсивностей движения на платных дорогах Норвегии. Задача краткосрочного прогнозирования трафика на сети платных дорог Греции, на основе комбинированно госсингулярного спектрального анализа с искусственными нейронными сетями описана в статье Kolidakis S., Botzoris G., Profillidis V., Lemonakis P. [12]. В статье Rota V. C. R., Simica M. [19] произведен обзор различных технологий оплаты проезда через ПВП, применительно к рассматриваемой ими платной автомобильной дороги А-35 «Брешиа-Бергамо-Милан», Италия. Авторы подчеркивают перспективность активного внедрения автоматических способов оплаты проезда, в том числе с помощью ЭСРП, для обеспечения требуемой пропускной способности ПВП и образования пробок в пиковые часы.

Использование различных технических подходов к оценке потока представлены в работах [2, 23]. В статье Weng J., Yuan R., Wang R., Wang C. [23] авторами предложена модель расчета скорости движения ТС, основанная на данных ЭСРП (транспондерах), закрепленных в ТС пользователей, проезжающих через ПВП на сегментах платной дороги. Статья Bickel P. J., Chen C., Kwon J., Rice J., Zwet E.V., Varaiya P. [2] описывает модель для оценки интенсивности трафика, а также измерений параметров скорости и длины проезжающих ТС на основании данных, собранных при помощи индуктивных детекторов транспорта, вмонтированных в дорожное полотно.

Несмотря на значительный объем накопленного зарубежного научного опыта в области платных дорог, развитие базы отечественных исследований в области реализации инфраструктурных проектов, учитывающих специфику проектирования, строительства и эксплуатации объектов, будет способствовать созданию нормативной базы и закреплению успешных применяемых практик.

Отдельного внимания в изучении транспортных данных должно уделяться платным дорогам внутригородского типа.

Расположенные в условиях и без того стесненной городской инфраструктуры, новые трассы вынужденно размещаются либо на верхних (мостовые конструкции, эстакады), либо нижних (в тоннелях) уровнях по отношению к существующей УДС. По сравнению с бесплатными городскими дорогами-дублёрами, они имеют современное технологическое оснащение, лучшее качество покрытия дорожного полотна, и обеспечивают наибольшую скорость при перемещении в черте города. Обеспечивая возможность перемещения по городу без остановок на светофорах и

заторов, внутригородские платные дороги играют большую транспортно-логистическую и социальную роль в городской инфраструктуре.

1. Постановка задачи

Хорошим примером внутригородской платной дороги является Западный Скоростной Диаметр (далее – ЗСД) в г. Санкт-Петербурге. Будучи одним из первых отечественных проектов платных дорог, за 12 лет с момента ввода в эксплуатацию первого участка, ЗСД перестал быть источником негативного отношения со стороны горожан, став неотъемлемой частью транспортно-логистической инфраструктуры для мобильных слоев населения и организаторов перевозок. ЗСД проходит по Южной, Центральной и Северной частям города, и имеет присоединения к Кольцевой автомобильной дороги Санкт-Петербурга (с Юга и Севера), выход на Скандинавское шоссе (с Севера), а также подключения к УДС Московского, Кировского, Василеостровского и Приморского районов в 7-ми точках.

Требованиям качественного содержания и эксплуатации транспортных систем автомобильной дороги, включая СВП, должно уделяться особое внимание. В случае возникновения затруднений прохождения транспортного потока через ПВП, подключающему ЗСД к УДС, возникший затор может затруднить дорожное движение за пределами транспортной завязки, парализовав прилегающую УДС.

Одним из примыканий, представляющим интерес для рассмотрения, является съезд и заезд на ЗСД на Богатырском проспекте Приморского района. Согласно официальной статистике Управления Федеральной службы государственной статистики по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области, численность постоянного населения Приморского района по состоянию на 1 января 2019 года составляет 568 516 человек, что определяет данный район как самый большой по численности населения район г. Санкт-Петербурга. Поскольку район является «спальным», то основными для него являются трудовые корреспонденции «работы-дом» и «дом-работа». Таким образом, основные нагрузки на ПВП, расположенном на Богатырском проспекте, будут приходиться на утренние (по направлению в центр) и вечерние (по направлению из центра) часы пик. Оценка суточной интенсивности движения в зоне ПВП на Богатырском проспекте позволит определить возможность возникновения затора в течение суток в недельном цикле. Также данная оценка позволит определить значения максимальной и минимальной суточной интенсивности и проанализировать наиболее и наименее загруженные дни в течение недели. На основании данных об интенсивности может быть построена функция интенсивности трафика ПВП в зависимости от времени суток. ПВП на Богатырском проспекте имеет стесненные условия

для въезда/выезда (количество полос при въезде/выезде сужается до двух) и является хорошим примером для изучения интенсивности движения и её суточных колебаний. Построение математической модели, описывающей интенсивность движение на ПВП является вспомогательным результатом при планировании движения на платной дороге в целом.

2. Пример. Оценка суточной интенсивности ПВП «Богатырский пр./Планерная ул., съезд»

2.1. Подготовка данных

Данные получены путем визуального подсчета проезжающих ТС через ПВП с расположенной на ней онлайн-камеры с веб-сайта оператора дороги ЗСД ООО «Магистраль северной столицы» [26] в течение октября и ноября 2019 года. Подсчитывалось количество проезжающих средств в течение 10-15 минут, результаты приводились к показателю количества машин в час, соответствующие подсчеты проводились для всех дней недели и промежутков времени, составляющих 24 астрономических часа. Результаты, полученные для одного и того же дня недели и времени суток усреднялись. В рассматриваемый период времени не наблюдалось значительных колебаний трафика, связанных с проведением крупных городских культурно-массовых мероприятий, которые бы могли внести серьезные погрешности в недельный цикл трафика.

На рисунке 1 показан график интенсивности движения на ПВП «Богатырский пр./Планерная ул., съезд» на недельном промежутке времени (168 часов) от момента времени 0-00 в понедельник до момента времени 24-00 в воскресенье.

Очевидно, что интенсивность движения в рабочие дни можно считать повторяющейся (периодической) и отличной от интенсивности выходных дней (тоже периодической, но по соответствующим выходным дням недели). Наибольший интерес для исследования представляют рабочие дни, при которых образуются пиковые значения интенсивности движения на ПВП, что видно из рисунка 1. Далее рабочие и выходные дни будут рассматриваться отдельно.

Пусть $f(t)$ – некоторая функция, показывающая интенсивность движения на ПВП в момент времени t .

Будем приближать наблюдения суммой n первых слагаемых тригонометрического ряда функции $f(t)$ вида:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \times \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t + \varphi_k\right),$$

где a_k – амплитуда k -го гармонического колебания,

$k \frac{2\pi}{\tau}$ – круговая частота k -го гармонического колебания,
 φ_k – начальная фаза k -го гармонического колебания.

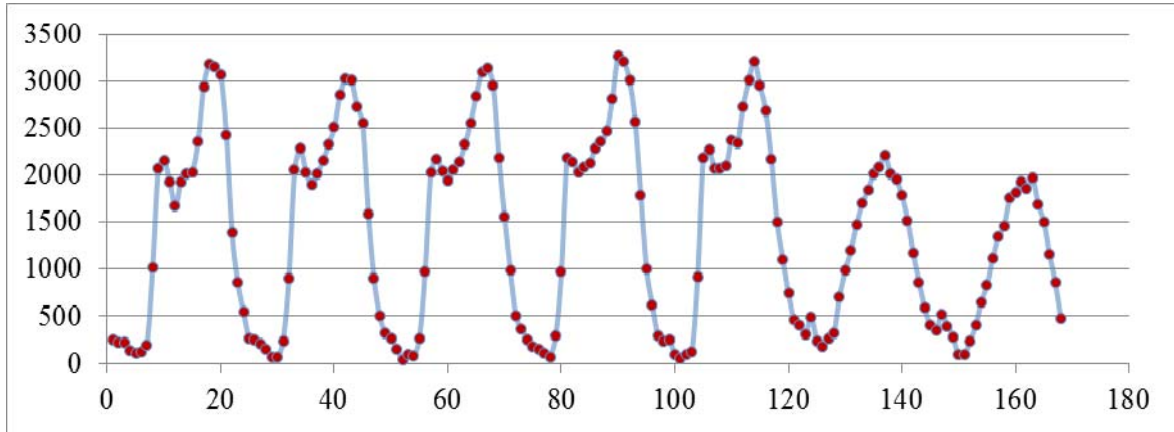


Рис. 1. График интенсивности движения на ПВП «Богатырский пр./Планерная ул., съезд» на недельном промежутке времени (168 часов) от момента времени 0-00 в понедельник до момента времени 24-00 в воскресенье (октябрь, ноябрь 2019 г.)

Так как:

$$\cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t + \varphi_k\right) = \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right) \cos(\varphi_k) - \sin\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right) \sin(\varphi_k)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \times \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t + \varphi_k\right) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n A_k \times \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right) + \sum_{k=1}^n B_k \times \sin\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right), \quad (1)$$

где $A_k = a_k \times \cos(\varphi_k)$, $B_k = b_k \times \sin(\varphi_k)$.

Поскольку известен период времени, известен период искомой периодической функции (24 часа), и известны наблюдаемые значения трафика, мы можем оценить значения коэффициентов $\frac{a_0}{2}$, A_k , B_k . При этом правая часть равенства (1) линейна по коэффициентам. Возникает вопрос: на каком количестве слагаемых следует ограничиться при создании модели, т. к. очевидно, что с ростом n должна увеличиваться точность модели, с другой стороны увеличение числа слагаемых ведет к большому числу вычислений, большому числу коэффициентов и затрудненному использованию модели в возможных дальнейших расчетах. Поскольку модель линейна по коэффициентам можно количество слагаемых (k)

определить, исходя из качества регрессионных моделей для разных значений k .

2.2. Рабочие дни

Полученные эмпирические наблюдения еще раз были усреднены по пяти рабочим дням. Таким образом, рассматриваем 24 промежутка времени длиной 1 час в течение рабочих суток. На рисунке 2 показаны эмпирические линии интенсивности для рабочих дней и их среднее значение.

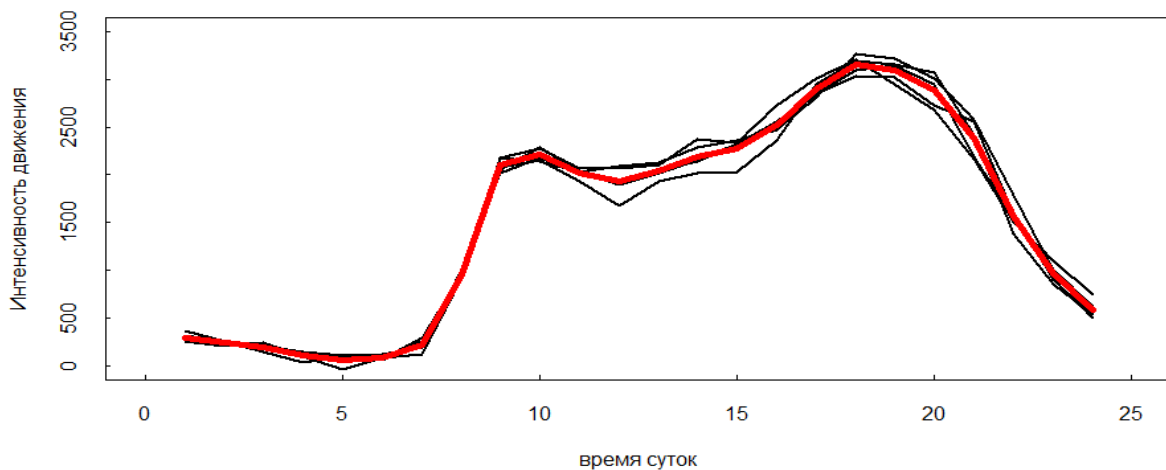


Рис. 2. Эмпирические линии интенсивности для рабочих дней (с понедельника по пятницу) и их среднее значение

Введем вспомогательные переменные

$$x(t) = \cos\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right) y(t) = \sin\left(k \frac{2\pi}{\tau} t\right).$$

Модель вида (1) принимает вид:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n A_k \times x(t) + \sum_{k=1}^n B_k \times y(t) \quad (2)$$

Модель (2) с ограниченным числом слагаемых содержит нечетное количество коэффициентов: свободное слагаемое и четное количество коэффициентов при тригонометрических функциях.

Количество наблюдений в дневном периоде – 24. Максимально возможное количество коэффициентов для применения стандартной библиотечной функции `lm` статистического пакета R – 23 ($1 + 11 \times 2$).

На рисунке 3 показаны точки, соответствующие средним наблюдаемым значениям и аппроксимирующая линия вида (2) для модели с 23 коэффициентами и $\sum \text{tagu}$ функции \ln , характеризующие качество модели. На рисунках 4, 5 показаны аналогичные результаты для модели с 17 и 9 коэффициентами.

На рисунках 3 – 5 видно, что при уменьшении количества оцениваемых коэффициентов высокие статистические характеристики модели сохраняются довольно долго. Естественно, при этом визуальное качество соответствия аппроксимирующей функции наблюдаемым данным снижается. Для дальнейших расчетов была выбрана модель с 17 коэффициентами. Значения коэффициентов этой модели (для усредненных значений интенсивностей в рабочие дни) показаны на рисунке 4. Аналогичным образом можно подобрать модель типа (2) для каждого дня недели. Результаты показаны на рисунке 6.

Относительная точность аппроксимации показана в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что подобранные модели отличаются высокой степенью точности в периоды высокой интенсивности движения. Значительные ошибки аппроксимации наблюдаются только во время низкой интенсивности движения (с 03-00 до 06-00) и существенного значения не имеют, т. к. в это время интенсивность движения в рабочие дни не превышает 150 машин в час (57 – 137 машин), т. е. 5 машин в 2 минуты. В то же время значительный интерес представляют моменты времени с наибольшей интенсивностью движения (с 16-00 до 21-00 в рабочие дни). Максимальное значение интенсивности в эти периоды превосходит 3000 машин в час, т. е. 50 машин в минуту, на одну машину приходится 1,2 секунды. Очевидно, что в эти периоды ПВП работает на максимально возможной пропускной способности (наблюдения относятся к исходящему потоку). Очередь на обслуживание в эти периоды времени значительно растет.

Пока не представляется возможным подсчет интенсивности входного потока для прогнозирования длины и времени нахождения в очереди. Это является предметом отдельного исследования с применением имитационного моделирования.

```

Coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1542.583    5.367  287.438 0.00221 **
x[1, ]      -649.391    7.590  -85.563 0.00744 **
x[2, ]      -139.636    7.590  -18.398 0.03457 *
x[3, ]      -134.352    7.590  -17.702 0.03592 *
x[4, ]      -144.608    7.590  -19.053 0.03338 *
x[5, ]       103.944    7.590   13.696 0.04640 *
x[6, ]      -37.417    7.590   -4.930 0.12740
x[7, ]         5.824    7.590    0.767 0.58332
x[8, ]        46.992    7.590    6.192 0.10194
x[9, ]       -10.915    7.590   -1.438 0.38681
x[10, ]       -4.247    7.590   -0.560 0.67519
x[11, ]        9.989    7.590    1.316 0.41363
y[1, ]     -1235.532    7.590 -162.792 0.00391 **
y[2, ]     -392.604    7.590  -51.729 0.01231 *
y[3, ]       303.159    7.590   39.944 0.01593 *
y[4, ]       -30.239    7.590   -3.984 0.15655
y[5, ]       -37.448    7.590   -4.934 0.12730
y[6, ]        83.550    7.590   11.008 0.05767 .
y[7, ]       -42.704    7.590   -5.627 0.11197
y[8, ]       -12.254    7.590   -1.615 0.35302
y[9, ]         8.793    7.590    1.159 0.45333
y[10, ]      -25.496    7.590   -3.359 0.18419
y[11, ]       11.658    7.590    1.536 0.36740
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 26.29 on 1 degrees of freedom
Multiple R-squared: 1, Adjusted R-squared: 0.9994
F-statistic: 1799 on 22 and 1 DF, p-value: 0.0186

```

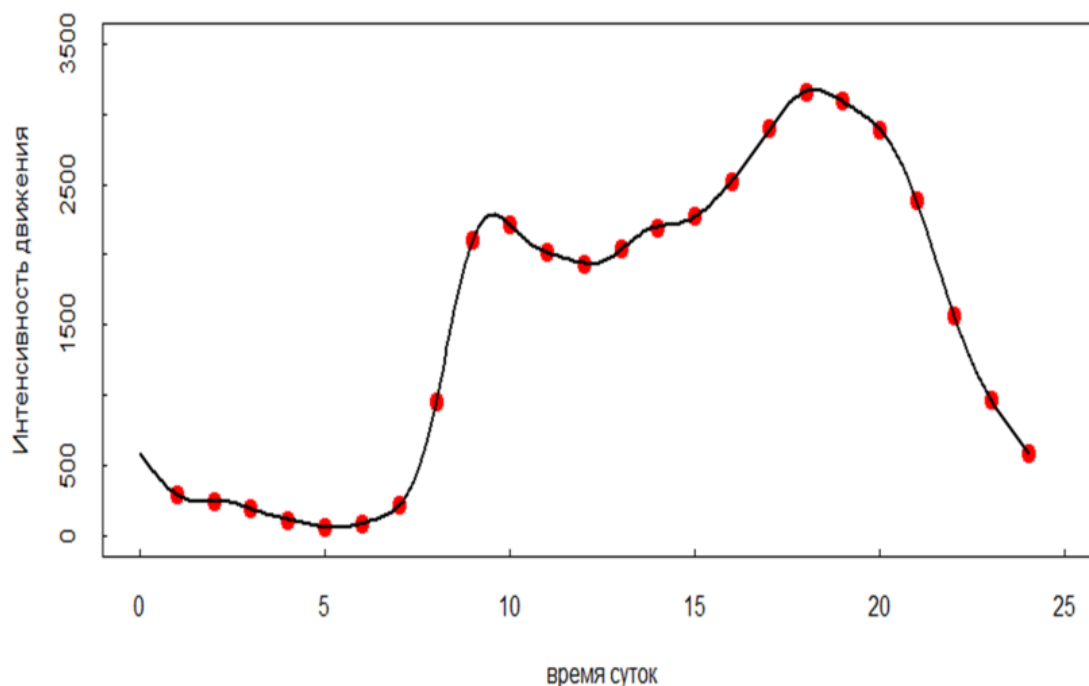


Рис. 3. Средние наблюдаемых значений (точки) и аппроксимирующая линия вида (2) для модели с 23 коэффициентами. Слева summary функции lm, характеризующие качество модели

```

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-52.843 -10.656  -0.114   11.227   60.104

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1542.583     9.094  169.627 6.53e-14 ***
x[1, ]      -649.391    12.861  -50.494 3.13e-10 ***
x[2, ]     -139.636    12.861  -10.857 1.24e-05 ***
x[3, ]     -134.352    12.861  -10.447 1.60e-05 ***
x[4, ]     -144.608    12.861  -11.244 9.83e-06 ***
x[5, ]      103.944    12.861   8.082 8.54e-05 ***
x[6, ]     -37.417    12.861   -2.909 0.022682 *
x[7, ]       5.824    12.861    0.453 0.664358
x[8, ]      46.992    12.861    3.654 0.008136 **
y[1, ]     -1235.532    12.861  -96.069 3.49e-12 ***
y[2, ]     -392.604    12.861  -30.527 1.04e-08 ***
y[3, ]      303.159    12.861   23.572 6.28e-08 ***
y[4, ]     -30.239    12.861   -2.351 0.050996 .
y[5, ]     -37.448    12.861   -2.912 0.022603 *
y[6, ]      83.550    12.861    6.496 0.000335 ***
y[7, ]     -42.704    12.861   -3.320 0.012756 *
y[8, ]     -12.254    12.861   -0.953 0.372409
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 44.55 on 7 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9995,    Adjusted R-squared:  0.9983
F-statistic:  861 on 16 and 7 DF,  p-value: 5.977e-10

```

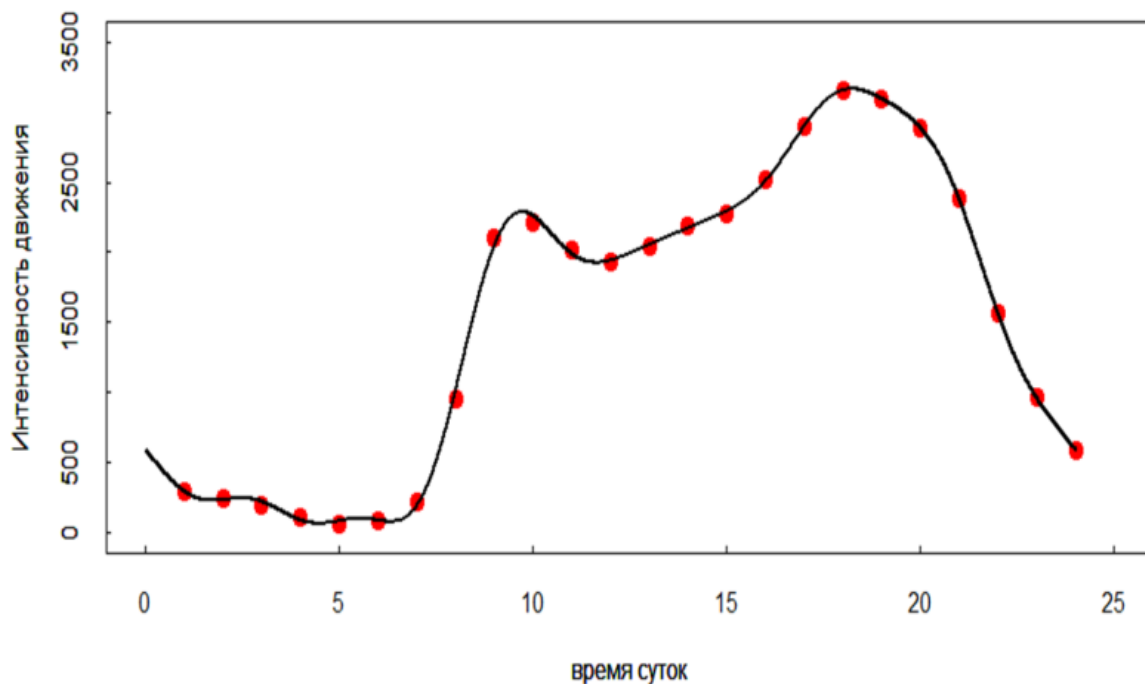


Рис. 4. Средние наблюдаемых значений (точки) и аппроксимирующая линия вида (2) для модели с 17 коэффициентами. Слева summary функции lm, характеризующие качество модели

```

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-203.40  -77.45    2.24   82.09  316.70

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1542.58     29.42   52.438 < 2e-16 ***
x[1, ]       -649.39     41.60  -15.610 1.10e-10 ***
x[2, ]       -139.64     41.60   -3.356 0.00433 **
x[3, ]       -134.35     41.60   -3.229 0.00561 **
x[4, ]       -144.61     41.60   -3.476 0.00339 **
y[1, ]      -1235.53     41.60  -29.699 9.65e-15 ***
y[2, ]       -392.60     41.60   -9.437 1.06e-07 ***
y[3, ]        303.16     41.60    7.287 2.67e-06 ***
y[4, ]       -30.24     41.60   -0.727 0.47851
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Residual standard error: 144.1 on 15 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9886, Adjusted R-squared: 0.9825
F-statistic: 162.8 on 8 and 15 DF, p-value: 3.635e-13

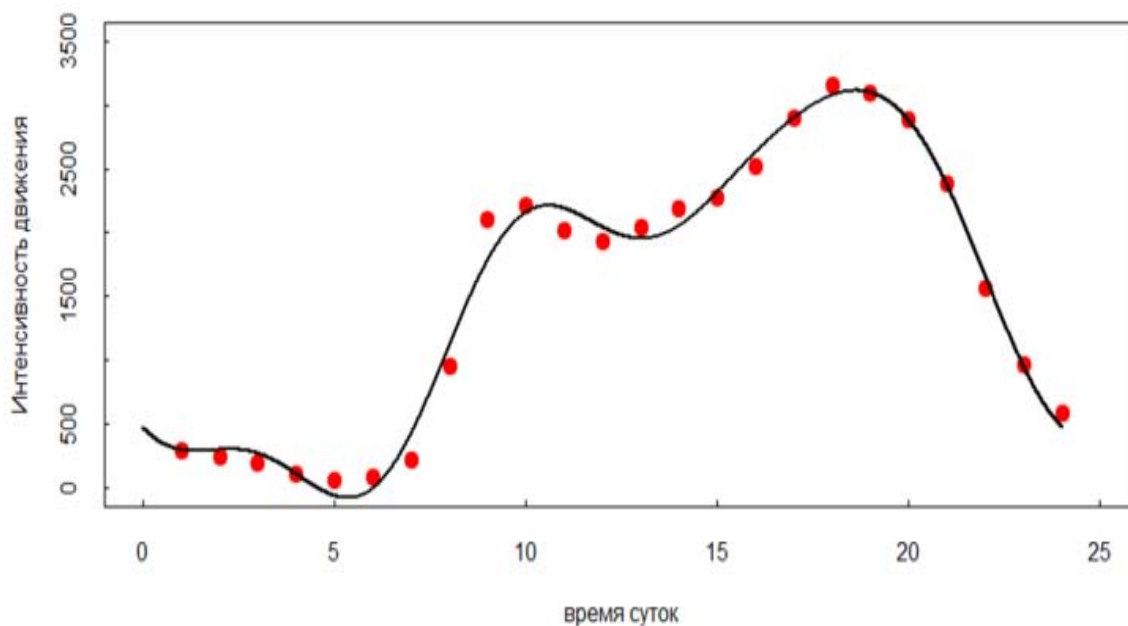


Рис. 5. Средние наблюдаемых значений (точки) и аппроксимирующая линия вида (2) для модели с 9 коэффициентами. Слева summary функции lm, характеризующие качество модели

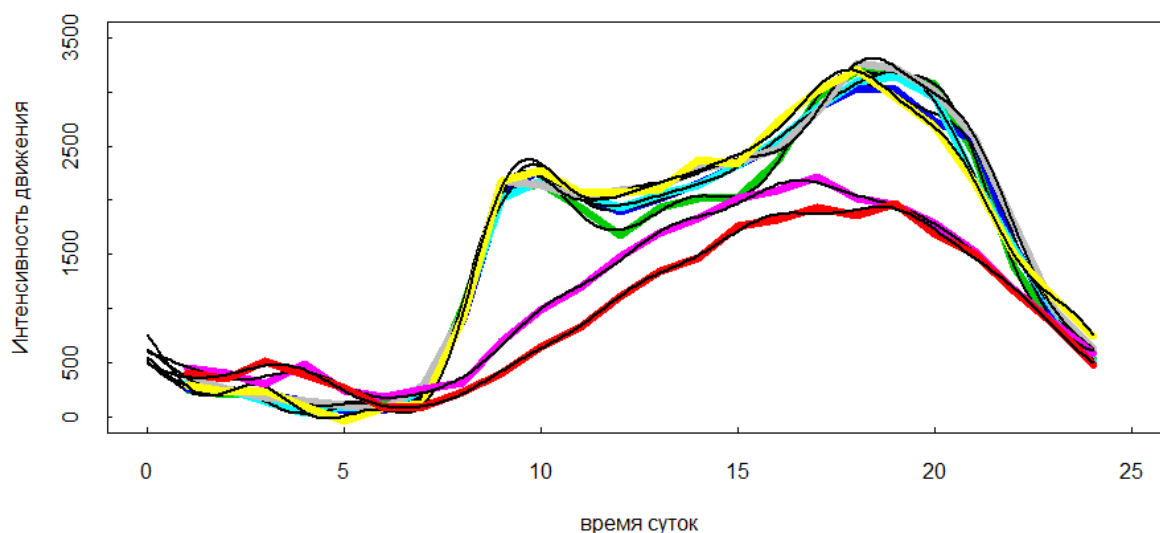


Рис. 6. Значения интенсивностей по дням недели (сверху рабочие дни с понедельника по пятницу, две нижние линии суббота и воскресенье) и их аппроксимирующие линии, построенные по модели (2) с 17 коэффициентами

Таблица 1

Относительная точность аппроксимации в процентах по дням недели и по времени суток

| | Понедельник | Вторник | Среда | Четверг | Пятница | Суббота | Воскресенье |
|-------------|-------------|---------|-------|---------|---------|---------|-------------|
| 00:00-01:00 | - 3 | 8 | - 8 | 0 | - 3 | - 9 | 2 |
| 01:00-02:00 | 0 | - 15 | 6 | - 7 | - 3 | 12 | - 11 |
| 02:00-03:00 | 4 | 17 | - 1 | 16 | 12 | - 8 | 23 |
| 03:00-04:00 | - 15 | - 13 | - 18 | - 19 | - 50 | 10 | - 15 |
| 04:00-05:00 | 23 | - 5 | 4 | 4 | - 129 | - 10 | 20 |
| 05:00-06:00 | - 17 | 40 | 16 | 49 | - 34 | 17 | - 3 |
| 06:00-07:00 | 2 | - 16 | - 13 | - 26 | - 5 | 1 | - 13 |
| 07:00-08:00 | 2 | 5 | 5 | 10 | 5 | - 6 | 16 |
| 08:00-09:00 | - 2 | - 2 | - 3 | - 4 | - 3 | 5 | - 6 |
| 09:00-10:00 | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | - 3 | 1 |
| 10:00-11:00 | - 3 | - 1 | - 1 | - 1 | - 1 | 2 | 1 |
| 11:00-12:00 | 3 | 1 | 1 | - 1 | - 1 | - 0 | - 2 |
| 12:00-13:00 | - 2 | - 0 | - 0 | 2 | 3 | - 1 | 1 |
| 13:00-14:00 | 1 | - 0 | 0 | - 2 | - 4 | 2 | 1 |
| 14:00-15:00 | 0 | 0 | - 1 | 1 | 4 | - 2 | - 2 |
| 15:00-16:00 | - 0 | 0 | 1 | - 0 | - 2 | 3 | 3 |
| 16:00-17:00 | 0 | - 1 | - 0 | 0 | 1 | - 3 | - 2 |
| 17:00-18:00 | - 0 | 1 | - 1 | - 0 | - 1 | 3 | 2 |
| 18:00-19:00 | - 0 | - 2 | 1 | 1 | 0 | - 2 | - 1 |
| 19:00-20:00 | 0 | 3 | - 2 | - 1 | - 0 | 3 | - 0 |
| 20:00-21:00 | - 0 | - 3 | 2 | 1 | 1 | - 2 | - 0 |
| 21:00-22:00 | 1 | 4 | - 1 | - 1 | - 1 | 3 | 2 |
| 22:00-23:00 | - 1 | - 4 | - 0 | - 0 | - 0 | - 4 | - 3 |
| 23:00-00:00 | 2 | 1 | 4 | 1 | 1 | 7 | 3 |

Заключение

Для автоматизированных расчетов в задачах управления движением на платных дорогах могут быть использованы модели вида (1) с ограниченным числом слагаемых тригонометрического ряда, так как интенсивность движения носит периодический характер. Основываясь на исторических данных, такие модели позволяют довольно точно прогнозировать интенсивность движения на введенных в эксплуатацию платных дорогах. Применение прогнозных данных интенсивности движения на ПВП в операторской деятельности платных дорог позволит повысить эффективность эксплуатации и обслуживания объекта транспортной инфраструктуры, принимать превентивные меры по снижению пиковой нагрузки на ПВП в часы-пик, производить своевременную модернизацию системы взимания платы для увеличения пропускной способности пункта оплаты.

Полученные результаты исследования также могут быть применены для создания имитационной модели обслуживания пользователей на пункте оплаты проезда. Дальнейшее использование процессного подхода моделирования транспортного потока на ПВП позволит добиться еще большей точности в прогнозировании интенсивностей, и выработки новых методик повышения эффективности управления платной дорогой.

Список литературы

1. Anas R., Sembiring I. S. Study of determining the toll fare for the Yogyakarta-Solo corridor // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1376.
2. Bickel P. J., Chen C., Kwon J., Rice J., van Zwet E., Varaiya P. Measuring Traffic // *Statistical Science*. 2007. Vol. 22. № 4. Pp. 581–597.
3. Cipriani E., Mannini L., Montemarani B., Nigro M., Petrelli M. Congestion pricing policies: Design and assessment for the city of Rome, Italy // *Transport Policy*. 2019. Vol. 80. Pp. 127–135.
4. Dharmawan W. I., Sjafruddin A., Frazila R.B., Zukhruf F. Developing model of toll road traffic forecasting during ramp-up period // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 270. 03016. Pp. 1–7.
5. Glavic D., Mladenovic M., Luttinen T., Cicevic S., Trifunovic A. Road to price: User perspectives on road pricing in transition country // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Elsevier, 2017. Vol. 105(C). Pp. 79–94. DOI: 10.1016/j.tra.2017.08.016.
6. Guo Q., Sun Y., Li Z.-C., Li Z. An integrated model for road capacity choice and cordon toll pricing // *Research in Transportation Economics*. 2017. Vol. 62. Pp. 68–79.
7. Guo X., Yang H. Pareto-improving congestion pricing and revenue refunding with multiple user classes // *Transportation Research Part B: Methodological*. Elsevier, 2010. Vol. 44. Pp. 972–982. DOI: 10.1016/j.trb.2009.12.009.
8. Hamilton C.J. Revisiting the cost of the Stockholm congestion charging system // *Transport Policy*. 2011. Vol. 18. Pp. 836–847.

9. Jin Y., Gao Y., Wang P., Wang J., Wang L. Improved Manpower Planning Based on Traffic Flow Forecast Using a Historical Queuing Model // *IEEE Access*. 2019. Pp. 125101–125112.
10. Jaworski P., Liberadzki K., Liberadzki M. Principles of the toll roads pricing // *Archives of Transport*. 2018. Vol. 45 (1). Pp. 53–62.
11. Jou R.-C., Chiou Y.-C., Chen K.-H., Tan H.-I. Freeway drivers' willingness-to-pay for a distance-based toll rate // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, 2012. Vol. 46(3), Pp. 549–559. DOI: 10.1016/j.tra.2011.11.012.
12. Kolidakis S., Botzoris G., Profillidis V., Lemonakis P. Road traffic forecasting – A hybrid approach combining Artificial Neural Network with Singular Spectrum Analysis // *Economic Analysis and Policy*. 2019. Vol. 64. Pp. 159–171.
13. Langmyhr T. Managing equity: The case of road pricing // *Transport Policy*. 1997. Vol. 4. № 1. Pp. 25–39.
14. Lin X., Li M., He F. Nonlinear pricing in linear cities with elastic demands // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Elsevier, 2018. Vol. 95. Pp. 616–635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.08.005>.
15. Neuholda R., Garollab F., Sidlab O., Fellendorfa M. Predicting and Optimizing Traffic Flow at Toll Plazas // *Transportation Research Procedia*. 2019. № 37. Pp. 330–337.
16. Odeck J., Kjekreit A. Evidence on users' attitudes towards road user charges – A cross-sectional survey of six Norwegian toll schemes // *Transport Policy*. 2010. Vol. 17. Pp. 349–358.
17. Odeck J., Welde M. The accuracy of toll road traffic forecasts: An econometric evaluation // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Elsevier, 2017. Vol. 101. Pp. 73–85. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.001.
18. De Palma A., Lindsey R. Traffic congestion pricing methodologies and technologies // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Elsevier, 2011. Vol. 19. Pp. 1377–1399. DOI: 10.1016/j.trc.2011.02.010.
19. Rota B.C.R., Simica M. Traffic Flow Optimization on Freeways // *Procedia Computer Science*. 2016. № 96. Pp. 1637–1646.
20. Triantafyllos D., Illeraa C., Djukica T., Casasa J. Dynamic congestion toll pricing strategies to evaluate the potential of route-demand diversion on toll facilities // *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 41. Pp. 731–740.
21. Tsekeris T., Vo S. Design and evaluation of road pricing: state-of-the-art and methodological advances // *Netnomics*. 2009. № 10. Pp. 5–52.
22. Zangui M., Aashtiani H. Z., Lawphongpanich S., Yin Y. Path-differentiated pricing in congestion mitigation // *Transportation Research Part B: Methodological*. Elsevier, 2015. Vol. 80. Pp. 202–219.
23. Weng J., Yuan R., Wang R., Wang C. Freeway Travel Speed Calculation Model Based on ETC Transaction Data // *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2014. № 2. Pp. 1–8.
24. Домбалян А.В., Галкина Г.А. Особенности методов моделирования на платных дорогах // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 4 (27). С. 168.
25. Гасилов В.В., Уварова С.С., Целковнев Д.А. Методика прогнозирования спроса на проезд по платной автодороге // *ФЭС: Финансы. Экономика*. 2010. № 6. С. 10а–14.

26. Онлайн-камеры. Северный участок ЗСД. Богатырский пр./Планерная ул., съезд [Электронный ресурс] // Официальный интернет-сайт оператора ООО «Магистраль северной столицы». URL: <https://nch-spb.com/travel/cameras/> (дата обращения: 01.10.2019).

27. Пирон В., Федотов А.А. Прогнозирование интенсивности движения на платных автомобильных дорогах // Транспорт Российской Федерации. 2011. № 5 (36). С. 36–39.

28. Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах. М.: Министерство транспорта Российской Федерации; Государственная служба дорожного хозяйства (Росавтодор), 2003.

29. Сапрыкина О.В., Сапрыкин О.Н., Михеева Т.И. Построение прогноза интенсивности движения транспортного потока // В сборнике: ITIDS + RRS'2014 Proceedings of the 2nd International Conference "Information Technologies for Intelligent Decision Making Support". 2014. С. 77–82.

30. СТО АВТОДОР 2.2-2013. Проектирование, строительство, эксплуатация автомобильных дорог. Рекомендации по прогнозированию интенсивности дорожного движения на платных участках автомобильных дорог государственной компании «Автодор» и доходов от их эксплуатации. М.: Стандарт Государственной компании «Автодор», 2013.

УДК 519.876.5

doi:10.18720/SPBPU/2/id20-176

*Свистунова Александра Сергеевна*¹,
младший научный сотрудник СПИИРАН;
*Хасанов Дмитрий Салимович*²,
программист СПИИРАН;
*Кравец Даниил Михайлович*³,
студент СПбПУ

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССАЖИРОПОТОКА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ВОКЗАЛЕ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ANYLOGIC

^{1,2} Санкт-Петербургский Института Информатики и Автоматизации
Российской Академии Наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Россия

^{1,3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия,

¹ svistunova_alexandra@bk.ru, ³ danilkravets@yandex.ru

Аннотация. Данная статья отражает принципы реализации и корректировки процессов с использованием имитационного моделирования. В качестве рассматриваемого примера используется железнодорожный вокзал, сервис которого базируется на тенденциях развития крупных мировых ж/д вокзалов. Производится анализ проблемных мест в процедуре обслуживания пассажиров путем реорганизации структуры и алгоритмов работы с использованием программного обеспечения AnyLogic. Предложены возможные варианты устранения скопления людей.