

УДК 629.3

DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_85
EDN GLRIVV

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В КРУПНОМ ГОРОДЕ ПУТЕМ АНАЛИЗА GPS-ТРЕКОВ МАРШРУТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

М.Е. ЕлисеевORCID: 0000-0002-8522-899X e-mail: eliseevmic@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Л.Н. Ерофеева**ORCID: 0000-0001-6535-1459 e-mail: erofeevaln@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***И.Н. Елисеева**ORCID: 0000-0002-7141-0707 e-mail: eliseevair@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.С. Баранова**ORCID: 0000-0001-5419-0223 e-mail: buganvil0805@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассматривается подход к определению параметров подвижности транспортных средств в крупном городе. По трекам движения автобусов выбранного маршрута вычисляется время движения каждого из транспортных средств между конечными остановками для всех рейсов. Для аппроксимации полученных точек замеров рассматриваются различные классы функций и выбирается оптимальный из них. В качестве основного метода исследования выбран метод наименьших квадратов. Полученная математическая модель зависимости времени рейса от времени суток для автобусного маршрута используется для определения зависимости скорости движения транспортных средств по магистральным городским дорогам. Разработан алгоритм анализа GPS-трека и компьютерная программа, его реализующая. Представляется перспективным использование данного подхода в интеллектуальной транспортной системе крупного города. Динамическое определение параметров подвижности на магистральных городских дорогах может быть применено для косвенного управления транспортными потоками и при составлении оптимальных расписаний движения маршрутных транспортных средств.

Ключевые слова: подвижность транспортных средств; навигация; автобусный маршрут; анализ GPS-трека; математическое моделирование; моделирование методом наименьших квадратов; интеллектуальная транспортная система.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Елисеев, М.Е. Определение параметров подвижности транспортных средств в крупном городе путем анализа GPS-треков маршрутных транспортных средств / М.Е. Елисеев, Л.Н. Ерофеева, И.Н. Елисеева, М.С. Баранова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 85-94.
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_85 EDN: GLRIVV

DETERMINING VEHICLE MOBILITY PARAMETERS IN LARGE CITY BY ANALYZING GPS TRACKS OF PUBLIC TRANSPORT VEHICLES

M.E. Eliseev

ORCID: **0000-0002-8522-899X** e-mail: **eliseevmic@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

L.N. Erofeeva

ORCID: **0000-0001-6535-1459** e-mail: **erofeevaln@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

I.N. Eliseeva

ORCID: **0000-0002-7141-0707** e-mail: **eliseevair@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.S. Baranova

ORCID: **0000-0001-5419-0223** e-mail: **buganvil0805@gmail.com**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses an approach to determining the parameters of vehicle mobility in a large city. The travel time of each bus between the final stops for all trips is calculated based on the bus tracks of the selected route. Different classes of functions are considered to approximate the obtained measurement points and the optimal one is selected. The least squares method is chosen as the main research method. The developed mathematical model of the dependence of the trip time on the time of day for a bus route is used to determine the dependence of vehicles speed on urban arterial road. An algorithm for analyzing GPS tracks and a computer program implementing it have been developed. It seems promising to use this approach in the intelligent transport system of a large city. Dynamic determination of mobility parameters on urban arterial road can be used for indirect control of traffic flows and for creating optimal schedules for public transport vehicles.

Key words: vehicle mobility; navigation; bus route; GPS track analysis; mathematical modeling; least squares modeling; intelligent transport system.

FOR CITATION: M.E. Eliseev, L.N. Erofeeva, I.N. Eliseeva, M.S. Baranova. Determining vehicle mobility parameters in large city by analyzing GPS tracks of public transport vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 85-94. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_85 EDN: GLRIVV

Введение

Подвижность транспортных средств (ТС) на магистралях крупного города меняется в зависимости от времени суток, месяца, дня недели, погоды и других факторов. Тем не менее, накопленные исторические данные о подвижности ТС на городских магистралях позволяют дать достаточно точный ее прогноз. Ввиду того, что сеть маршрутного транспорта охватывает всю сеть магистральных городских улиц и дорог, одним из методов оценки характеристик подвижности ТС может являться оценка неравномерности времени рейса маршрутного транспортного средства в зависимости от дня недели и времени суток. В ранние утренние и поздние вечерние часы дороги практически свободны, и маршрутные транспортные средства (МТС) могут передвигаться с высокой средней скоростью. В утренний и вечерний час пик загрузка улично-дорожной сети (УДС) резко увеличивается, средняя скорость движения МТС падает, соответственно время рейса возрастает. В межпиковый период (дневное время) загрузка УДС меньше, чем в часы пик, но выше, чем ранним утром и поздним вечером, соответственно, время рейса имеет средние значения.

Прогнозирование времени прибытия автобуса рассматривается в ряде работ [1-10]. Для него используются исторические данные и данные реального времени [2, 3, 7]. Исторические данные (навигационные отметки) – набор геокоординат, данные смарт-карт [10] или фиксация времени на некоторых контрольных точках [7]. Также прогноз может осуществляться на основании скорости движения автобуса [9]. Для составления прогноза часто используются нейросети [3-5]. Авторам представляется перспективным также модельный подход, в частности, т.н. агентное моделирование [11]. Для моделирования сети общественного транспорта и составления реальных расписаний движения автобусов (или др. МТС) необходимо знать время движения автобуса между конечными остановочными пунктами в течение суток [12].

В данной работе рассматривается простейший вариант организации маршрута, когда имеются два конечных остановочных пункта, и маршрут в прямом и обратном направлении одинаков. Далее для краткости конечные остановочные пункты будут именоваться: первая конечная и вторая конечная. Без существенных изменений подход, рассмотренный в данной работе, может быть перенесен на остальные варианты маршрутов (кольцевые, с большим числом конечных и т.п.).

Целью исследования является получение функций $T_{12}(t)$ и $T_{21}(t)$, где $T_{12}(t)$ – функция времени движения от первой конечной до второй в течение суток, $T_{21}(t)$ – функция времени движения от второй конечной до первой в течение суток.

Материалы и методы

В качестве исходных данных используются треки движения автобусов в формате *.csv. Файл представляет собой набор строк, каждая из которых содержит информацию о идентификаторе ТС, геокоординатах ТС (долгота и широта), времени нахождения ТС в данной точке и скорости ТС. Разделителями полей служат знаки «;», что является стандартным для файлов данного формата. Ввиду того, что навигационной системой должно быть оборудовано каждое МТС, имеется фактически полная информация о движении автобусов по маршруту (табл. 1), за исключением редких случаев сбоя работы навигационной системы.

Таблица 1.
Фрагмент таблицы исходных данных – треков движения автобусов исследуемого маршрута (файла формата *.csv)

Table 1.
A fragment of the table with initial data – bus movement tracks for the route under study (*.csv file)

ИД	Время	Широта	Долгота	Скорость
8316002	2020-06-04 20:11:00	56.308599	44.023083	17.0
8316021	2020-06-04 20:11:00	56.28155	44.052617	0.0
8316027	2020-06-04 20:11:00	56.300033	44.032	26.0
8316026	2020-06-04 20:11:00	56.336133	43.94125	15.0
8316011	2020-06-04 20:11:00	56.2816833	44.052517	0.0
8316025	2020-06-04 20:11:00	56.2816	44.052617	0.0
8316019	2020-06-04 20:11:00	56.330667	43.995667	17.0
8316014	2020-06-04 20:11:00	56.335383	43.9080177	0.0

Для обработки данных используются методы работы с базами данных, в частности, динамические SQL-запросы, авторский алгоритм обработки данных, приводимый ниже. Для построения математической модели используется аппарат математической статистики и регрессионный анализ, в частности, метод наименьших квадратов для подбора аппроксимиру-

ющей функции. Последний метод находит широкое применение в моделировании различных технических процессов и систем.

Коротко суть метода такова: имеется набор из k точек (x_i, y_i) , рассматривается класс аппроксимирующих функций $y = f(x)$ и строится функция:

$$F(a_1, a_2, \dots, a_k) = \sum_{i=1}^k (f(x_i) - y_i)^2, \quad (1)$$

где a_i – параметры аппроксимирующей функции.

Далее ищется минимум функции $F(a_1, a_2, \dots, a_k)$, для чего она дифференцируется по каждому из независимых аргументов и составляется система уравнений:

$$\begin{cases} F'_{a_1}(a_1, a_2, \dots, a_k) = 0 \\ F'_{a_2}(a_1, a_2, \dots, a_k) = 0 \\ \dots \\ F'_{a_k}(a_1, a_2, \dots, a_k) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему (2), находим значения параметров a_i и получаем функцию из данного класса функций, которая наилучшим образом соответствует набору данных точек в соответствии с методом наименьших квадратов. Подробное описание метода наименьших квадратов можно найти в [13], где дан всесторонний обзор исследований, связанных с этим методом.

При получении исходного набора точек, в случае их чрезмерного количества (большого количества МТС на маршруте) могут использоваться не все треки, а определенная их выборка, отвечающая требованию репрезентативности. Функция времени движения для одного маршрута в течение года также могут отличаться, поэтому для получения достаточно точных результатов необходимо использовать репрезентативную выборку анализируемых дней.

Результаты

Как указывалось выше, информацию о движении автобусов получаем в виде треков бортового навигатора в формате *.csv. Фактически это точки вида (x_i, y_i, t_i, V_i) , где x_i – широта, y_i – долгота, t_i – время, V_i – скорость.

Алгоритм получения искомого набора точек (t_i, T_i) следующий:

- 1) определяем геокоординаты конечных остановок (a_1, b_1) и (a_2, b_2) по векторной карте города, например, OpenStreetMap;
- 2) окружаем кругом радиусом 50 м каждую из конечных, далее данные круги будем называть зонами 1 и 2 конечных;
- 3) полагаем, что точка (x_i, y_i, t_i, V_i) находится внутри зоны j -конечной, если выполняется неравенство:

$$\sqrt{(a_j - x_i)^2 + (b_j - y_i)^2} \leq 50, \quad (3)$$

- 4) сортируем строки по id (идентификатору ТС) и по времени;

5) выбираем такие пары соседних строк, чтобы первой отвечала точка внутри круга, второй – вне круга, соответственно, получаем время отправления от каждой из конечных или время прибытия на конечную.

Данный алгоритм реализовывался с помощью программы, работа которой показана на рис. 1.

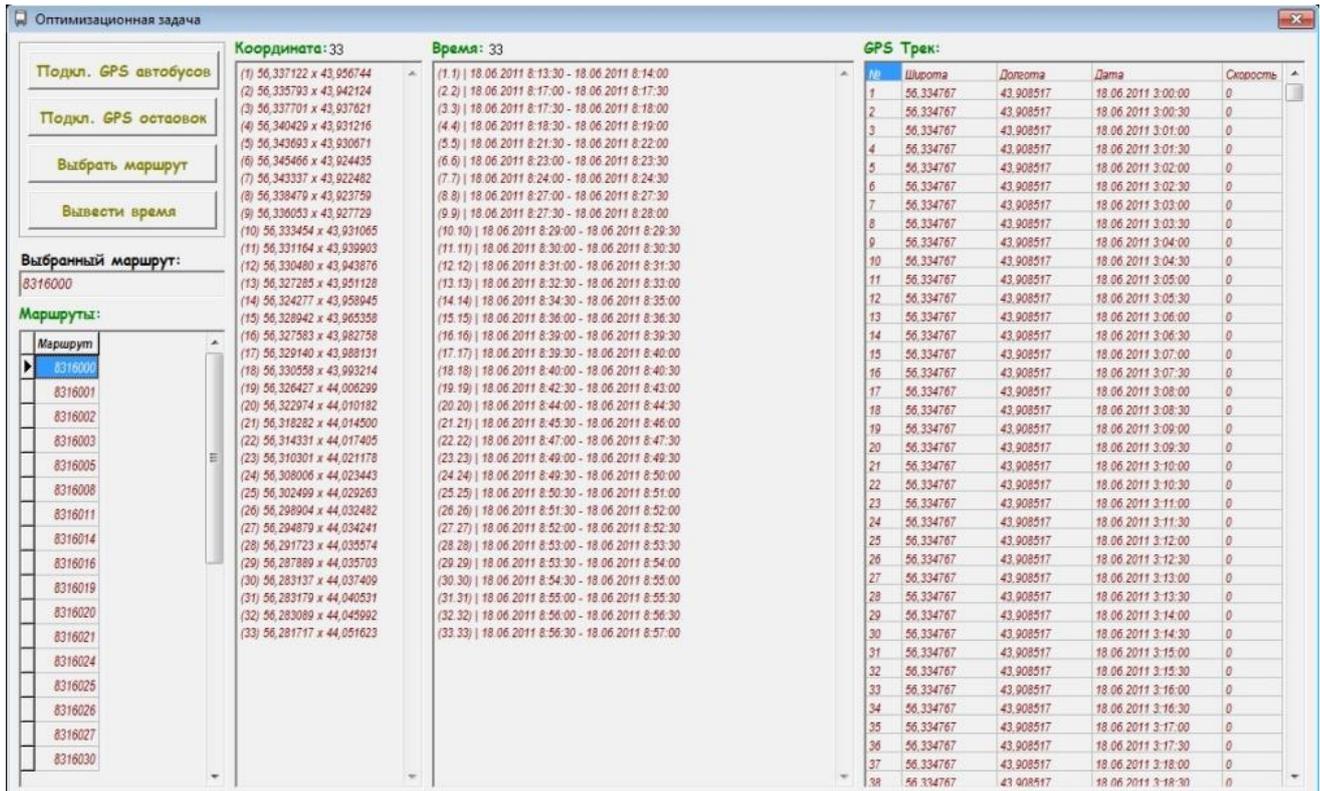


Рис. 1. Фрагмент работы программы анализа GPS-треков движения автобусов

Fig. 1. A fragment of the program for analyzing GPS tracks of bus movements

Рассматривая разности между временами выезда и приезда, получаем данные о времени рейса в прямом и обратном направлениях – два набора точек вида (t_i, T_i) . Аппроксимация данных точек представляет собой нетривиальную задачу. Для определения подходящего класса функций необходимо учитывать следующее:

- 1) результирующая функция должна иметь два максимума (соответствующие утреннему и вечернему часу пик);
- 2) не должны учитываться небольшие флуктуации – функция не должна повторять малые колебания значений слишком подробно;
- 3) желательно наличие горизонтальной асимптоты ввиду того, что минимальное время рейса известно и положительно.

Рассматривались несколько классов аппроксимирующих функций. Функции (4) являющиеся алгебраической суммой многочлена 4-й степени и двух экспоненциальных функций казались перспективными, но наличие 9 параметров и невозможность получения явного решения, возникающих уравнений делают этот класс функций неприемлемым.

$$f(t) = \alpha_4 t^4 + \alpha_3 t^3 + \alpha_2 t^2 + \alpha_1 t + \alpha_0 + \beta_1 e^{-\gamma_1(t-t_1)^2} + \beta_2 e^{-\gamma_2(t-t_2)^2}, \quad (4)$$

Многочлены 5-й степени имеют два максимума, но резкое убывание на левой и правой границе при аппроксимации имеет следствием ошибки двух типов:

- 1) смещение пиков (максимумов);
- 2) сглаживание пиков (максимумов).

Это совершенно неприемлемо, так как приведет к ошибкам при составлении расписаний движения маршрутных транспортных средств.

Пример сравнения аппроксимирующих функций 5-го и 7-го порядков приводится ниже (рис. 2).

$$t_i = \{6,217; 6,492; 7,083; 7,417; 7,608; 8,083; 8,25; 8,483; 9,592; 10,3; 10,483; 11,2; 11,567; 11,725; 12,883; 13,658; 13,808; 14,617; 14,983; 15,167;$$

$$\begin{aligned}
 & \{16,375; 17,058; 17,233; 17,85; 18,367; 18,617; 20,333\} \\
 T_i = & \{0,733; 0,725; 0,9; 0,925; 0,875; 0,908; 0,925; 0,967; 0,992; 1,008; \\
 & 0,983; 1,025; 0,833; 0,875; 0,958; 0,875; 0,908; 0,925; 0,742; 0,825; 0,958; \\
 & 1,042; 1,092; 0,95; 0,95; 0,875; 0,8\}. \\
 f_7(t) = & 0,0000029033t^7 - 0,000260388t^6 + 0,0097511969t^5 - 0,1975742339t^4 \\
 & + 2,3402445973t^3 - 16,2309802458t^2 + 61,2024327703t - 96,2098034764 \\
 f_5(t) = & -0,0000115127t^5 + 0,0005184291t^4 - 0,0062831576t^3 - 0,0191563558t^2 \\
 & + 0,7521989956t - 2,3807196372
 \end{aligned}$$

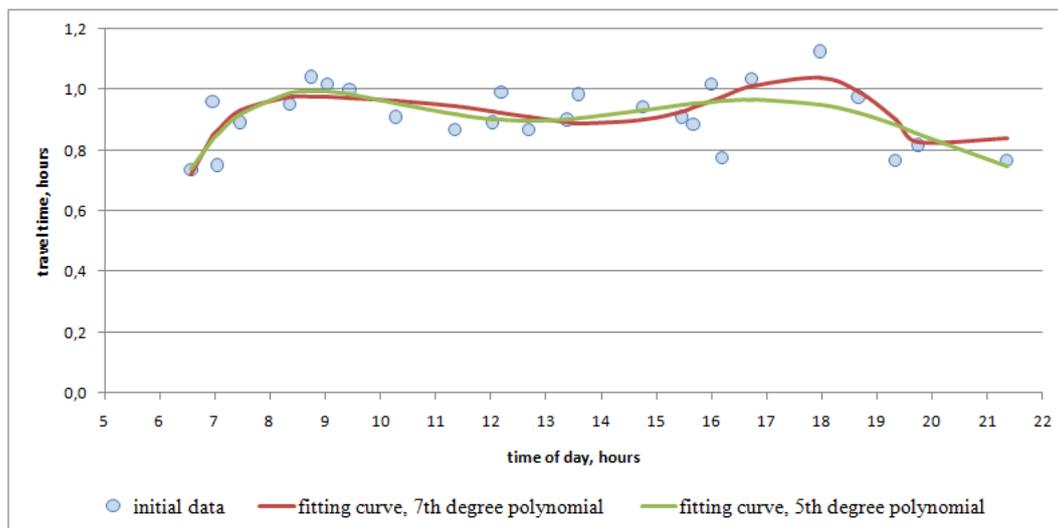


Рис. 2. Пример аппроксимации многочленами 5 и 7 степеней функции $T(t)$ для прямого направления автобусного маршрута Т7 (Нижний Новгород), 6.10.2020, вторник, использованы суточные треки

Fig. 2. An example of approximation by polynomials of 5 and 7 degrees of the function $T(t)$ for the forward direction of bus route T7 (Nizhny Novgorod), 10/6/2020, Tuesday, daily tracks were used

Видно, что вечерний час пик многочлен 5-й степени сглаживает, т.е. дает значительную ошибку. Визуальные соображения подтверждаются статистически: коэффициент корреляции с исходными данными для многочлена 5-й степени равен 0,74, для многочлена 7-й степени 0,81; сумма квадратов разностей для многочлена 5-й степени равна 0,0988, для многочлена 7-й степени – 0,0775. Таким образом, аппроксимация многочленом 7-й степени дает существенное улучшение по сравнению с многочленом 5-й степени.

Важной особенностью вычислений является необходимость высокой точности определения коэффициентов. Так, при использовании многочленов 7-й степени минимальная точность – 10 знаков после запятой, так как при меньшем числе знаков слагаемые соответствующие старшим степеням определяются с большой ошибкой (более одной десятой). С ростом порядка многочлена точность (количество знаков после запятой) приходится значительно увеличивать, кроме того, многочлены, например, 9-й степени начинают отображать «шумы» или флуктуации – малые изменения случайной величины.

Таким образом, оптимальным вариантом является аппроксимация многочленом 7-й степени:

$$f(t) = \alpha_7 t^7 + \alpha_6 t^6 + \alpha_5 t^5 + \alpha_4 t^4 + \alpha_3 t^3 + \alpha_2 t^2 + \alpha_1 t + \alpha_0. \quad (4)$$

где константы α_i определяются из решения системы (2), которая для многочлена 7-й степени принимает вид:

$$\begin{cases} 2 \sum_{i=1}^n ((\alpha_7 t_i^7 + \alpha_6 t_i^6 + \alpha_5 t_i^5 + \alpha_4 t_i^4 + \alpha_3 t_i^3 + \alpha_2 t_i^2 + \alpha_1 t_i + \alpha_0) - y_i)^2 t_i^7 = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n ((\alpha_7 t_i^7 + \alpha_6 t_i^6 + \alpha_5 t_i^5 + \alpha_4 t_i^4 + \alpha_3 t_i^3 + \alpha_2 t_i^2 + \alpha_1 t_i + \alpha_0) - y_i)^2 t_i^6 = 0 \\ \dots \\ 2 \sum_{i=1}^n ((\alpha_7 t_i^7 + \alpha_6 t_i^6 + \alpha_5 t_i^5 + \alpha_4 t_i^4 + \alpha_3 t_i^3 + \alpha_2 t_i^2 + \alpha_1 t_i + \alpha_0) - y_i)^2 t_i = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n ((\alpha_7 t_i^7 + \alpha_6 t_i^6 + \alpha_5 t_i^5 + \alpha_4 t_i^4 + \alpha_3 t_i^3 + \alpha_2 t_i^2 + \alpha_1 t_i + \alpha_0) - y_i)^2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Преобразуя систему, получаем:

$$\begin{cases} \alpha_7 \sum_{i=1}^n t_i^{14} + \alpha_6 \sum_{i=1}^n t_i^{13} + \dots + \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_i^8 + \alpha_0 \sum_{i=1}^n t_i^7 = \sum_{i=1}^n y_i t_i^7 \\ \alpha_7 \sum_{i=1}^n t_i^{13} + \alpha_6 \sum_{i=1}^n t_i^{12} + \dots + \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_i^7 + \alpha_0 \sum_{i=1}^n t_i^6 = \sum_{i=1}^n y_i t_i^6 \\ \dots \\ \alpha_7 \sum_{i=1}^n t_i^8 + \alpha_6 \sum_{i=1}^n t_i^7 + \dots + \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_i^2 + \alpha_0 \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n y_i t_i \\ \alpha_7 \sum_{i=1}^n t_i^7 + \alpha_6 \sum_{i=1}^n t_i^6 + \dots + \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_i + \alpha_0 \sum_{i=1}^n 1 = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (6)$$

Это система линейных уравнений относительно неизвестных $\alpha_0, \dots, \alpha_7$. Решая ее по правилу Крамера, получаем значения коэффициентов $\alpha_0, \dots, \alpha_7$. Примеры графиков подобранных функций показаны на рис. 3 и 4. Для прямого направления:

$$T(t) = 0,0000029033t^7 - 0,000260388t^6 + 0,0097511969t^5 - 0,1975742339t^4 + 2,3402445973t^3 - 16,2309802458t^2 + 61,2024327703t - 96,2098034764$$

Для обратного направления:

$$T(t) = 0,0000020052x^7 - 0,0001888831x^6 + 0,0074620604x^5 - 0,1603758850x^4 + 2,0275757109x^3 - 15,1029120090x^2 + 61,4690340879x - 104,6241284378$$

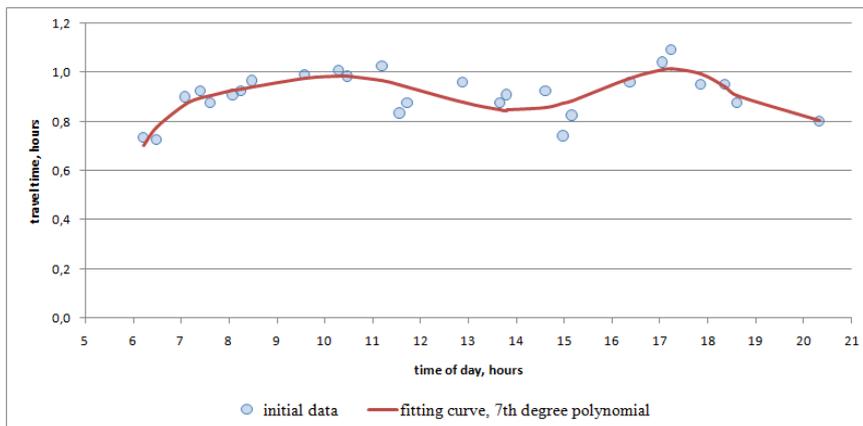


Рис. 3. Пример подбора аппроксимирующей функции $T(t)$ для прямого направления автобусного маршрута Т7 (Нижний Новгород), 6.10.2020, вторник, использованы суточные треки

Fig. 3. An example of selecting an approximating function $T(t)$ for the forward direction of bus route T7 (Nizhny Novgorod), 10/6/2020, Tuesday, daily tracks were used

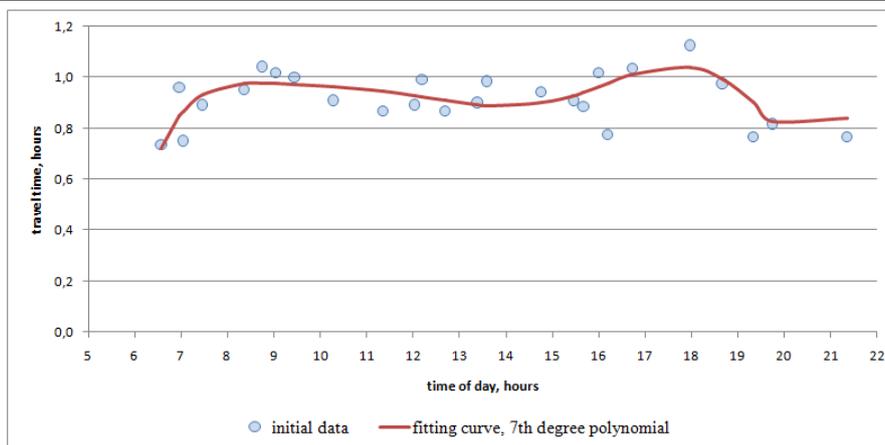


Рис. 4. Пример подбора аппроксимирующей функции $T(t)$ для обратного направления автобусного маршрута Т7 (Нижний Новгород), 6.10.2020, вторник, использованы суточные треки

Fig. 4. An example of selecting an approximating function $T(t)$ for the reverse direction of bus route T7 (Nizhny Novgorod), 10/6/2020, Tuesday, daily tracks were used

Обсуждение

Рассмотренный в работе подход к моделированию времени рейса на автобусном маршруте может применяться как к отдельно взятому дню, так и к временному интервалу любой длины. Авторы использовали данную модель для анализа работы общественного транспорта и анализа транспортных потоков в Нижнем Новгороде с целью последующего моделирования сети общественного транспорта и транспортных потоков. Отметим, что в соответствии с общепринятыми для общественного транспорта стандартами, необходимо отдельно рассматривать срединедельные дни (вторник, среда, четверг), понедельник, пятницу, субботу, воскресенье, праздничные и предпраздничные дни. Моделирование показало, что класс функций (4) дает хорошее приближение для всех дней, только для выходных дней (суббота и воскресенье) график имеет более *сглаженный* вид – максимумы функции меньше отличаются от средних значений, пример аппроксимации для воскресного дня приводится ниже.

Прямое направление:

$$\begin{aligned}
 t_i &= \{6,683; 7,133; 7,383; 8,475; 9,183; 9,858; 10,25; 10,45; 10,825; 11,833; \\
 &12,4; 13,15; 13,492; 13,867; 14,217; 14,8; 15,708; 16,417; 16,6; 17,283; \\
 &17,933; 18,883; 19,092; 19,342; 19,567; 20,208; 21,533; 21,717\} \\
 T_i &= \{0,742; 0,742; 0,767; 0,825; 0,775; 0,767; 0,792; 0,733; \\
 &0,667; 0,775; 0,867; 0,783; 0,9; 0,742; 0,775; 0,825; 0,8; 0,8; 0,783; \\
 &0,725; 0,767; 0,825; 0,717; 0,8; 0,758; 0,733; 0,692; 0,775\}. \\
 f_7(t) &= 0,0000007114t^7 - 0,0000730987t^6 + 0,0031534433t^5 - 0,073882999t^4 \\
 &+ 1,0131092862t^3 - 8,1128681101t^2 + 35,0654423057t - 62,2528280957
 \end{aligned}$$

Полученные результаты не следует рассматривать как обособленные. Модель, анализируемая в данной статье, используется при создании интеллектуальной информационной транспортной системы [14], а также для моделирования автобусных маршрутов и транспортных потоков.

Заключение

В статье рассматривается метод определения параметров подвижности ТС на магистральных улицах крупного города. Строится модель зависимости времени рейса от времени суток для маршрутного ТС. Для получения исходных для моделирования данных (набора точек (t_i, T_i)) используется авторский алгоритм обработки GPS-треков движения МТС, при-

веденный в работе и вспомогательная компьютерная программа, реализующая описанный алгоритм. Основным результатом работы является определение класса функций, подходящих для аппроксимации набора точек (t_i, T_i) , который дается формулой (4) и метод определения коэффициентов аппроксимирующих функций.

Ввиду того, что информация о движении маршрутных транспортных средств поступает в реальном времени, и происходит их автоматизированная обработка, представляется перспективным использование данного подхода в интеллектуальной транспортной системе крупного города. Динамическое определение параметров подвижности на магистральных городских дорогах может быть использовано для косвенного управления транспортными потоками и при разработке моделей транспортной системы крупного города.

Библиографический список

1. **Bin, Y.** Bus arrival time prediction using support vector machines / Y. Bin, Y. Zhongzhen, Y. Baozhen // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. – 2006. – Vol. 10, № 4. – P. 151-158.
2. **Cathey, F.W.** A prescription for transit arrival/departure prediction using automatic vehicle location data / F.W. Cathey, D.J. Dailey // *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*. – 2003. – Vol. 11, № 3. – P. 241-264.
3. **Chien, M.** A dynamic bus-arrival time prediction model based on APC data / M. Chen, X. Liu, J. Xia [et al.] // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. – 2004. – Vol. 19, № 5. – P. 364-376.
4. **Chien, S.I.-J.** Dynamic bus arrival time prediction with artificial neural networks / S. I.-J. Chien, Y. Ding, C. Wei // *Journal of Transportation Engineering*. – 2002. – Vol. 128, № 5. – P. 429-438.
5. **Kumar, V.** Comparison of model based and machine learning approaches for bus arrival time prediction / V. Kumar, B.A. Kumar, L. Vanajakshi [et al.] // *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. – Washington, D.C., 2014. – № 14-2518. – 15 p.
6. **Moreira-Matias, L.** Improving mass transit operations by using AVL-based systems: a survey / L. Moreira-Matias, J. Mendes-Moreira, J.F.D. Sousa [et al.] // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2015. – Vol. 16, № 4. – P. 1636-1653.
7. **Steven, I.** Dynamic travel time prediction with real-time and historic data / I. Steven, J. Chien, C.M. Kuchipudi // *Journal of Transportation Engineering*. – 2003. – Vol. 129, № 6. – P. 608-616.
8. **Yu, B.** Bus arrival time prediction at bus stop with multiple routes / B. Yu, W.H.K. Lam, M.L. Tam // *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*. – 2011. – Vol. 19, № 6. – P. 1157-1170.
9. **Yu, B.** Bus travel-time prediction based on bus speed / B. Yu, Z.Z. Yang, J. Wang // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*. – 2010. – Vol. 163, № 1. – P. 307.
10. **Zhou, Y.** Bus arrival time calculation model based on smart card data / Y. Zhou, L. Yao, Y. Chen [et al.] // *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*. – 2016. – Vol. 74. – P. 1634-1638.
11. **Cats, O.** An agent-based approach for modeling real-time travel information in transit systems / O. Cats // *Procedia Computer Science*. – 2014. – Vol. 32. – P. 744-749.
12. **Hernandez, T.** Flex scheduling for bus arrival time prediction / T. Hernandez // *Transportation Research Record*. – 2014. – № 2418. – P. 110-115.
13. **Wolberg, J.** *Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments* / J. Wolberg. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 250 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-31720-1>.
14. **Eliseev, M.E.** Virtual reality and navigation subsystems of the interactive system for road safety improving / M.E. Eliseev, T.N. Tomchinskaya, E.D. Galkina [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 386. – Art. 012027. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/386/1/012027>

References

1. Bin Y., Zhongzhen Y., Baozhen Y. Bus arrival time prediction using support vector machines. *J Intell Transp Syst.* 2006;10(4):151-158.
2. Cathey F.W., Dailey DJ. A prescription for transit arrival/departure prediction using automatic vehicle location data. *Transp. Res. Part C. Emerg. Technol.* 2003;11(3):241-264.

3. Chien M., Liu X., Xia J. et al. A dynamic bus-arrival time prediction model based on APC data. *Comput Aided Civ Infrastruct Eng.* 2004;19(5):364-376.
4. Chien S.I.J, Ding Y., Wei C. Dynamic bus arrival time prediction with artificial neural networks. *J Transp Eng.* 2002;128(5):429-438.
5. Kumar V., Kumar B.A., Vanajakshi L. et al. Comparison of model based and machine learning approaches for bus arrival time prediction. Paper presented at: Transportation Research Board 93rd Annual Meeting; 2014 Jan 12-16; Washington, DC. Paper No. 14-2518.
6. Moreira-Matias L., Mendes-Moreira J., Sousa JFD, et al. Improving mass transit operations by using AVL-based systems: a survey. *IEEE Trans Intell Transp Syst.* 2015;16(4):1636-1653.
7. Steven I., Chien J., Kuchipudi C.M. Dynamic travel time prediction with real-time and historic data. *J Transp Eng.* 2003;129(6):608-616.
8. Yu B., Lam W.H.K., Tam M.L. Bus arrival time prediction at bus stop with multiple routes. *Transp Res Part C Emerg Technol.* 2011;19(6):1157-1170.
9. Yu B., Yang Z.Z., Wang J. Bus travel-time prediction based on bus speed. *Proc Inst Civ Eng Transp.* 2010;163(1):3-7.
10. Zhou Y., Yao L., Chen Y. et al. Bus arrival time calculation model based on smart card data. *Transp Res Part C Emerg Technol.* 2016;74:1634-1638.
11. Cats O. An agent-based approach for modeling real-time travel information in transit systems. *Procedia Comput Sci.* 2014;32:744-749.
12. Hernandez T. Flex scheduling for bus arrival time prediction. *Transp Res Rec.* 2014;(2418):110-115.
13. Wolberg J. *Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments.* Berlin: Springer-Verlag; 2006. doi: <https://doi.org/10.1007/3-540-31720-1>.
14. Eliseev M.E., Tomchinskaya T.N., Galkina E.D., Dudakov N.Yu., Musarsky R.A. Virtual reality and navigation subsystems of the interactive system for road safety improving. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2018;386:012027. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/386/1/012027>.

***Дата поступления
в редакцию: 31.08.2025***

***Дата принятия
к публикации: 18.12.2025***