

УДК 004.67

І.С. СКАРГА-БАНДУРОВА, М.В. ДЕРКАЧ  
Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, м. Северодонецьк**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ФІЛЬТРУ КАЛМАНА  
ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСУ ПРИБУТТЯ МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ**

*В роботі розглянуто проблему підвищення продуктивності міського громадського транспорту шляхом створення і використання ефективних моделей прогнозування та інформування пасажирів. Стаття описує результати роботи чотирьох алгоритмів прогнозування прибуття громадських транспортних засобів на зупинки міста, які були розроблені та випробувані на троллейбусних маршрутах м. Северодонецьк. Вхід до моделей складався з історичних даних та даних в режимі реального часу. Запропоновано методику розрахунку прогнозного часу прибуття транспортного засобу, що поєднує моделі середніх показників та моделі з використанням фільтру Калмана. Для розрахунку відстані між фактичним місцезнаходженням транспортного засобу та зупинкою використані формули гаверсінусів та інструмент Google Maps API. Оцінка ефективності проводилася на основі розрахунку різниці між спостережуваним та передбачуваним часом прибуття.*

*Ключові слова: міський транспорт, час прибуття, фільтр Калмана, модель, троллейбус, прогнозування.*

І.С. СКАРГА-БАНДУРОВА, М.В. ДЕРКАЧ  
Востоchnoукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Северодонецк**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА**

*В работе рассмотрена проблема повышения производительности городского общественного транспорта путем создания эффективных моделей прогнозирования и информирования пассажиров. Статья описывает результаты работы четырех алгоритмов прогнозирования прибытия транспортных средств на остановки города, которые были разработаны и испытаны на троллейбусных маршрутах г. Северодонецк. Входные данные к моделям состояли из исторических данных и данных, получаемых в режиме реального времени. Предложена методика расчета прогнозного времени прибытия транспортного средства, которая сочетает модели средних показателей и модели с использованием фильтра Калмана. Для расчета расстояния между фактическим местонахождением транспортного средства и остановкой использованы формулы гаверсінусов и инструмент Google Maps API. Оценка эффективности проводилась на основе разницы между наблюдаемым и предполагаемым временем прибытия.*

*Ключевые слова: городской транспорт, время прибытия, фильтр Калмана, модель, троллейбус, прогнозирование.*

І.С. SKARGA-BANDUROVA, M.V. DERKACH  
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk**A STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF THE KALMAN FILTERING TO  
URBAN TRANSPORT ARRIVAL TIME PREDICTION**

*The paper focuses the problem of increasing the productivity of urban public transport by developing the effective models for travel time prediction and informing passengers. This document describes the results of four algorithms for predicting the arrival of public transport on city stops. The travel time prediction models were developed and tested on trolleybus routes in Severodonetsk. Input information to models consisted of historical and real-time data. The method of calculating the arrival time combining models of averages and the Kalman filter is proposed. Both the haversine formula and the Google Maps API tool were applied to calculate the distance between the actual location of the vehicle and the bus stop. The estimation of efficiency was based on the calculation of the difference between the observed and the estimated arrival time.*

*Keywords: urban transport, arrival time, Kalman filter, model, trolleybus, prediction.*

**Постановка проблеми**

В управлінні дорожнім рухом широко використовуються технології, що базуються на інтелектуальних транспортних системах (ІТС). ІТС містять системи управління рухом, засоби інформування учасників дорожнього руху, системи контролю, управління та оптимізації маршрутів,

засоби і технології управління при надзвичайних ситуаціях, тощо. Важливим аспектом ІТС є покращення послуг громадського транспорту, щоб зробити його більш привабливим, ніж приватний транспорт. В цьому сенсі завдання прогнозування часу руху транспортних засобів є одним з найбільш затребуваних і зрозумілих для кінцевого споживача, як учасника дорожнього руху. Вирішення цього завдання необхідно не тільки для сповіщення пасажирів про час прибуття громадського транспорту на зупинки, але і для управління рухом і внесення своєчасних коригувань диспетчерськими службами. Інформація, зібрана в реальному часі допомагає транспортним підприємствам планувати, керувати та контролювати транспортні засоби, а також вдосконалювати сервіс.

Розробка ефективних методологій для вимірювання в реальному часі та оцінки часу проїзду визнана важливою складовою транспортної інфраструктури міста [1]. Інноваційні системи управління трафіком та інформаційної підтримки пасажирів здатні зробити міський пасажирський транспорт більш безпечним, ефективним і зручним для усіх учасників руху, роблячи значний внесок у політику сталого розвитку міст. Системи прогнозування прибуття міських транспортних засобів ефективно працюють у багатьох країнах світу. Тим не менш, впровадження таких систем в Україні все ще знаходиться на стадії становлення.

Іншим важливим чинником розгортання та вдосконалення таких систем є їх привабливість для пасажирів. Очікування пасажирів щодо своєчасності та точності даних, пов'язаних з подорожами будуть продовжувати зростати. Разом з тим, питання прогнозування проїзду та часу прибуття транспорту залишається одним із багатьох складних завдань, що потребують вирішення. Дане дослідження намагається порівняти ефективність методів прогнозування для реального набору даних. Це допоможе отримати надійний алгоритм, який може бути прийнятий для прогнозування часу прибуття міського громадського транспорту.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Прогноз часу поїздки - добре відома тема досліджень протягом багатьох років. В останні десятиліття були розроблені різні моделі та алгоритми, щоб прогнозувати час прибуття та час проїзду автобусів. Найбільш широко поширені можуть бути класифіковані за такими категоріями: моделі, що обчислюють середні показники руху [2]; регресійні моделі; моделі машинного навчання, включаючи використання штучних нейронних мереж [3-5], методу опорних векторів (SVM) [6,7]; різноманітні моделі на основі фільтрації Калмана та динамічні моделі. Деякі моделі прогнозування використовують історичні дані про трафік, інші покладаються на інформацію про дорожній рух у реальному часі, зокрема використання бортових транспортних GPS-датчиків та інформації з використанням географічних інформаційних систем (ГІС) [8, 9].

В роботі [2] автори розробили модель передбачення прибуття автобуса використовуючи історичний метод. Для збору даних в реальному часі була використана технологія GPS-GPRS. Дані про місцезнаходження автобуса отримувались кожні 150 м, після чого кожні 500 м обчислювалась середня швидкість і розраховувався час прибуття транспортного засобу до зупинок. Точність прогнозування становила 1-2 хвилини. В [2] запропоновано модель прогнозування динамічного часу пересування для автобусів на дорогах з кількома маршрутами, на основі методу SVM та алгоритму фільтрації Калмана. Авторами [10] запропоновано алгоритм прогнозування часу прибуття автобусів, що поєднує історичні дані та дані автоматичної системи визначення місцезнаходження автомобілів (AVL). В алгоритмі використовувались три компоненти: трекер, фільтр і предиктор. Фільтр Калмана використовувався в компоненті фільтра. Вони повідомили, що запропонований алгоритм зміг передбачити час прибуття автобусу з помилкою менше 12%. Модель [11] складається з двох алгоритмів фільтрів Калмана для прогнозування робочих часів та часу затримки по черзі в інтегрованій системі. Продуктивність розробленої моделі прогнозування перевершила інші традиційні моделі з точки зору точності, демонструючи динамічну здатність оновлювати себе на основі нових даних, що відображає зміну характеристик транзитного операційного середовища.

Загалом, фільтр Калмана та його адаптації [12-14] застосовуються для багатьох досліджень дорожнього руху, більшою частиною в якості методу для повторної обробки інформації, щоб уникнути додаткових перешкод при зніманні даних з датчиків. У зв'язку з цим, виникає питання доцільності використання цієї технології для розрахунку прогнозованого часу прибуття транспортного засобу до зупинок міста.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою роботи було оцінити ефективність використання фільтра Калмана в системах моніторингу міського транспорту. Основна увага дослідження зосереджена на прогнозуванні часу прибуття міського транспорту на зупинки з використанням моделі середніх показників, історичної моделі на основі даних Google Maps API, та моделі з використанням фільтра Калмана. Метод оцінки ефективності - різниця (середня абсолютна відсоткова помилка) між спостережуваним та передбачуваним часом прибуття. Прогнозований час прибуття буде наданий пасажиром, щоб допомогти їм у прийнятті рішень, і міським операторам для підвищення якості послуг з перевезення.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

У цьому дослідженні використано ряд методів моделювання, включаючи просту статистичну модель (історичні дані), середні показники та модель на основі фільтра Калмана. Вхідними змінними є швидкість транспортного засобу, його місцеположення та час прибуття до контрольної точки (зупинки).

Для реалізації поставленої мети запропоновано наступний метод прогнозування часу прибуття транспортного засобу.

1. Визначення кількості часових інтервалів  $n$ , які було подолано транспортним засобом за час пересування від початку маршруту до поточного місцезнаходження:

$$n = \frac{T - T_0}{I}, \quad (1)$$

де  $T$  - значення реального часу;

$T_0$  - час початку проходження;

$I$  - період частоти зміни поточного стану.

2. Визначення усередненої швидкості руху за час у дорозі.

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n}, \quad (2)$$

де  $s$  - усереднена швидкість руху транспорту;

$s_i$  - фактична швидкість руху транспорту в момент часу  $i$ ;

$i$  - поточний часовий інтервал;

$n$  - кількість часових інтервалів за період руху транспорту від початку пересування до реального часу.

3. Визначення відстані від поточного місцезнаходження транспортного засобу до зупинки.

Відстань від поточного місцезнаходження транспортного засобу до зупинки може бути розрахована двома способами.

а) Перший спосіб.

Фактично, відстань розраховується за формулою (3).

$$d = \Delta\sigma \cdot R, \quad (3)$$

де  $d$  – відстань між двома точками;

$R$  – радіус Землі;

$\Delta\sigma$  – кутова різниця.

Якщо мова йде про досить короткі лінійні відстані між двома географічними координатами, то для розрахунку параметра  $\Delta\sigma$ , з точки зору, навантаження на обчислювальний центр, більш доцільним є застосування формули гаверсинусів:

$$\Delta\sigma = 2 \arcsin \left\{ \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin^2 \left( \frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right\}, \quad (4)$$

де  $\varphi_1, \lambda_1; \varphi_2, \lambda_2$  – широта та довгота двох точок відповідно;

$\Delta\lambda$  – різниця координат за довжиною;

$\Delta\sigma$  – кутова різниця.

б) Другий спосіб.

Засоби Google Maps API дозволяють реалізувати розрахунок відстані, яку залишилось проїхати транспортному засобу. Ще ця служба дозволяє отримати маршрути між пунктами на карті за допомогою HTTP-запиту. Підтримується пошук оптимальних маршрутів для різних способів переміщення: не лише для громадського транспорту, також і для автомобілів, велосипедів або пішки.

4. Обчислення прогнозного часу прибуття транспортного засобу на необхідну зупинку по отриманим на попередніх етапах, значенням відстані та швидкості.

$$t = \frac{d}{s}, \quad (5)$$

де  $d$  – відстань між двома точками;  
 $s$  – усереднена швидкість руху транспорту;  
 $t$  – прогнозний час прибуття транспортного засобу.

5. Застосування фільтру Калмана для покращення результатів прогнозування часу прибуття транспортного засобу на зупинки міста.

#### Фільтр Калмана

Фільтр Калмана являє собою лінійний рекурсивний алгоритм прогнозування, що використовується для оцінки параметрів моделі процесу. Починаючи з початкових оцінок, фільтр Калмана дозволяє прогнозувати параметри моделі та коригувати його з кожним новим виміром. Його здатність поєднувати ефекти шуму як процесу, так і вимірювань, зробила його дуже популярним у багатьох галузях досліджень та додатках, зокрема в області автономної та допоміжної навігації. Для реалізації поставленого завдання застосовано алгоритм [14], що складається з 5 кроків.

*Крок 1.* Ініціалізація.

$$k = 0, \quad x_0^-, \quad P_0^-.$$

*Крок 2.* Екстраполяція.

а) Передбачення стану системи:

$$x_{k+1}^- = F \cdot x_k^- + B \cdot u_k, \quad (6)$$

де  $x_{k+1}^-$  - прогноз стану системи в поточний момент часу;  
 $F$  - матриця переходу між станами (динамічна модель системи);  
 $x_k^-$  - передбачення стану системи в попередній момент часу;  
 $B$  - матриця застосування керуючого впливу;  
 $u_k$  - керуючий вплив в попередній момент часу.

б) Передбачення помилки коваріації:

$$P_{k+1}^- = F \cdot P_k^- \cdot F^T + Q_k, \quad (7)$$

де  $P_{k+1}^-$  - прогноз помилки;  
 $P_k^-$  - помилка в попередній момент часу;  
 $Q_k$  - коваріація шуму процесу.

*Крок 3.* Обчислення коефіцієнту посилення фільтра Калмана

$$K_k = \frac{P_k^- \cdot H^T}{H \cdot P_k^- \cdot H^T + R}, \quad (8)$$

де  $K_k$  - посилення Калмана;  
 $H$  - матриця вимірювань, що відображає ставлення вимірювань і станів;  
 $R$  - коваріація шуму вимірювання.

*Крок 4.* Уточнення

а) Уточнення оцінки з урахуванням виміру  $z_k$ :

$$x_k = x_k^- + K_k \cdot (z_k - H \cdot x_k^-), \quad (9)$$

де  $z_k$  - вимір в поточний момент часу.  
 б) Уточнення помилки коваріації:

$$P_k = (I - K_k \cdot H) \cdot P_k^-, \quad (10)$$

де  $I$  - матриця ідентичності.

Якщо стан системи описується однією змінною, то  $I = 1$ , а матриці вироджуються в звичайні рівняння.

Крок 5. Перехід до кроку 2.  
 $k = k + 1$  до досягнення кінцевої зупинки.

Нижче наведено фрагмент коду основної функції класу фільтр Калмана:

```
function filter($z, $u = 0.1){
    if (is_nan($this->x)) {
        $this->x = (1 / $this->H) * $z;
        $this->P = (1 / $this->H) * $this->R * (1 / $this->H);
    }
    else {
        // Compute prediction
        $predX = ($this->F * $this->x) + ($this->B * $u);
        $predP = (($this->F * $this->P) * $this->F) + $this->Q;
        // Kalman gain
        $K = $predP * $this->H * (1 / (($this->H * $predP * $this->H) + $this->R));
        // Correction
        $this->x = $predX + $K * ($z - ($this->H * $predX));
        $this->P = $predP - ($K * $this->H * $predP);
    }
    return $this->x;
}
```

Практичний приклад і результати дослідження для тролейбусного парку м. Северодонецьк

Описані вище положення використані для реалізації завдання прогнозування прибуття громадського транспорту в м. Северодонецьк. В якості транспортного засобу розглядаються тролейбуси оскільки на даний момент увесь тролейбусний парк міста облаштовано GPS-датчиками, що є частиною багатофункціональної системи Wialon, яка застосовується для моніторингу рухомих і стаціонарних об'єктів на базі супутникових навігаційних систем ГЛОНАСС і GPS, стільникового зв'язку GSM (GPRS / SMS), супутникового зв'язку Inmarsat, Iridium, Thuraya і Globalstar. Саме через систему Wialon здійснюється безперервний автоматичний збір навігаційної інформації про місцезнаходження транспортних засобів.

Експеримент складався з 3 основних етапів: отримання вихідних даних; обробка даних; оцінка результатів. В ході експерименту вимірювалась фактична швидкість руху (максимальна швидкість 25 км/год) та реальне місцезнаходження тролейбуса. Показники датчиків читувалися кожні 15 секунд протягом пересування транспортного засобу від початку до кінця маршруту, тобто отримано час початку та кінця руху транспортного засобу. Отримані дані були перераховані за пропонуваною вище методикою. Завдяки даним, доступним в режимі онлайн розраховано час прибуття транспортного засобу до кожної зупинки. В табл. 1 надано результати обчислення швидкості, за кожні 2-3 хвилини руху транспортного засобу під час слідування від початку до кінця маршруту.

Таблиця 1

Оцінка відмінності передбачуваної швидкості

Час експерименту	9:38	9:41	9:44	9:47	9:50	9:53	9:56	9:59	10:02	10:05	10:07
Передбачувана швидкість руху по середнім показникам, км/год	0	17,25	22,40	20,61	19,33	18,06	17,57	15,96	15,89	15,63	15,19
Передбачувана швидкість із застосуванням фільтру Калмана, км/год	0	17,24	22,34	20,66	19,34	18,09	17,56	15,99	15,92	15,64	15,21
Оцінка відмінності, %	0	0,05	0,28	0,25	0,05	0,21	0,07	0,24	0,15	0,05	0,17

В якості інструменту для пошуку відстані від поточного місцезнаходження транспортного засобу до зупинки використовувались як засоби Google Maps API (рис. 1), так і розрахунки за формулами гаверсінусів (3)-(4).



Рис. 1. Фактичний час прибуття транспорту на зупинки міста

Для порівняння ефективності алгоритмів прогнозування щодо фактичного часу прибуття побудовано діаграми фактичного та прогнозованого часу прибуття транспортного засобу від початку маршруту до кінцевої зупинки (рис. 2).

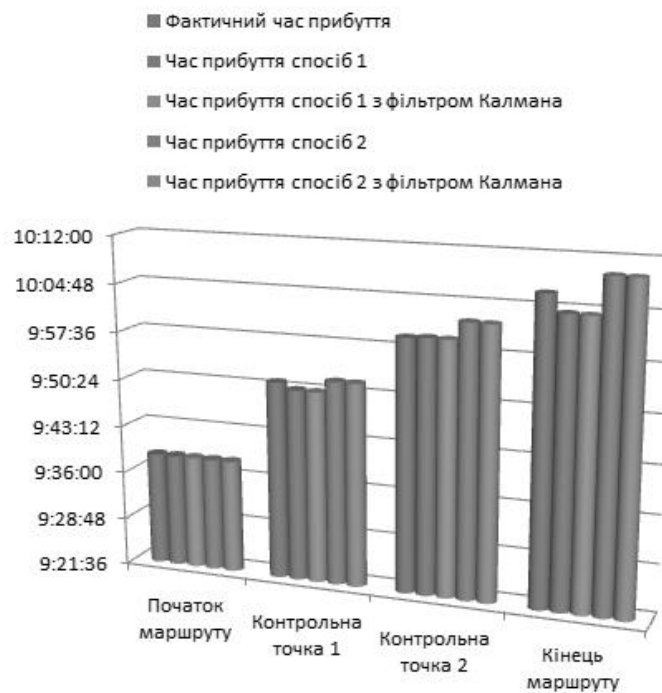


Рис. 2. Прогнозний час прибуття транспорту, отриманий різними способами

**Висновки**

По результатам проведеного експерименту було встановлено, що реакція фільтра на стрибок вимірюваної величини виявилася незначною. Найбільш істотно фільтр Калмана впливає на показник швидкості на початку експерименту, тобто під час розгону транспортного засобу, але в подальшому при розрахунку прогнозованої швидкості руху транспортного засобу – зміни є несуттєвими і наприкінці руху відмінність складає 0,17%.

Встановлено, що найменша різниця є між фактичним часом і часом прибуття, розрахованим за запропонованим методом із застосуванням формули гаверсинусів, а найбільша різниця є між фактичним і часом прибуття з застосуванням фільтра Калмана при використанні засобів Google Maps API, в якості пошуку відстані від поточного місцезнаходження транспортного засобу до зупинки.

Це чітко продемонструвало, що запропонований підхід, заснований на використанні даних про відстеження транспортних засобів в реальному часі, є достатнім для застосування прогнозу часу проїзду тролейбусу. Застосування фільтра Калмана для невеликих швидкостей та навантаження може бути доцільним або як метод для повторної обробки інформації, щоб уникнути додаткових перешкод при зніманні даних з датчика, або в якості методу адаптивного регулювання інтенсивністю шуму в реальному часі. К перспективам використання також можна віднести те, що стабільність фільтра можна відстежувати в режимі онлайн, і те, що надійність і ступінь використання інформації спостережень адаптивно коригуються, завдяки чому продуктивність фільтра може бути поліпшена.

#### Список використаної літератури

1. Fabbri G. An Innovative System for a Clean and Sustainable Public Transport System in Smart Cities / G.Fabbri, C.M. Medaglia, M. Ippolito, E. Saraceno, M. Antonucci, L. Fiorentino, M. Bistolfi, P. Cozzolino, M. Gallarate // Proceedings of the IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Santa Clara, CA, USA. 8-10 June 2016. – pp. 974-979.
2. Manolis K., Kwistis D. Intelligent transportation systems - travelers' information systems the case of a medium size city / K. Manolis, D. Kwistis // Mechatronics, Proceedings of the IEEE International Conference on ICM '04. 2004. – pp. 200-204.
3. 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, No. 5, pp. 429-438.
4. van Lint J.W.C. Accurate freeway travel time prediction with state-space neural networks under missing data / J.W.C. van Lint, S.P. Hoogendoorn, H.J. van Zuylen // Delft University of Technology, The Netherlands. – 2003.
5. Jeong R. Bus arrival time prediction using artificial neural network model / R. Jeong., R. Rilett // IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. 2004. pp. 988-993.
6. Bai C. Dynamic Bus Travel Time Prediction Models on Road with Multiple Bus Routes / C. Bai, Z.-R. Peng, Q.-C. Lu, J. Sun // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2015. – Vol. 2015, doi:10.1155/2015/432389.
7. Bin Yu. Bus arrival time prediction using support vector machines / Yu. Bin, Y. Zhongzhen, Y. Baozhen // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2006. – 10(4), pp. 151–158.
8. Chung E.-H. Expected time of arrival model for school bus transit using real-time global positioning system-based automatic vehicle location data / E.-H. Chung, A. Shalaby // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2007. – Vol. 11(4). – pp. 157-167.
9. Chien S.I.J. Dynamic Travel Time Prediction with Real-Time and Historic Data / S.I.J. Chien C.M. Kuchipudi // Journal of Transportation Engineering. – 2003. – Vol. 129, No. 6. – pp. 608-616.
10. 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. – 2003. – Vol. 11. – pp. 241-264.
11. Shalaby A. Prediction Model of Bus Arrival and Departure Times Using AVL and APC Data / A. Shalaby, A. Farhan // Journal of Public Transportation. – 2004. – Vol. 7, No. 1. – pp. 41-61.
12. Huang Y. Urban Expressway Travel Time Prediction Method Based on Fuzzy Adaptive Kalman Filter / Y. Huang, L. Xu, Q. Luo, X. Kuang // An International Journal Applied Mathematics & Information Sciences. – 2013. – Vol. 7, No. 2L. – pp. 625-630.
13. Zaki M. Online Bus Arrival Time Prediction Using Hybrid Neural Network and Kalman filter Techniques / M. Zaki, I. Ashour, M. Zorkany, B. Hesham // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2013. – Vol. 3, Issue. 4. – pp. 2035-2041.
14. Yang J.-S. Travel Time Prediction Using the GPS Test Vehicle and Kalman Filtering Techniques / J.-S. Yang // American Control Conference June 8-10, 2005. Portland, OR, USA. – 2005. – pp. 2128-2133.