

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.28>

УДК 004.942

## Підвищення точності систем зважування в русі за допомогою динамічних нейронних мереж

**Фомін Олександр Олександрович<sup>1</sup>**

Д-р техніч. наук, професор каф. Комп'ютеризованих систем та програмних технологій  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8816-0652>; fomin@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57103429400

**Татарин Олександр Васильович<sup>1</sup>**

Аспірант каф. Комп'ютеризованих систем та програмних технологій  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3888-6569>; otataryn@stud.op.edu.ua

**Фрунтов Олег Васильович<sup>1</sup>**

Аспірант каф. Комп'ютеризованих систем та програмних технологій  
E-mail: fruntov.o.v@op.edu.ua

**Канєвський Віталій Олександрович<sup>1</sup>**

Аспірант каф. комп'ютеризованих систем та програмних технологій  
E-mail: 10630506@stud.op.edu.ua

<sup>1</sup> Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

### АНОТАЦІЯ

Робота присвячена вирішенню проблеми зважування транспорту в русі у складі сучасних інформаційних технологій та автоматизованих інтелектуальних систем управління міськими ресурсами та інфраструктурою. Метою роботи є підвищення точності вимірювань в системах зважування транспорту в русі в умовах інтенсивного руху, як складової частини інтелектуальних систем управління міською інфраструктурою, сприяючи тим самим підвищенню ефективності та стійкості міських процесів. Наукова новизна полягає у використанні моделей у вигляді нейронних мереж із часовими затримками для обробки даних від датчиків зважування. Застосування цього підходу дає змогу підвищити точність вимірювання маси в системах зважування в русі в умовах інтенсивного руху завдяки врахуванню динамічних і нелінійних властивостей процесу зважування. Практична корисність розробленого методу полягає у розробці нових інноваційних систем зважування у складі сучасних інформаційних технологій та автоматизованих інтелектуальних систем управління міськими ресурсами та інфраструктурою. Апробація методу на імітаційній моделі WIM процесу продемонструвала переваги у точності зважування у порівнянні з традиційними методами, що використовують статичні та лінійні моделі. Експериментальні дані показали зменшення середньоквадратичної похибки порівняно з традиційним методом на основі фільтрів Калмана, що підтверджує ефективність запропонованого підходу.

**Ключові слова:** зважування в русі; нейронні мережі з часовими затримками; нелінійна динаміка; ідентифікація

**Актуальність.** У сучасному світі точне й ефективне зважування відіграє ключову роль у різних сферах, таких як транспорт, логістика, будівництво та промисловість. Особливо важливим є зважування в русі (WIM), що дає змогу здійснювати контроль маси вантажів на транспортних маршрутах без зупинки транспортних засобів, що забезпечує безперебійний рух і оптимізацію процесів перевезення [1].

Останнім часом технології WIM дедалі частіше використовують у складі сучасних інформаційних технологій та автоматизованих інтелектуальних систем управління міськими ресурсами та інфраструктурою. З використанням точної та оперативної інформації про рухомі вантажі сьогодні можна розв'язувати такі актуальні задачі як [2, 3]: контроль навантаження на дорожню інфраструктуру і запобігання його перевантаженню для підтримки стану доріг і забезпечення безпеки руху; оптимізація транспортних маршрутів для скорочення часу в дорозі, зменшення витрат на паливо і зниження навантаження на дорожню інфраструктуру; контроль над перевезеннями небезпечних вантажів для забезпечення дотримання правил і норм безпеки під час їх транспортування.

Так, технології WIM відіграють важливу роль в задачах інтелектуального управління міським господарством, допомагаючи розв'язувати актуальні задачі, пов'язані з транспортною логістикою, безпекою дорожнього руху та екологічною стійкістю. У цьому контексті застосування сучасних технологій WIM стає ключовим елементом інтелектуальних систем управління міським господарством. Точні дані про масу транспорту і вантажів

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

дають змогу розв'язувати актуальні задачі, пов'язані з транспортною логістикою, безпекою дорожнього руху та екологічною стійкістю [1, 4].

Однак, наявні технології WIM розроблялися насамперед для промислових і транспортно-логістичних підприємств і не розраховані на експлуатацію в міських умовах. У зв'язку з цим, застосування технологій WIM у міському господарстві в умовах інтенсивного руху стикається з певними труднощами [3, 5]: обмежена швидкість вимірювань, що може призвести до помилок збору даних про масу вантажів; обмежена точність вимірювань через вібрації та інші фактори, що впливають на роботу датчиків і обладнання.

**Метою роботи** є підвищення точності вимірювань в WIM системах в умовах інтенсивного руху, як складової частини інтелектуальних систем управління міською інфраструктурою, сприяючи тим самим підвищенню ефективності та стійкості міських процесів.

У випадках, коли наявна велика кількість вхідних параметрів і складний зв'язок між ними та вихідним параметром, який не можна виразити аналітично, хороші результати демонструють підходи, що ґрунтуються на застосуванні методів машинного навчання, зокрема - нейронних мереж [6, 7].

Таким чином, нейронні мережі являють собою потужний апарат для підвищення точності WIM завдяки врахуванню нелінійних і динамічних властивостей системи, забезпечення надійності процесу зважування завдяки адаптивним властивостям системи до даних і умов роботи. Використання цього підходу дає змогу забезпечити одночасно високу точність і швидкість вимірювання маси в системах WIM в умовах інтенсивного руху.

В якості динамічної нейронної мережі в роботі використовуються нейронні мережі з часовими затримками, які складаються з кількох шарів з прямим поширенням сигналу [9]. Такі моделі здатні покращити точність WIM систем за рахунок врахування динамічної поведінки системи з нелійними характеристиками [7–9], а також, адаптації до даних та зовнішніх умов.

Завдяки своїй простоті та універсальності при моделюванні нелінійних динамічних об'єктів нейронні мережі з часовими затримками набули найбільшого поширення. Існує багато структур нейронних мереж з часовими затримками, що відрізняються кількістю прихованих шарів, функціями активації та топологією. Для спрощення опису моделі на основі нейронної мережі з часовими затримками в подальшому розглядається найчастіше використовувана структура, що складається з трьох шарів: вхідного, прихованого та вихідного [10]. В означеній структурі вхідний шар нейронної мережі включає  $M$  нейронів, прихований шар включає  $K$  нейронів, вихідний шар включає 1 нейрон.

Вхідний шар в означеній структурі включає  $M$  нейронів, де  $M$  – довжина пам'яті моделі об'єкта. Кількість нейронів  $M$  обирається таким чином, щоб найкраще відобразити динамічні властивості об'єкта.

Прихований шар включає  $K$  нейронів з нелінійною функцією активації. Кількість нейронів  $K$  обирається таким чином, щоб найкраще відобразити нелінійні властивості об'єкта.

Вихідний шар мережі в задачі моделювання дорівнює кількості виходів системи зважування.

**Метод підвищення точності WIM системи з використанням нейронних мереж з часовими затримками.**

Нехай дано множину вхідних сигналів, що надходять від сенсорів WIM системи, такі як сигнали тиску або деформації, дорожні умови:

$$\mathbf{x}(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)], \quad (1)$$

і множину міток (результатів зважування), що відповідають вхідним сигналам:

$$\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]. \quad (2)$$

Нехай також є навчальний датасет

$$D = [(x_1(t), y_1), (x_2(t), y_2), \dots, (x_n, y_n)], \quad (3)$$

де кожна пара  $(x_i(t), y_i)$  представляє собою опис об'єкта  $x_i(t)$  та відповідну мітку  $y_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ).

Для відображення динамічних характеристик системи вихідний сигнал мережі  $y(t_n)$  в момент часу  $t_n$  має залежати не тільки від вхідного сигналу  $x(t_n)$  в даний момент часу, але також від вхідних сигналів, що діяли в попередні моменти часу

$$t_{n-1}, t_{n-2}, \dots, t_0, t_n = n\Delta t, n=1, 2, \dots, M.$$

В цьому випадку нейронна мережа з часовими затримками повинна отримати спеціальним чином підготовані вхідні дані:

$$\mathbf{x}(t_n) = [x(t_n), x(t_{n-1}), \dots, x(t_{n-M+1})], \quad (4)$$

В якості метрики оцінки якості моделі використовується середньоквадратична помилка *mse*.

Метод підвищення точності WIM систем за допомогою динамічних нейронних мереж полягає в застосуванні наступної послідовності дій.

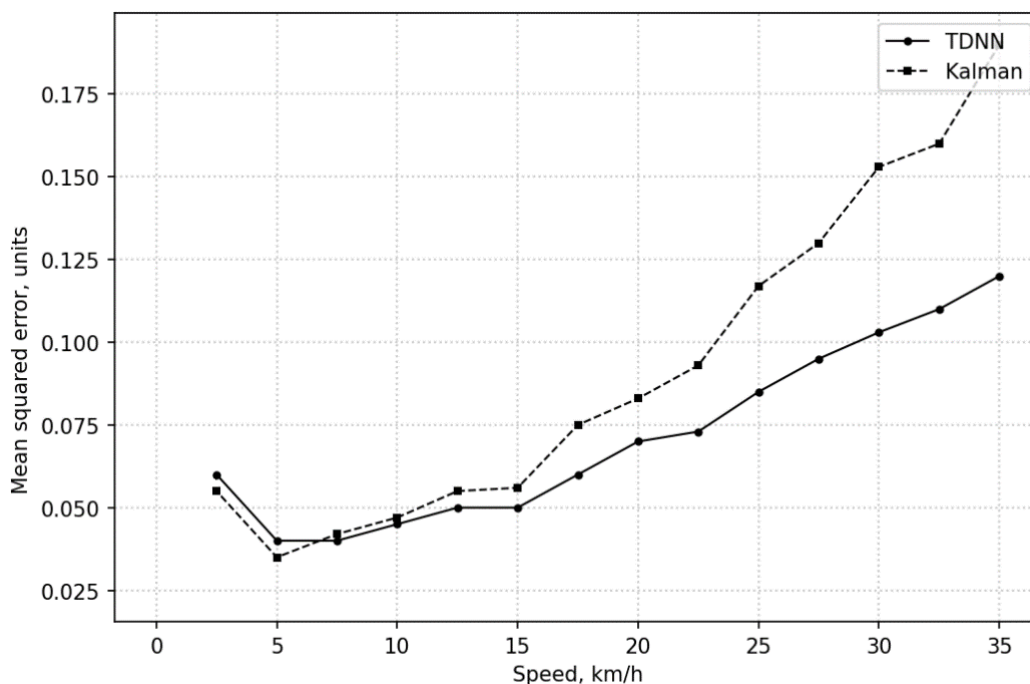
1. Формування датасету  $D$  на основі виразу (3) з використанням даних від датчиків  $x(t)$  і міток  $y$  (ваг тестових об'єктів); підготовка вхідних даних за виразом (4) для навчання нейронної мережі з часовими затримками.

2. Визначення тришарової структури нейронної мережі: ініціалізація кількості нейронів  $M$  вхідного шару для відображення динамічних властивостей системи; кількості нейронів  $K$  вихідного шару для відображення нелінійних властивостей системи [11].

3. Навчання нейронної мережі на підготовленому датасеті  $D$  методом зворотного поширення помилки.

4. Оцінювання якості моделі на тестовому датасеті з використанням критерію *mse*.

**Постановка експерименту.** Випробування запропонованого методу підвищення точності WIM системи здійснюється з використанням імітаційної моделі, за допомогою якої сформовано навчальний датасет  $D$ . Отримані дані оброблялися двома методами: за допомогою фільтрації Калмана та з використанням нейронної мережі з часовими затримками. Результати експерименту наведено на Рисунку.



**Рисунок. Порівняння результатів WIM за допомогою фільтрації Калмана та з використанням нейронної мережі з часовими затримками**

Результати, наведені на Рисунку демонструють переваги використання запропонованого методу WIM на основі нейронної мережі з часовими затримками у порівнянні з методом на основі використання фільтрації Калмана при швидкості руху транспорту від 15 км/год до 11 % та від 25 км/год до 16 %. При швидкості руху транспорту до 15 км/год точність обох методів порівняна.

**Висновки.** В результаті виконання роботи успішно вирішено проблему підвищення точності вимірювань в системах WIM в умовах інтенсивного руху транспортних засобів шляхом вдосконалення методу обробки вихідних даних з датчиків зважування з використанням моделі машинного навчання у вигляді нейронної мережі з часовими затримками. Розроблений метод дозволяє побудувати нейромережеву модель процесів WIM з урахуванням їх нелінійних та динамічних характеристик, що дає можливість підвищити точність оцінки ваги поїзда та вантажу.

Апробація методу проводилась на імітаційній моделі WIM процесу. У порівнянні з традиційними методами, що використовують статичні моделі та лінійні алгоритми, динамічні нейронні мережі продемонстрували значне підвищення точності. Експериментальні дані показали зменшення середньоквадратичної похибки до 16% порівняно з традиційним методом на основі фільтрів Калмана, що підтверджує ефективність запропонованого підходу. В результаті дослідження встановлено область ефективного використання запропонованого методу в діапазоні швидкостей від 15 до 35 км/год.

Проведені дослідження відкрили нові можливості для подальшого вдосконалення WIM систем. Так, перспективними є дослідження, спрямовані на вдосконалення архітектури нейронних мереж: використання RNN та LSTM, які можуть краще враховувати часові залежності та динаміку транспортного засобу при меншій складності мережі.

Також цікавим є використання гібридних моделей, що поєднують нейронні мережі з традиційними методами обробки даних для підвищення точності та надійності вимірювань.

Отже, застосування динамічних нейронних мереж для визначення ваги транспортного засобу в русі є перспективним підходом, який може значно підвищити швидкість руху транспортних засобів, зберігаючи при цьому точність і надійність визначення ваги транспортного засобу. Це, в свою чергу, забезпечує оперативну та точну інформацію про транспортні потоки та сприяє більш ефективному управлінню транспортною інфраструктурою та вантажопотоками.

Отримані результати можуть слугувати основою для розробки нових інноваційних вагових систем у складі сучасних інформаційних технологій та автоматизованих інтелектуальних систем управління міськими ресурсами та інфраструктурою.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang J., Wu M. “An overview of research on weigh-in-motion system”. *5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. 2004; 6: 5241–5244. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCICA.2004.1343721>.
2. Eagon M., Fakhimi S., Pernsteiner A., Northrop W. F. “Mass Detection for Heavy-Duty Vehicles using Gaussian Belief Propagation”. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. 2022. p.1655–1661. DOI: <https://doi.org/10.1109/IV51971.2022.9827370>.
3. Zhang H., Yang Z., Shen J., Long Z., Xiong H. “Dynamic mass estimation framework for autonomous vehicle system via bidirectional gated recurrent unit”. *IET Control Theory & Applications*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1049/cth2.12587>.
4. Burnos P., Gajda J., Sroka R. “Accuracy criteria for evaluation of Weigh-in-Motion systems”. *Metrology and Measurement Systems*. 2018; 24 (4): 743–751. DOI: <https://doi.org/10.24425/mms.2018.124881>.
5. Amin Habibnejad Korayem, Amir Khajepour, Baris Fidan. “Trailer mass estimation using system model-based and machine learning approaches”. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2020; 69 (11): 12536–12546. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3023115>.

6. Zhou Y., Pei Y., Zhou S., Zhao Y., Hu J., Yi, W. “Novel methodology for identifying the weight of moving vehicles on bridges using structural response pattern extraction and deep learning algorithms”. *Measurement*. 2021; 168 (9): 108384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108384>.

7. Rao A. R., Reimherr M. “Non-linear functional modelling using neural networks”. *Journal of Computational and Graphical Statistics*. 2021; 32 (4): 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1080/10618600.2023.2165498>

8. Mitrea C. A., Lee C. K. M., Wu Z. “A comparison between neural networks and traditional forecasting methods: case study”. *International journal of engineering business management*. 2009; 1 (2): 19–24. DOI: <https://doi.org/10.5772/6>.

9. Fomin O. O., Krykun V. A. “Assessment of the quality of neural network models based on a multifactorial information criterion”. *Herald of Advanced Information Technology*. 2024; 7 (1), 13–23. DOI: <https://doi.org/10.15276/hait.07.2024.1>

10. Fomin O. O., Orlov A. A. “Modeling nonlinear dynamic objects using pre-trained time delay neural networks”. *Applied Aspects of Information Technology*. 2024; 7 (1): 24–33. DOI: <https://doi.org/10.15276/aait.07.2024.2>.

11. Polozhaenko S. et al. “Interpretation method for dynamic states neural network models. *IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*. Kyiv, Ukraine. 2022. p. 1–5.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.28>

UDC 004.942

## Improving the accuracy of weighing systems in motion using dynamic neural networks

**Oleksandr O. Fomin<sup>1)</sup>**

Dr. Sc., Professor, Department of Computerized Systems and Software Technologies  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8816-0652>; [fomin@op.edu.ua](mailto:fomin@op.edu.ua). Scopus Author ID: 57103429400

**Oleksii V. Tataryn<sup>1)</sup>**

Postgraduate student, Department of Computerized Systems and Software Technologies  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3888-6569>; [otataryn@stud.op.edu.ua](mailto:otataryn@stud.op.edu.ua)

**Oleh V. Fruntov<sup>1)</sup>**

Postgraduate student, Department of Computerized Systems and Software Technologies  
E-mail: [fruntov.o.v@op.edu.ua](mailto:fruntov.o.v@op.edu.ua)

**Vitalii O. Kanevskyi<sup>1)</sup>**

Postgraduate student, Department of Computerized Systems and Software Technologies  
E-mail: [10630506@stud.op.edu.ua](mailto:10630506@stud.op.edu.ua)

<sup>1)</sup> Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine

### ABSTRACT

The paper is devoted to solving the problem of weighing vehicles in motion as part of modern information technologies and automated intelligent systems for managing urban resources and infrastructure. The aim of the work is to improve the accuracy of measurements in systems for weighing vehicles in motion in heavy traffic as part of intelligent urban infrastructure management systems, thereby contributing to the efficiency and sustainability of urban processes. The scientific novelty is the use of models in the form of neural networks with time delays to process data from weighing sensors. The application of this approach makes it possible to improve the accuracy of mass measurement in weighing systems in motion under conditions of intense traffic by taking into account the dynamic and nonlinear properties of the weighing process. The practical usefulness of the developed method lies in the development of new innovative weighing systems as part of modern information technologies and automated intelligent systems for managing urban resources and infrastructure. Testing the method on a simulation model of the WIM process demonstrated advantages in weighing accuracy compared to traditional methods using static and linear models. Experimental data showed a reduction in the root mean square error compared to the traditional method based on Kalman filters, which confirms the effectiveness of the proposed approach.

**Keywords:** Weighing in motion; neural networks with time delays; nonlinear dynamics, identification