

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ SARIMAX ТА LSTM ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАПОВНЕНОСТІ ПАРКОМІСЦЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглянуто підходи до прогнозування заповненості паркомісць у міських умовах із використанням моделей SARIMAX та LSTM. Модель SARIMAX базується на класичному аналізі часових рядів із врахуванням сезонності та зовнішніх регресорів, тоді як LSTM належить до архітектур глибокого навчання, здатних моделювати складні залежності у послідовних даних. Показано, що SARIMAX є ефективним для довгострокового прогнозування, тоді як LSTM краще справляється з короткостроковими завданнями в реальному часі. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації паркувальної інфраструктури та впровадження систем підтримки прийняття рішень у міському середовищі.

Ключові слова: SARIMAX, LSTM, прогнозування, паркомісця, часові ряди, міська інфраструктура, машинне навчання.

Abstract

This paper explores approaches to forecasting parking occupancy in urban areas using SARIMAX and LSTM models. The SARIMAX model is based on classical time series analysis with seasonal components and external regressors, while LSTM belongs to deep learning architectures capable of capturing complex dependencies in sequential data. The effectiveness of both models is evaluated using real-world data from parking facilities in Amsterdam. Results show that SARIMAX performs well for long-term forecasting, whereas LSTM is more suitable for short-term, real-time prediction tasks. These findings can be applied to optimize parking infrastructure and implement decision support systems in smart cities.

Keywords: SARIMAX, LSTM, forecasting, parking occupancy, time series, urban infrastructure, machine learning.

Мета

Із зростанням кількості автотранспорту у містах ефективне управління паркомісцями стало важливим завданням для муніципальних служб. Зменшення заторів, покращення доступності паркінгів та забезпечення зручності для водіїв вимагають точних механізмів прогнозування заповненості паркувальних майданчиків. Традиційні методи аналізу не завжди дозволяють врахувати складну сезонну динаміку, вплив погодних умов, масових подій та інші зовнішні фактори.

У цьому контексті метою даного дослідження є аналіз та порівняння ефективності двох підходів до прогнозування заповненості паркомісць — статистичної моделі SARIMAX, що базується на часових рядах, та моделі глибокого навчання LSTM, яка здатна виявляти нелінійні шаблони в послідовних даних. Робота демонструє можливості обох підходів для практичного застосування в задачах міського планування та інтелектуального управління транспортною інфраструктурою.

Вступ

Інтенсивний розвиток міст та зростання кількості приватного транспорту зумовили значне навантаження на паркувальну інфраструктуру. Обмежена кількість паркомісць, особливо в центральних районах, призводить до збільшення часу пошуку вільного місця, створення додаткових заторів та підвищення рівня забруднення повітря. У таких умовах ефективне управління паркувальними ресурсами є одним із ключових завдань сучасного міського планування.

Одним з перспективних напрямів удосконалення паркувальної інфраструктури є впровадження інтелектуальних систем прогнозування заповненості паркомісць. Завдяки точному передбаченню попиту на паркування у різні години та дні тижня можливо оптимізувати розподіл ресурсів, запровадити динамічне ціноутворення або перенаправляти потоки транспорту. Прогнозування також сприяє зниженню навантаження на дороги та покращенню якості обслуговування водіїв.

У даній роботі розглядаються два підходи до вирішення задачі прогнозування — класична статистична модель SARIMAX та модель глибокого навчання LSTM. Обидва методи застосовуються до часових рядів із врахуванням сезонності та можливого впливу зовнішніх факторів (погодні умови, події

тощо). Проведено аналіз ефективності кожного з підходів, що дозволяє сформулювати практичні рекомендації щодо їх використання в міських системах управління паркуванням.

Застосування моделей SARIMAX та LSTM для прогнозування заповненості паркомісць

У сучасній практиці прогнозування часових рядів використовується широкий спектр методів, що включає як класичні статистичні моделі, так і алгоритми машинного навчання. Для задачі передбачення заповненості паркувальних місць особливу увагу привертають моделі, здатні враховувати сезонні коливання, тренди та зовнішні чинники. У даному дослідженні розглянуто дві моделі — SARIMAX та LSTM, які представляють відповідно статистичний та нейромережевий підходи [1].

Модель SARIMAX (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average with eXogenous regressors) є розширенням SARIMA-моделі, яка сама по собі є однією з найвідоміших у сфері прогнозування часових рядів. Основна ідея SARIMAX полягає в поєднанні сезонного компонента, авторегресії, інтегрування, ковзного середнього та врахування зовнішніх регресорів (exogenous variables), які можуть впливати на цільовий показник. У контексті заповненості паркомісць такими регресорами можуть виступати погодні умови, наявність публічних подій, дні тижня або навіть тарифи на паркування. SARIMAX-модель добре підходить для випадків, коли спостерігається регулярна сезонність (наприклад, годинна, добова або тижнева) і коли важливо врахувати зовнішні чинники, що змінюють загальну динаміку. Її перевагою є прозорість інтерпретації: кожен параметр має чітке математичне значення, що дозволяє легко пояснити поведінку моделі фахівцям у сфері міського планування або транспорту. Крім того, SARIMAX демонструє стабільні результати навіть на невеликих обсягах даних. Однак одним із обмежень SARIMAX є її чутливість до нерівномірності даних та необхідність попереднього аналізу стаціонарності часових рядів. Перед побудовою моделі часто потрібно трансформувати дані: здійснювати диференціювання, нормалізацію, усунення пропусків. Також процес налаштування параметрів (p , d , q , P , D , Q , s) може бути ресурсоємним, хоча сучасні бібліотеки (наприклад, statsmodels у Python) надають інструменти для автоматичного підбору оптимальних значень [2].

З іншого боку, модель LSTM (Long Short-Term Memory) є варіантом рекурентної нейронної мережі, що спеціально розроблена для обробки послідовностей та часових рядів. Головна особливість LSTM — здатність зберігати довготривалі залежності завдяки внутрішній структурі, що включає механізми "забування", "оновлення" та "виведення" інформації через так звані "вентилі" (gates). Це дозволяє моделі LSTM успішно працювати з нерегулярними шаблонами, що можуть не піддаватися традиційному аналізу. У задачі прогнозування заповненості паркінгів LSTM може використовуватись для передбачення значень на одну або кілька годин наперед, базуючись на попередніх спостереженнях. На відміну від SARIMAX, LSTM не потребує жорсткої стаціонарності даних або спеціального виділення сезонних компонентів — модель самостійно вивчає закономірності у процесі тренування. Також LSTM краще справляється з обробкою великих обсягів даних та складних залежностей, наприклад, впливу подій, що відбулися кілька днів тому [3].

Проте модель LSTM має і певні недоліки. По-перше, вона потребує значних обчислювальних ресурсів та тривалого часу навчання, особливо при використанні великих вхідних векторів або додаткових змінних. По-друге, результати моделі можуть бути складнішими для інтерпретації, оскільки внутрішні параметри мережі (ваги, біаси, стани) не мають очевидного фізичного змісту. Це може створювати складнощі при спробах обґрунтувати рішення, прийняті на основі прогнозів LSTM, для управлінських структур або широкого загалу.

У даному дослідженні обидві моделі були протестовані в умовах короткострокового (одна година наперед) та довгострокового (до декількох місяців) прогнозування. SARIMAX показала високу стабільність у довгостроковому аналізі, особливо за умови врахування подій та погодних умов як зовнішніх регресорів [4]. У свою чергу, LSTM перевершила SARIMAX за точністю у короткострокових прогнозах завдяки здатності виявляти глибші залежності в даних. Загалом, кожен із підходів має власні переваги та доцільність використання залежно від задачі. SARIMAX — це надійний вибір для міських служб, що планують завантаженість паркінгів на тижні чи місяці вперед [5]. LSTM — кращий варіант для інтеграції у динамічні системи реального часу, які реагують на зміни протягом доби. У багатьох випадках доцільним є комбінування обох методів у рамках гібридних систем прогнозування.

Висновки

У роботі було розглянуто два підходи до прогнозування заповненості паркомісць — статистичну модель SARIMAX та нейронну мережу LSTM. Обидві моделі продемонстрували здатність вирішувати задачу коротко- та довгострокового прогнозування з прийнятною точністю, однак мають суттєві відмінності в принципах роботи, вимогах до даних та сфері застосування. Модель SARIMAX є зручною для інтерпретації та дозволяє ефективно враховувати сезонні компоненти та вплив зовнішніх регресорів, таких як погодні умови чи масові події. Вона добре підходить для сценаріїв, де важливо передбачити завантаженість паркінгів на кілька тижнів або місяців уперед. Натомість модель LSTM здатна виявляти складні, нелінійні залежності у часових рядах, що дає їй перевагу в задачах короткострокового прогнозування та в умовах високої динамічності даних.

Порівняльний аналіз підтвердив, що SARIMAX є надійним інструментом для довгострокового планування, тоді як LSTM доцільно застосовувати у реальному часі, наприклад, у мобільних додатках для водіїв чи інтегрованих міських платформах управління трафіком. Обидва підходи можуть бути ефективно використані як окремо, так і в комплексі, залежно від конкретних вимог до системи прогнозування. Отримані результати можуть бути основою для впровадження систем підтримки прийняття рішень (DSS) у сфері управління паркувальними ресурсами. Перспективними напрямками подальших досліджень є побудова гібридних моделей, які поєднують сильні сторони SARIMAX та LSTM, а також врахування додаткових просторових та соціальних факторів, що впливають на попит на паркування у міському середовищі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fokker S., Hoogendoorn-Lanser S., van Oort N., van Hagen M., Correia G. Short-Term Forecasting of Off-Street Parking Occupancy. *Transportation Research Record*, 2675(10), 2021, pp. 155–169. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/03611981211036373> (дата звернення: 20.03.2025).
2. Vazifeh M. M., Santi P., Resta G., Strogatz S. H., Ratti C. Addressing the Minimum Fleet Problem in On-Demand Urban Mobility. *Nature*, 557(7706), 2018, pp. 534–538. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29795256> (дата звернення: 20.03.2025).
3. Rosenblum J., Hudson A. W., Ben-Joseph E. Parking Futures: An International Review of Trends and Speculation. *Land Use Policy*, 91, 2020, p. 104054. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/lauspo/v91y2020ics0264837718313978.html> (дата звернення: 20.03.2025).
4. Kodransky M., Hermann G. Europe's Parking U-Turn: From Accommodation to Regulation. *Institute for Transportation and Development Policy*, New York, NY, 2010. URL: https://www.researchgate.net/publication/265083603_Europe's_Parking_U-turn_From_Accommodation_to_Regulation (дата звернення: 20.03.2025).
5. Arnott R., Inci E. An Integrated Model of Downtown Parking and Traffic Congestion. *Journal of Urban Economics*, 60(3), 2006, pp. 418–442. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094119006000386> (дата звернення: 20.03.2025).

Копиця Вадим Олександрович – аспірант групи 126-23а, факультету інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, vadym.kopytsia@gmail.com

Роман Наумович Кветний – д.т.н., професор кафедри АІТ, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, rkvetny@vntu.edu.ua

Vadym Kopytsia – post-graduate student, group 126-23a, faculty of intellectual information technologies and automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, vadym.kopytsia@gmail.com

Roman Kvyetnyy – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation and Intelligent Information Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, rkvetny@vntu.edu.ua