

Чорногор Н.О.

Українська державна льотна академія

Єніна І.І.

Українська державна льотна академія

Мацуї А.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПАСАЖИРОПОТОКАМИ В АЕРОПОРТАХ

У статті досліджується та розробляється концептуальна основа для створення динамічної інтелектуальної моделі системи підтримки прийняття рішень, призначеної для ефективного управління пасажиропотоками в умовах аеропортового середовища. Дослідження визначається першочерговою необхідністю підвищення ефективності логістики аеропортів у відповідь на стрімке зростання обсягів авіаперевезень та значну нерівномірність добових і сезонних навантажень. Проаналізовано традиційні методи прогнозування, які ґрунтуються на фіксованих розкладах і статичних даних, мають обмежену гнучкість і недостатню точність в умовах динамічної невизначеності авіаційних процесів. В статті визначена неефективність таких підходів, яка призводить до перевантаження інфраструктури, формування тривалих черг у контрольних зонах, затримок рейсів та нераціонального використання ресурсів у пікові періоди. Дослідження спрямоване на розробку концепції та алгоритмічної структури інтелектуальної моделі СППР, що базується на гібридних нейро-нечітких підходах. Дана модель повинна забезпечити рівномірний розподіл пасажирських потоків, оптимізацію використання ресурсів та підвищення якості обслуговування в міжнародних аеропортах. Для вирішення цих завдань запропонована модель, яка інтегрує передові інтелектуальні технології. У статті обґрунтовується використання гібридного підходу *Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System*, який є високоефективним інструментом для обробки динамічних і невизначених даних. ANFIS поєднує можливості штучних нейронних мереж ANN до самонавчання та нелінійного розпізнавання образів із механізмами інтерпретованості та моделювання невизначеності нечіткої логіки *Fuzzy Logic*. Дана комбінація гарантує високу точність прогнозування та адаптивне регулювання управлінських правил на основі поточних даних. Розроблено цілісну алгоритмічну структуру інтелектуальної системи управління пасажиропотоками, яка охоплює всі етапи від збору та фільтрації даних (сенсори, системи реєстрації) до їх аналізу в аналітичному модулі та прогностичної обробки в модулі ANFIS. На завершальному етапі система здійснює генерацію управлінських рекомендацій у модулі СППР з застосуванням нечітких правил та алгоритмів оптимізації для прийняття рішень. Модель вирішує проблему обмеженої динамічності традиційних статистичних і аналітичних методів в умовах постійної стохастичності та невизначеності авіаційних процесів. Вхідні параметри системи включають розклад рейсів, кількість пасажирів, стан погоди, дані з турнікетів і камер, а вихідні – прогноз обсягів пасажиропотоку та рекомендації з розподілу ресурсів. Очікувані якісні результати впровадження моделі полягають в значному підвищенні точності прогнозування пасажирських потоків і скорочення часу очікування пасажирів під час пікових годин. Запропоноване рішення сприятиме раціональному використанню інфраструктури терміналу та зменшенню нештатних ситуацій, пов'язаних із перевантаженням і затримками. Як наслідок, застосування ІСУПП забезпечить стабільність функціонування аеропорту, підвищення рівня безпеки та якості сервісу, підтверджуючи доцільність подальшого розвитку моделі як головної складової цифрової трансформації аеропортової інфраструктури.

Ключові слова: інтелектуальна модель, пасажиропотоки, адаптивне управління, гібридні підходи, нейро-нечітка логіка, організація авіаційної діяльності, авіаційна транспортна інфраструктура, оператор.

© Чорногор Н.О., Єніна І.І., Мацуї А.М., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми. Стрімке зростання обсягів авіаційних перевезень та значна нерівномірність добових і сезонних навантажень створюють серйозні проблеми для управління інфраструктурою міжнародних аеропортів. Що призводить до перевантаження терміналів, затримок рейсів, утворення тривалих черг у контрольних зонах та нестачі ресурсів у пікові періоди. Тому ефективне управління пасажиропотоками становить одне з основних завдань, від якого безпосередньо залежать пропускна спроможність, якість обслуговування та рівень безпеки.

Традиційні методи організації потоків пасажирів базуються на фіксованих розкладах та статистичних даних минулих періодів. Проте такі підходи характеризуються обмеженою адаптивністю та точністю в динамічних умовах функціонування аеропорту, особливо за наявності невизначеності та нечітких даних.

З огляду на обмеження виникає потреба у розробці нових інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (СППР), здатних забезпечити ефективне управління пасажиропотоками в режимі реального часу. Що дасть змогу здійснювати оперативний аналіз поточної ситуації, прогнозувати можливі перевантаження та формувати оптимальні стратегії організації пасажирських потоків. Застосування систем сприятиме узгодженості процесів, стабільності функціонування аеропорту і підвищенню якості сервісу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Управління пасажиропотоками є багатоаспектною задачею, що вимагає застосування різноманітних математичних та інтелектуальних методів. Класичні основи інтелектуальних систем та гібридних підходів детально розглянуто у роботах [1, 2]. Сучасний огляд штучного інтелекту охоплюючий СППР та машинне навчання (ML), описано у роботі Расела і Норвінга [2].

Деякі автори займалися дослідженнями з управління пасажиропотоками та аеропортової логістики займалися [3, 4, 5]. Так автори [3] демонструють ефективність імітаційного моделювання Monte Carlo simulation для аналізу руху пасажирів. В статті [4] розглядаються прогнозування обсягів пасажиропотоку з використанням статистичного аналізу моделі ARIMA. Загальний огляд СППР для оперативного управління аеропортовими операціями надано у дослідженні [5].

В роботі [6] автори демонструють успішне прогнозування обсягу авіаційних перевезень із використанням нейронних мереж. Робота Зої

і Хансена [7] показує високу точність штучних нейронних мереж (ANN) для прогнозування затримок. Практичне застосування гібридних підходів підтверджує дослідження [8] по використанню моделі ANFIS-GA для прогнозування транспортних потоків. В роботі [9] автори підкреслюють зростаюче значення інтелектуальних систем у термінальних операціях.

Актуальність розробки цілісної структури СППР обґрунтовані в [10], де розглядається архітектура та функціональність інтелектуальних систем управління аеропортовою діяльністю. Особливої уваги заслуговують дослідження, сфокусовані на проблемі невизначеності для авіаційних процесів. Так, у роботі [11] автори безпосередньо розглядають моделювання пасажиропотоків у транспортних вузлах з урахуванням невизначеності, підкреслюючи необхідність використання гнучких інструментів.

Аналіз публікацій свідчить, що значна кількість досліджень зосереджена на окремих проблемах, або на загальній архітектурі СППР [7, 10], або на застосуванні гібридних методів для прогнозування [1, 9]. Недостатньо уваги приділено розробці комплексної алгоритмічної структури СППР, яка б ефективно інтегрувала гібридне прогнозування із механізмом прийняття управлінських рішень у реальному часі. Існуючі моделі часто потребують модернізації механізму обробки невизначеності для забезпечення адаптивного управління.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених окремим елементам системи, залишається невирішеною проблема розробки цілісної, адаптивної та гібридної інтелектуальної моделі СППР (ІСУПП), здатної перетворювати високоточні прогнози на оперативні, інтерпретовані управлінські рекомендації для аеропортових операторів. Саме на розробку такої комплексної концепції, яка органічно поєднує архітектурні вимоги з механізмами моделювання невизначеності через гібридний підхід спрямовано дане дослідження.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка концепції та алгоритмічної структури інтелектуальної моделі СППР, що базується на гібридних нейро-нечітких підходах. Модель повинна забезпечити рівномірний розподіл пасажирських потоків, оптимізацію використання ресурсів та підвищення якості сервісу в міжнародних аеропортах.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання взаємопов'язаних завдань. Необ-

хідно обґрунтувати доцільність застосування гібридних нейро-нечітких підходів для підвищення адаптивності та точності прогнозування в умовах невизначеності властивій авіаційним процесам. Визначити вхідні та вихідні параметри функціонування інтелектуальної моделі, а також джерела даних, що використовуватимуться для її навчання й перевірки. Розробити алгоритмічну структуру моделі системи.

Виклад основного матеріалу. Управління пасажиропотоками являється комплексною складовою організації авіаційної діяльності, спрямованою на забезпечення раціонального переміщення пасажирів у межах аеропорту від прибуття до відправлення. Процес управління охоплює моніторинг, планування, регулювання та контроль потоків у всіх вузлових зонах, як реєстрація, контроль безпеки, паспортний контроль, зони очікування та посадки. Основною метою цього процесу є мінімізація часу перебування пасажирів при збереженні високого рівня комфорту та безпеки.

Динаміка пасажиропотоків формується під впливом складної багатофакторної системи. На інтенсивність і структуру потоків впливають як внутрішні, так і зовнішні чинники.

Для вирішення задач прогнозування та управління пасажиропотоками в аеропортах застосовується широкий спектр методів, які можна класифікувати за підходами на п'ять основних груп. Проведено їх порівняльний аналіз, щоб визначити особливості застосування кожного підходу (рис. 1).

Попереднє визначення обсягів потоків дозволяє завчасно розподілити ресурси по персоналу та обладнанню, скоригувати графіки та уникнути перевантаження, а для інтеграції даних у реальному часі використовуються інформаційні системи управління аеропортом.

Поєднання інтелектуальних алгоритмів прогнозування та сучасних інформаційних систем формує основу адаптивного управління пасажиропотоками, що підвищує ефективність використання ресурсів і якість сервісу.

Інтелектуальні СППР в авіаційній галузі допомагають приймати ефективні управлінські рішення в умовах складності, невизначеності та динамічних змін, застосовуючись для аналізу, прогнозування, оптимізації розкладів, управління ресурсами. Проведено дослідження інтелектуальних підходів до управління пасажиропотоками та визначено методи, що дають змогу обробляти нечіткі, неповні або динамічні дані (рис. 2).

Серед методів, базованих на навчанні та знаннях, особливо значущими є нейромеревеві моделі та нечіткі логічні системи. Нейромеревеві моделі (ANN) навчаються на великих обсягах історичних даних, виявляють приховані закономірності та застосовуються для прогнозування кількості пасажирів і затримок. Як зазначено у [6, с. 117], «нейромереві активно використовуються для аналізу часових рядів та багатофакторного прогнозування». В той час нечіткі логічні системи (Fuzzy Logic) формалізують експертні знання у вигляді логічних правил. Fuzzy Logic



Рис. 1. Порівняльна характеристика основних підходів до прогнозування та управління пасажиропотоками



Рис. 2. Підходи до прогнозування та управління пасажиропотоками

краще моделюють невизначеність, властиву авіаційним процесам, зокрема варіаціям часу обслуговування або затримкам рейсів.

У результаті аналізу встановлено, що гібридні нейро-нечіткі підходи демонструють найвищу ефективність. Тому комбінування нечіткої логіки та нейронних мереж поєднує здатність нейромереж до навчання з інтерпретованістю нечітких моделей. Як наслідок, система зможе адаптивно коригувати правила прийняття рішень на основі поточних даних для управління пасажиропотоками в умовах швидкої зміни ситуації в аеропорту.

На основі проведеного аналізу запропоновано концепцію моделі інтелектуальної системи управління пасажиропотоками (ІСУПП) в аеропорту. Для побудови моделі визначено вхідні, проміжні та вихідні параметри функціонування системи (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри ІСУПП

| Категорія | Параметри | Джерело даних |
|---------------|---|--|
| Вхідні дані | розклад рейсів, кількість пасажирів, стан погоди, тили літаків, час обслуговування, дані з турникетів і камер | системи аеропорту, API авіакомпаній, сенсори |
| Проміжні дані | історичні тренди, коефіцієнти сезонності, оцінка завантаження терміналів | аналітична база даних |
| Вихідні дані | прогноз обсягів пасажиропотоку, рекомендації з розподілу ресурсів, сценарії управлінських дій | СППР, оператори, системи планування |

На базі визначених параметрів створено модель ІСУПП, яка складається з підсистеми збору даних, аналітичної підсистеми, прогностичного модуля, інтерфейса моніторингу та візуалізації і модуля підтримки прийняття рішень.

Алгоритмічна структура моделі ІСУПП приведена на рисунку 3. Вона описує комплексну гібридну СППР-модель, що поєднує і комбінує елементи з методів базованих на навчанні та методів базованих на знаннях, для генерації управлінських рекомендацій. Головним елементом системи є модуль прогнозування (5) використовуючий гібридні нейро-нечіткі підходи. Дана інтеграційна парадигма поєднує нейронні мережі і нечітку логіку. ANN забезпечують здатність системи до навчання на історичних даних, виявлення нелінійних залежностей та автоматичного налаштування параметрів, тобто компонент базований на навчанні. При цьому Fuzzy Logic забезпечує інтерпретованість системи та можливість моделювати невизначеність за допомогою лінгвістичних правил базованих на знаннях.

Функціонування моделі ІСУПП відбувається наступним чином. Інформація з реальних джерел (1 – систем реєстрації, контролю безпеки, сенсорів, камер, систем моніторингу рейсів) надходить в підсистему збору даних (2). На цьому етапі здійснюється первинна обробка даних, фільтрація шумів та усунення пропусків. Далі аналітичний модуль (3) виконує узгодження даних та їх детальний аналіз, використовуючи інформацію з бази даних знань (4) для формування чистих вхідних параметрів. На основі очищених даних модуль прогнозування (5) здійснює коротко- та середньострокове прогнозування обсягів пасажиропотоків. Для цього застосовуються інтелектуальні методи нечіткої логіки, нейромережі або гібридні нейро-нечіткі підходи. Система підтримки прийняття рішень (6) аналізує отримані результати прогнозу, формує оптимальні сценарії управління на основі нечітких правил і алгоритмів оптимізації.



Рис. 3. Структурна модель ІСУПП для управління пасажиропотоками

Сформовані рекомендації (7) візуалізуються для операторів аеропорту (8). Через інтерфейс моніторингу вони можуть переглянути поточний стан системи та оцінити запропоновані сценарії реагування. На підставі цього оператори приймають остаточні рішення та ініціюють управлінські дії.

Висновки. Впровадження ІСУПП, заснованої на гібридному підході, дозволяє суттєво підвищити точність прогнозування потоків пасажирів і своєчасність реагування на операційні зміни. Очікується значне скорочення часу очікування пасажирів у пікові години, раціональне використання інфраструктури терміналу та зменшення кількості нештатних ситуацій, пов'язаних із перевантаженням. Застосування інтелектуальних алгоритмів забезпечує стабільність функціонування системи та підвищення рівня безпеки й якості сервісу. Отримані результати підтверджують доцільність подальшого розвитку моделі ІСУПП як складової цифрової трансформації аеропортової інфраструктури.

Список літератури:

1. Haykin S. *Neural Networks and Learning Machines* (3rd ed.). Pearson Education. Prentice Hall, 2009. 906 p. URL: <https://dai.fmph.uniba.sk/courses/NN/haykin.neural-networks.3ed.2009.pdf>
2. Russell S. J., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson. Berkeley, 2020. 1136 p. URL: http://lib.yzu.am/disciplines_bk/efdd4d1d4c2087fe1cbe03d9ced67f34.pdf
3. Hsu C. I., Yen J. M. Analysis of passenger flow in airport terminal with Monte Carlo simulation and Petri net. *Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE)*. 132(11), 2006. Pp. 856–865. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:11(856).
4. Tam M., Lam W. H. Forecasting of air passenger traffic using seasonal ARIMA with intervention. *Journal of Transportation Engineering. American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 134(11). 2008. Pp. 939–948. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:11(939).
5. Tosic V., Mirjana M. Intelligent decision support systems for airport operations management. *Transportation Research Procedia*. Elsevier, (30). 2018. Pp. 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.020>.
6. Єніна І. І., Бреус П. П. Прогнозування обсягу авіаційних перевезень із використанням нейронних мереж. *Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем*: зб. матеріалів XIII Міжнар. наук.-практич. конф., Кропивницький: УДЛІА, 2025. С. 117–120. URL: https://sfa.org.ua/images/docs/Zbirnyk_Konferentsiia_26022025r.pdf
7. Zou B., Hansen M., Yang B. Forecasting air passenger delay using artificial neural networks and multiple regression models. *Transportation Planning and Technology*. Taylor & Francis, 30(2). 2007. Pp. 173–193. <https://doi.org/10.1080/08905470701460515>.
8. Kumar D., Garg A. Hybrid ANFIS-GA model for forecasting the passenger flow in metro rail system. *Neural Computing and Applications*. Springer, 30(2). 2018. Pp. 521–531. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2580-2>
9. Wong K. F., Tsang E. C. A survey on intelligent decision support systems in airport terminal operations. *Journal of Advanced Transportation*. Wiley, 49(7). 2015. 896–914. <https://doi.org/10.1002/atr.1311>
10. Слабкий В. О., Шрамко В. О. Інтелектуальні системи управління аеропортовою діяльністю: архітектура та функціональність. *Науковий вісник НАУ. Серія: Технічні науки*. 2(3). 2019. С. 154–160.
11. Пономарьова О. М., Прохоренко В. А. Моделювання пасажиропотоків у транспортних вузлах з урахуванням невизначеності. *Проблеми та перспективи розвитку системи авіаційної безпеки*. 2020. 3(1). С. 74–81.

Chornogor N.O., Ienina I.I., Matsui A.M. INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM MODEL FOR PASSENGER FLOW MANAGEMENT IN AIRPORTS

The article explores and develops a conceptual framework for creating a dynamic intelligent Decision Support System model designed for the effective management of passenger flows in an airport environment. The relevance of the study is determined by the critical need to enhance the efficiency of airport logistics in response to the rapid growth of air traffic volumes and the significant irregularity of daily and seasonal loads. Traditional forecasting methods, which rely on fixed schedules and static data, have limited flexibility and insufficient accuracy under the dynamic uncertainty of aviation processes. The inefficiency of such approaches leads to infrastructure overload, the formation of prolonged queues in control zones, flight delays, and the irrational use of resources during peak periods. The goal of this research is to develop the concept and algorithmic structure of an intelligent DSS model based on hybrid neuro-fuzzy approaches. This model must ensure the uniform distribution of passenger flows, optimization of resource utilization, and improvement of service quality in international airports. To address these challenges, the proposed model integrates advanced intelligent technologies. The paper substantiates the use of the hybrid Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System approach, which serves as a highly effective tool for processing dynamic and uncertain data. ANFIS combines the self-learning and nonlinear pattern recognition capabilities of Artificial Neural Networks with the mechanisms of interpretability and uncertainty modeling of Fuzzy Logic. This combination ensures high forecasting accuracy and adaptive regulation of management rules based on current data. A holistic algorithmic structure of the Intelligent Passenger Flow Management System (IPFMS) has been developed. This structure encompasses all stages: from data collection and filtering (sensors, registration systems) to analysis in the analytical module, prognostic processing in the ANFIS module, and the generation of management recommendations in the DSS module, which applies fuzzy rules and optimization algorithms for decision-making. The model solves the problem of limited dynamism of traditional statistical and analytical methods under the constant stochasticity and uncertainty of aviation processes. The system's input parameters include flight schedules, passenger counts, weather conditions, data from turnstiles and cameras, while the outputs are the forecast of passenger flow volumes and recommendations for resource allocation. The expected qualitative outcomes of the model's implementation include a significant increase in the accuracy of passenger flow forecasting and a reduction in passenger waiting times during peak hours. This will contribute to the rational utilization of terminal infrastructure and a decrease in irregular situations related to congestion and delays. Thus, the application of the IPFMS ensures the stability of airport operations, an increase in the level of safety and service quality, confirming the expediency of the model's further development as a key component of the digital transformation of airport infrastructure.

Key words: *intelligent model, passenger flows, adaptive management, hybrid approaches, neuro-fuzzy logic, organization of aviation activities, aviation transport infrastructure, operator.*

Дата надходження статті: 23.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025