

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції  
**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:**  
**ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**

18 грудня 2025 року



**Полтава 2025**

УДК 004.855:621.396

*О.С. Фомін, к.т.н., доцент*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»*

## **РОЗПІЗНАВАННЯ БПЛА ЗА СПЕКТРАМИ РАДІОСИГНАЛІВ**

Інтенсивність використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за останні роки суттєво зросла, як в цивільній, так і в оборонній сферах. Забезпечення безпеки повітряного простору вийшло на перший план. Традиційні способи виявлення літальних апаратів засновані на візуальному спостереженні, акустичному аналізі або фізичному перехопленні виявилися недостатньо ефективними в задачах їх виявлення і моніторингу.

Проведено розгорнуте теоретичне узагальнення та здійснено порівняння сучасних підходів машинного навчання, що використовуються для розпізнавання типів БПЛА за спектральними характеристиками їхніх радіовипромінювань. Проаналізовано принципи побудови інформаційних моделей, які спираються на часово-частотні параметри сигналів, а також підходи до формування навчальних вибірок, що ґрунтуються на спектрограмах, вейвлет-аналізі, фур'є-коефіцієнтах та інших показниках спектральної щільності потужності. Окремий акцент зроблено на методах попередньої обробки даних, які дозволяють відокремити важливі структурні риси навіть у широкосмугових або зашумлених сигналах.

Серед методів пасивного виявлення БПЛА дедалі більшого значення набуває створення моделей машинного навчання, які можуть визначати тип апарата на основі спектральних особливостей його радіовипромінювання. Це зумовлено необхідністю постійно контролювати повітряний простір навіть за умов складної електромагнітної обстановки, наявності перешкод та нестійких характеристик каналу зв'язку. Основою радіочастотного контролю БПЛА є форма отриманих від них сигналів, яка визначає характерні патерни для подальшої обробки алгоритмами машинного навчання. На практиці для аналізу радіосигналів найчастіше використовують спектрограми, отримані за допомогою короткочасного перетворення Фур'є, вейвлет-аналізу, а також різноманітних енергетичних і статистичних метрик - таких як спектральна щільність енергії, автокореляційні характеристики та інші показники у часо-частотній області [1]. Спектрограми дають змогу перетворити одновимірний сигнал у зображення, придатні для подальшої обробки в згорткових нейронних мережах (CNN), завдяки чому суттєво покращується точність моделей [2]. Моделі на основі CNN добре справляються з узагальненням під час класифікації різних типів БПЛА, оскільки здатні навчатися безпосередньо на спектрограмах, не потребуючи попереднього формування ознак вручну. Проте їхня ефективність знижується, коли йдеться про обробку тривалих

сигналів або часових змін у даних, де важливу роль відіграє динаміка послідовностей.

Щоб усунути цей недолік, часто використовують рекурентні нейронні мережі (RNN), а також їхні вдосконалені модифікації - LSTM і GRU [3]. Вони здатні ефективно опрацьовувати часові залежності у радіосигналах, що дає можливість відстежувати зміни їхньої частотної структури протягом усього часу спостереження. Водночас у ситуаціях із високою мінливістю сигналу або його чутливістю до завад такі моделі можуть демонструвати нестійкість під час навчання.

Наступним логічним кроком став синтез змішаних моделей, в яких згорткові мережі поєднуються з рекурентними в єдиній архітектурі. CNN-блок відповідає за первинне виділення спектральних особливостей сигналу, тоді як LSTM-мережа обробляє їх як послідовність в часі. Це дозволяє скористатися сильними сторонами обох типів моделей і забезпечує високу точність навіть при значному рівні шуму. Ефективність цих гібридних систем підтверджена багатьма практичними роботами, зокрема під час розпізнавання схожих типів БПЛА, у яких частотні ознаки частково перекриваються [4]. Особливий інтерес нині викликають моделі на базі трансформерів (Transformer), які добре виявляють довгострокові залежності між частинами сигналу й зберігають високу точність класифікації навіть тоді, коли сигнал подано неповністю або він частково спотворений.

У ході дослідження було підтверджено, що методи машинного навчання мають значний потенціал для визначення типів БПЛА за спектральними особливостями їхніх радіосигналів. Отримані напрацювання плануються покласти в основу розробки практичних інженерних рішень у сфері інтелектуальних систем моніторингу повітряного простору.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Mo Y., Huang J., Qian G. *Deep learning approach to UAV detection and classification by using compressively sensed RF signal. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 8. Article No. 3072.*
2. Hou C., Fu D., Zhou Z., Wu X. *A deep learning-based multi-signal radio spectrum monitoring method for UAV communication. Drones. 2023. Vol. 7, No. Article No. 511.*
3. Nemer I., Sheltami T., Ahmad I., Yasar A.U.H., Abdeen M.A. *RF-based UAV detection and identification using hierarchical learning approach. Sensors. 2021. Vol. 21, No. 6. Article No. 1947.*
4. Zhang H., Li T., Li Y., Li J., Dobre O.A., Wen Z. *RF-based drone classification under complex electromagnetic environments using deep learning. IEEE Sensors Journal. 2023. Vol. 23, No. 6. P. 6099–6108.*

**UAV RECOGNITION BY RADIO SIGNALS SPECTRA**

***O. Fomin**, Candidate of Engineering Sciences/PhD, Associate Professor  
National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”*