

Акустичний метод ідентифікації застосування безпілотних літальних апаратів як джерел надзвичайних ситуацій

Acoustic method for identifying the use of unmanned aerial vehicles as sources of emergencies

Вадим Тютюник^A

Correspond author: доктор технічних наук, професор, e-mail: tutunik.vadim.72@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5394-6367

Олександр Левтеров^A

доктор технічних наук, професор, e-mail: alionterra@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5926-7146

Ольга Тютюник^B

кандидат технічних наук, доцент, e-mail: tutunik.o@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3330-8920

Дмитро Усачов^A

ад'юнкт, e-mail: usachovrabortadsns21@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1140-9798

Vadym Tiutiunyk^A

Correspond author: Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: tutunik.vadim.72@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5394-6367

Oleksandr Levterov^A

Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: alionterra@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5926-7146

Olha Tiutiunyk^B

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: tutunik.o@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3330-8920

Dmytro Usachov^A

ад'юнкт, e-mail: usachovrabortadsns21@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1140-9798

^A Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

^B Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна

^A National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkov, Ukraine

^B Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkov, Ukraine

Received: February 16, 2025 | **Revised:** February 26, 2025 | **Accepted:** February 28, 2025

DOI: 10.33445/sds.2025.15.1.26

Мета роботи: подальший розвиток науково-технічних основ акустичного моніторингу та автоматизованої ідентифікації різних типів безпілотних літальних апаратів, що становлять небезпеки для життєдіяльності цивільного населення та нормального функціонування інфраструктури держави.

Метод дослідження: методи аналізу та синтезу акустичних сигналів.

Теоретична цінність дослідження: удосконалено метод автоматичного виявлення безпілотних літальних апаратів та визначення їх типів на основі акустичних сигналів, який поєднує кластерний аналіз і вейвлет-аналіз. Застосування удосконаленого методу для трьох різних моделей безпілотних літальних апаратів дозволило з ймовірністю до 90 % точно ідентифікувати тип безпілотного літального апарату за їх акустичним сигналом.

Практична цінність дослідження: розроблено керуючий алгоритм удосконаленого методу, який передбачає виконання наступних процедур: 1) моніторинг акустичного простору охоронюваної зони за допомогою системи наземних автоматизованих пристроїв акустичного контролю та пасивної локації джерел небезпек; 2) фільтрація шумів та посилення «корисного» сигналу; 3) частотний аналіз «корисного» сигналу; 4) виявлення безпілотного літального апарату; 5) ідентифікація виявленого безпілотного літального апарату; 6) розробка пропозицій для прийняття антикризових рішень.

Тип статті: теоретичний, практичний.

Purpose: further development of the scientific and technical foundations of acoustic monitoring and automated identification of various types of unmanned aerial vehicles that pose a danger to the lives of the civilian population and the normal functioning of the state's infrastructure.

Method: methods of analysis and synthesis of acoustic signals.

Theoretical implications: the method for automatic detection of unmanned aerial vehicles and determination of their types based on acoustic signals, which combines cluster analysis and wavelet analysis, has been improved.

Practical implications: a control algorithm for the improved method has been developed, which involves the following procedures: 1) monitoring of the acoustic space of the protected area using a system of ground-based automated acoustic control devices and passive location of sources of danger; 2) noise filtering and amplification of the "useful" signal; 3) frequency analysis of the "useful" signal; 4) detection of an unmanned aerial vehicle; 5) identification of the detected unmanned aerial vehicle; 6) development of proposals for anti-crisis decisions.

Papertype: theoretical, practical.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, безпілотний літальний апарат, моніторинг, ідентифікація, акустичний сигнал, спектральний аналіз, кластерний аналіз, вейвлет-аналіз.

Key words: emergency, unmanned aerial vehicle, monitoring, identification, acoustic signal, spectral analysis, cluster analysis, wavelet analysis.

Вступ

Під час дії в Україні воєнного стану спостерігається значне зростання кількості небезпечних для цивільного населення та інфраструктури держави інцидентів із застосуванням безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Так, у 2024 році: російська армія масовано атакувала місто Берислав Херсонської області безпілотниками. Внаслідок атаки загинули двоє чоловіків – волонтери з Франції. З травмами до лікарні доставили ще трьох іноземців та 41-річного одесита (лютий 2024 року) [1]; російські війська обстріляли з дрона цивільне авто на Глухівщині у Сумській області. Унаслідок атаки загинуло молоде подружжя. Прокурори відкрили кримінальне провадження за фактом порушення законів та звичаїв війни, поєданого з умисним вбивством (серпень 2024 рік) [2]; FPV-дрон влучив в рейсовий автобус у Миропіллі на Сумщині. Унаслідок атаки є поранені цивільні (вересень 2024 року) [3]; у Херсоні ворожий дрон атакував автомобіль швидкої меддопомоги. Поранення дістали двоє працівників. Їх доправили до лікарні із вибуховими травмами та контузійми, а також уламковими пораненнями ніг (жовтень 2024 року) [4]; завдано удару безпілотниками по Одесі. Внаслідок атаки у місті є руйнування цивільної інфраструктури, загинула людина та щонайменше 13 постраждалих (листопад 2024 року) [5]; у Салтівському районі Харкова внаслідок удару ворожого БПЛА біля торговельного комплексу було зафіксовано пошкодження житлового будинку. Унаслідок атаки постраждали четверо осіб (листопад 2024 року) [6].

Виходячи з аналізу цих небезпечних подій, слід зазначити, що у функціонуючій в Україні єдиній державній системі цивільного захисту (ЄДСЦЗ) процес виявлення БПЛА та передавання інформації про їх місцезнаходження, тип і можливі наслідки надзвичайних ситуацій (НС) відбуваються вже постфактум, коли дрон вже вразив ціль, або завдав шкоди. Це вказує на необхідність термінового розв'язання питань включення до складу ЄДСЦЗ різних функціональних елементів територіальної автоматизованої системи моніторингу НС та ситуаційних центрів, які, відповідно до даних [7], жорстко пов'язані між собою на інформаційному та виконавчому рівнях для прийняття відповідних антикризових рішень щодо виявлення, ідентифікації, попередження та ліквідації небезпечних для цивільного населення та інфраструктури держави інцидентів із застосуванням БПЛА.

Актуальності проведенню цих наукових досліджень надає той факт, що Рада національної безпеки і оборони України вирішила розширити та у подальшому розвинути єдину мережу ситуаційних центрів, до складу якої мають входити Головний ситуаційний центр України, Урядовий ситуаційний центр, ситуаційні центри органів сектору безпеки і оборони, ситуаційні центри центральних органів виконавчої влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, обласних, Київської та Севастопольської міських державних адміністрацій, а також резервні та рухомі ситуаційні центри [8].

В той же час, у порівнянні з оптичним та радіолокаційним моніторингом (як основними джерелами інформації для функціонування ситуаційних центрів в державі), звукова ідентифікація малорозмірних БПЛА має ряд суттєвих переваг. Це і обумовило напрямок наших досліджень.

Теоретичні основи дослідження

Аналіз наукових джерел та Інтернет-ресурсів свідчить, що основною проблемою дослідження методу акустичної ідентифікації БПЛА є необхідність зменшення часу обробки даних у реальних умовах експлуатації БПЛА. Це питання ускладнюється обробкою значного обсягу інформації, що негативно впливає на ефективність швидкої ідентифікації. Так, у дослідженні [9] було запропоновано вдосконалити існуючі набори даних за допомогою генеративних змагальних мереж (GAN). Це дозволило створювати штучні аудіозаписи, які імітують реальні

звуки БПЛА. Результати показали, що GAN допомагає підвищити продуктивність класифікаторів, особливо у випадках нестачі реальних даних. Однак, навчання моделей вимагає великих і різноманітних наборів даних, які іноді важко зібрати. Навіть з використанням GAN, штучні дані не завжди повністю відповідають реальним звуковим умовам.

У дослідженні [10] зібрано аудіодані дронів із навантаженням та без, а також шумів навколишнього середовища. Для аналізу використовувались моделі у вигляді рекурентних нейронних мереж (recurrent neural networks, RNN), які показали високу точність при розрізненні навантажених і ненавантажених дронів та фонових шумів. Базуючись на аналізі цих джерел встановлено, що головним недоліком аналізу акустичних даних, особливо за допомогою алгоритмів глибокого навчання, є велике значення обчислювальних ресурсів. Це може ускладнити використання в реальному часі.

Над вдосконаленням цих параметрів працюють розробники з різних галузей світових компаній. Такі як: SoundCom Technologies, компанія зі США, яка спеціалізується на розробці акустичних сенсорних систем для виявлення та класифікації звуків різних джерел, у тому числі БПЛА. Вони використовують передові технології цифрової обробки звуку, щоб створювати рішення для безпеки і моніторингу, здатні визначати наявність дронів. Їхні технології застосовуються в аеропортах і на критичних об'єктах для запобігання незаконним польотам і вторгненням [11]; DroneShield, австралійська компанія, є однією з провідних в розробці технологій безпеки від дронів. Вони пропонують комплексні рішення для виявлення, нейтралізації та блокування дронів, використовуючи акустичні, радарні та радіочастотні сенсори. Їхні системи застосовуються в урядових організаціях, а також для охорони аеропортів та інших важливих об'єктів, допомагаючи вчасно виявляти дрони та запобігати несанкціонованим польотам [12]; ParaZero, ізраїльська компанія, займається розробкою систем безпеки для дронів. Вони використовують акустичні технології для виявлення небезпечних ситуацій, таких як порушення сигналу або проблеми з дронами під час польоту. Компанія орієнтується на забезпечення безпеки в авіаційній індустрії та серед підприємств, які працюють з дронами, допомагаючи запобігати аваріям та несанкціонованим польотам [13]; Dronelock, компанія з Нідерландів, розробляє технології для боротьби з дронами, включаючи акустичні системи для виявлення та відслідковування БПЛА. Їхні сенсори допомагають ідентифікувати місцезнаходження дронів і захищати важливі об'єкти, такі як аеропорти, промислові зони та інші чутливі інфраструктури [14]; Microflown Avisa, також з Нідерландів, є лідером у сфері акустичних сенсорів для виявлення дронів. Вони використовують мікрофлуд-акустичні сенсори, які здатні точно виявляти звуки, створювані БПЛА, навіть у складних умовах. Їхні системи застосовуються для захисту аеропортів, військових баз і державних установ, а також для запобігання незаконним або небезпечним вторгненням дронів у повітряний простір [15].

В Україні також проводиться ряд досліджень щодо розробки акустичних локаторів для виявлення БПЛА. Так, у роботі [16] автором запропоновано простий та дешевий для конструювання акустичного детектора з одним електретним мікрофоном CMA-4544PF-W із поролоновою вітрозахисною насадкою, а для забезпечення широкого динамічного діапазону та захисту детектора від перевантаження використано підсилювач із системою автоматичного регулювання підсилення зі зворотним регулюванням на базі інтегральної мікросхеми MAX9814. Метод обробки акустичних сигналів від малих БПЛА ґрунтується на використанні згорткової нейронної мережі. Практичне застосування цього детектору полягає у створенні індивідуального засобу захисту від малих БПЛА на дистанції до 200 м.

Постановка проблеми

Перспективою для держави є створення геоінформаційної системи виявлення та ідентифікації різного типу БПЛА, як інструменту проведення високоточних вимірювань в реальних умовах

експлуатації для надійного функціонування єдиної мережі ситуаційних центрів. Це питання потребує проведення подальших вітчизняних наукових досліджень.

Методологія дослідження

В основу методу автоматизованої ідентифікації різних типів БПЛА покладено особливості амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів при польоті БПЛА. Цей підхід дозволяє виділити ключові характеристики сигналу, що є унікальними для кожного типу БПЛА.

Запропонований метод ідентифікації було реалізовано шляхом проведення експериментів із використанням різних типів БПЛА. Для цього акустичні дані реєструвалися за допомогою спеціально створеної лабораторної установки (рис. 1).

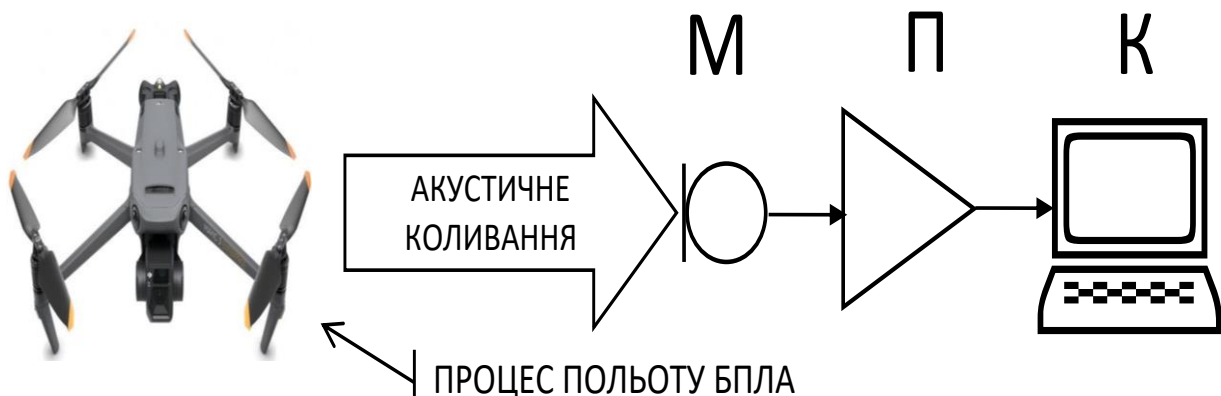


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки для аналізу амплітудно-частотних характеристик акустичних коливань процесу польоту різних типів безпілотних літальних апаратів: М – мікрофон; П – підсилювач; К – комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням

Під час експерименту були зібрані дані акустичних сигналів від трьох БПЛА (DJI Mavic 3t, FPV 7inch ProDrone та Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK) в різних умовах, як потенційно можливих, що здійснюють розвідувальні операції. При цьому були враховані різні умови експерименту, такі як: зміна висоти польоту, швидкість, вплив зовнішніх факторів, таких як вітер і рівень фонових шумів. Отримані дані є інформацією для визначення алгоритмів автоматичного розпізнавання та моніторингу БПЛА у повітряному просторі держави.

Кожен БПЛА має унікальні характеристики акустичних спектрів, які дозволяють розпізнавати його серед інших об'єктів. Отримання характеристик здійснюється шляхом обробки сигналу. Спочатку сигнал фільтрується для виділення корисного сигналу, після чого застосовується вікно Хеммінга для згладжування спектра. Далі сигнал очищується від шумів, що дозволяє відокремити характерні частоти, відповідні конкретному типу БПЛА. Такий підхід було використано авторами у роботі [17] при ідентифікації різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів. Цей підхід також було використано при виявленні та класифікації БПЛА, амплітудно-частотні характеристики яких наведено на рис. 2–4.

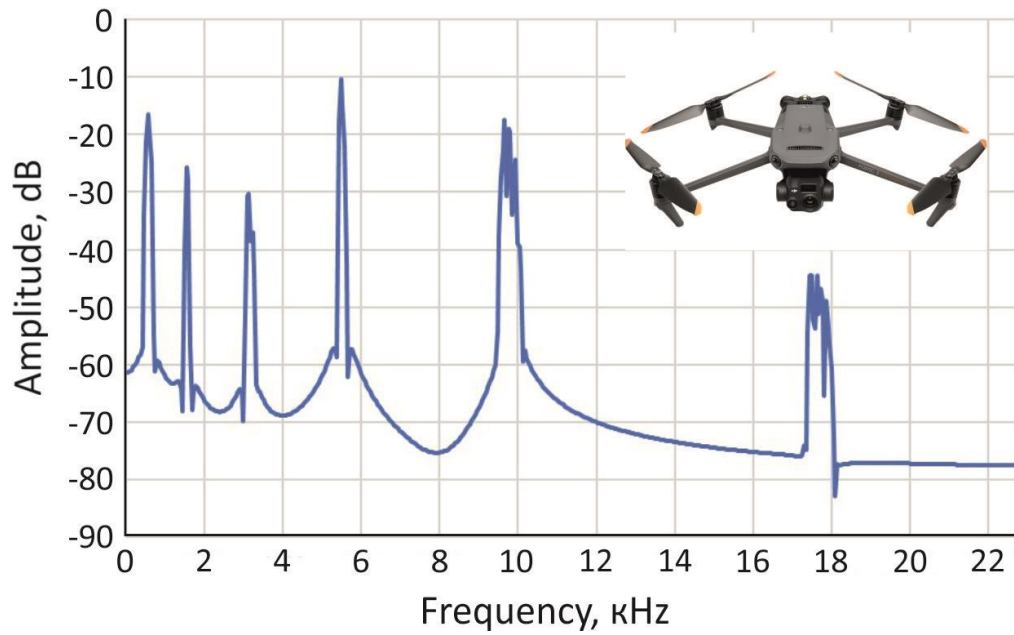


Рисунок 2 – Спектр акустичного сигналу польоту безпілотного літального апарату типу DJI Mavic 3t

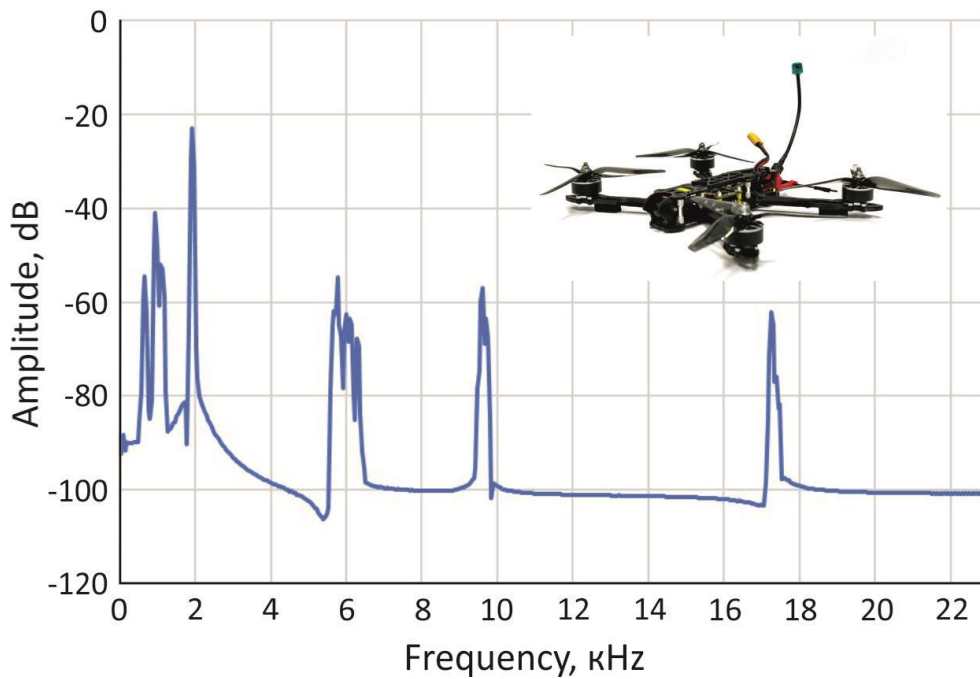


Рисунок 3 – Спектр акустичного сигналу польоту безпілотного літального апарату типу FPV 7inch ProDrone

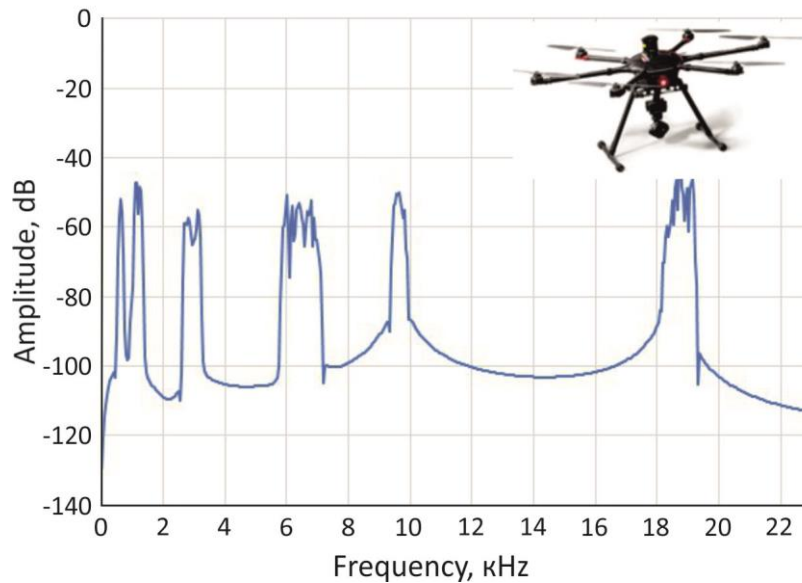


Рисунок 4 – Спектр акустичного сигналу польоту безпілотного літального апарату типу Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK

Представлені на рис. 2–4 спектральні характеристики вказують на їх унікальність та можливість розробки достовірного експрес методу ідентифікації різних типів БПЛА за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів, які утворюються в процесах польотів дронів.

Результати

З метою визначення характеристичних частот акустичних сигналів від досліджуваних зразків БПЛА на рис. 5 представлено сумарний графік амплітудно-частотної характеристики цих моделей БПЛА. На графіку відображено залежність амплітуди від частоти для кожної моделі, що дає змогу оцінити їхні унікальні акустичні характеристики. Також на графіку продемонстровано, як частотні характеристики різних моделей мають спільні характеристичні частотні діапазони. Це дозволяє їх ефективно ідентифікувати та класифікувати за унікальними спектральними ознаками. Використання таких даних може бути важливим для задач ідентифікації БПЛА в реальних умовах.

Метод визначення характерних частот акустичного сигналу базується на застосуванні кластерного аналізу. Його сутність полягає у знаходженні груп схожих частотних характеристик сигналу у вибірці даних для різних типів БПЛА, так званих кластерів, які характеризуються наступними основними властивостями: щільність, дисперсія, розмір, форма та віддільність. Під щільністю мається на увазі властивість, яка дозволяє визначити кластер, як скупчення точок у просторі даних, відносно щільне у порівнянні з іншими областями простору, що містять або малу кількість точок або не містять їх взагалі. Дисперсія характеризує міру розсіювання точок у просторі відносно центра кластера. Розмір кластера тісно пов'язаний з дисперсією. Форма кластера визначається положенням точок у просторі. При зображенні кластерів у вигляді різних форм виникає необхідність визначення “зв'язаності” точок у кластері у вигляді відносної міри відстані між ними. Міри відстані зазвичай не обмежені зверху та залежать від вибору шкали (масштабу) вимірів. Віддільність характеризує міру перекриття кластерів і наскільки далеко один від одного вони розташовані у просторі. При визначенні міри відстані однією з найбільш відомих відстаней є евклідова відстань.

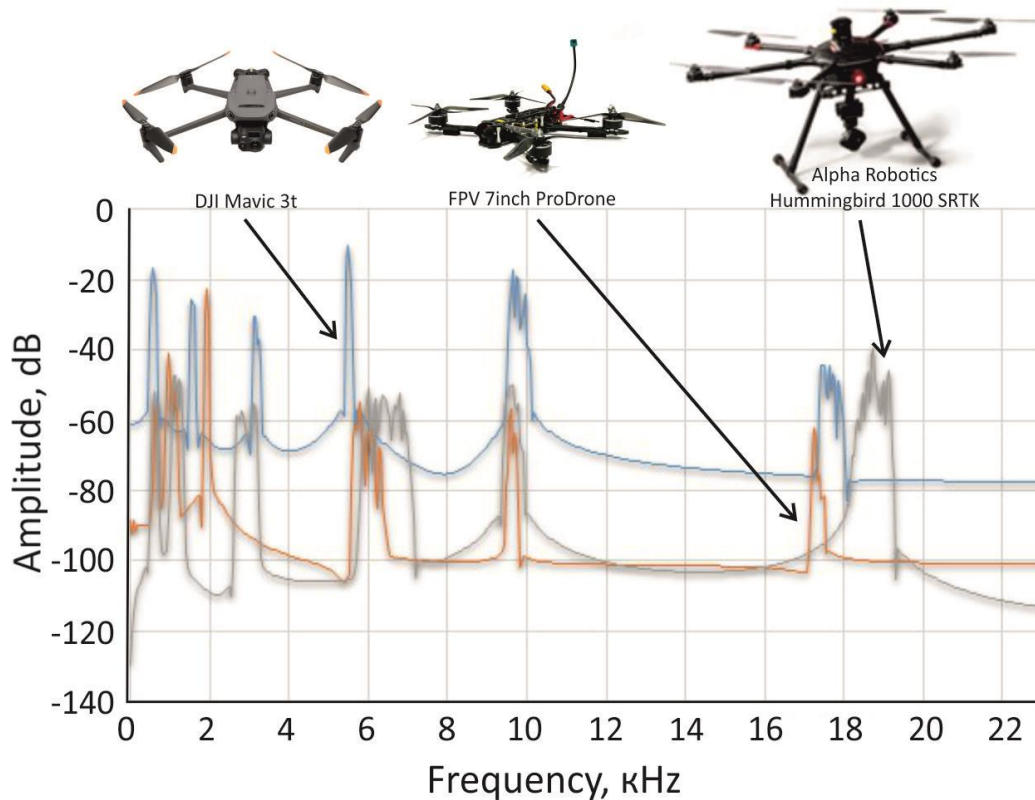


Рисунок 5 – Спектри акустичних сигналів польотів трьох безпілотних літальних апаратів: DJI Mavic 3t; FPV 7inch ProDrone; Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK

Відомі методи кластерного аналізу можна розподілити на дві групи – ієрархічні та неієрархічні методи. Суть ієрархічної кластеризації полягає у послідовному об'єднанні менших кластерів у великі, так звані агломеративні методи, або в розділенні великих кластерів на менші, так звані дивізімні методи.

Використання методу Варда, як одного з широко використовуваних агломеративних методів, при ієрархічній кластеризації основних гармонік спектрів акустичних сигналів, які є найбільш характерними для різних типів БПЛА, дозволило нам виділити унікальні акустичні особливості кожного БПЛА. Перевага методу Варда полягає в тому, що він відрізняється від усіх інших агломеративних методів, оскільки використовує методи дисперсійного аналізу для оцінки відстані між кластерами. Метод мінімізує суму квадратів дисперсії для кластерів, які можуть бути сформовані на кожному кроці.

Аналіз даних був виконаний з використанням програмного забезпечення Orange Data Mining, що забезпечує візуалізацію та класифікацію великих обсягів даних. Аналіз вибірок включав по 512 точок амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів від кожного БПЛА. Результати кластеризації частотних гармонік за амплітудою представлено у вигляді дендрограми на рис. 6.

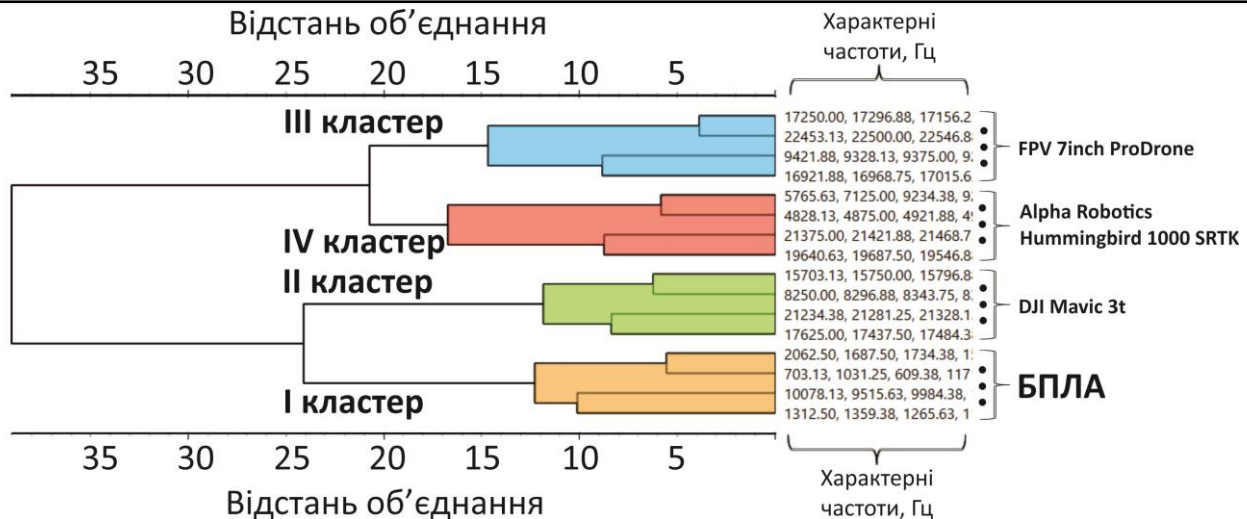


Рисунок 6 – Дендрограма кластеризації гармонік амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів польотів досліджуваних безпілотних літальних апаратів

Представлені на рис. 6 результати кластеризації дозволили на рівні 20 одиниць евклідової відстані об'єднати гармоніки амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів польотів досліджуваних БПЛА у чотири кластера. До першого кластера увійшли гармоніки з однаковими рівнями амплітуд, які характерні для усіх трьох БПЛА. Контроль складових цього кластеру дозволить ідентифікувати факт появи у охоронюваній зоні БПЛА. До другого, третього та четвертого кластерів увійшли гармоніки, які є індивідуальними для кожного типу БПЛА. Так, до другого кластеру увійшли гармоніки які є характерними для амплітудно-частотної характеристики акустичних сигналів польоту БПЛА типу DJI Mavic 3t. До третього кластеру увійшли гармоніки які є характерними для амплітудно-частотної характеристики акустичних сигналів польоту БПЛА типу FPV 7inch ProDrone. До четвертого кластеру увійшли гармоніки які є характерними для амплітудно-частотної характеристики акустичних сигналів польоту БПЛА типу Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK. Контроль складових другого, третього та четвертого кластерів дозволить ідентифікувати тип БПЛА, що з'явився у охоронюваній зоні.

За результатами кластерного аналізу розроблено керуючий алгоритм удосконаленого методу виявлення та ідентифікації за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів БПЛА. Схема представлена на рис. 7.

Представлена на рис. 7 алгоритм який передбачає виконання наступних процедур: 1) моніторинг акустичного простору охоронюваної зони за допомогою системи наземних автоматизованих пристроїв акустичного контролю та пасивної локації джерел небезпек; 2) фільтрація шумів та посилення «корисного» сигналу; 3) частотний аналіз «корисного» сигналу; 4) виявлення БПЛА, шляхом порівняння гармонік амплітудно-частотної характеристики прийнятого сигналу із складовими I кластеру. В залежності від кількості збігів визначається ймовірність виявлення/невиявлення БПЛА; 5) ідентифікація виявленого БПЛА, шляхом одночасного порівняння гармонік амплітудно-частотної характеристики прийнятого сигналу із складовими II, III та IV кластерів. В залежності від кількості збігів визначається ймовірність ідентифікації/неідентифікації БПЛА; 6) розробка, за результатами виявлення інциденту застосування БПЛА та ідентифікації його типу, пропозицій для прийняття антикризових рішень, спрямованих встановлення режимів функціонування єдиної державної системи цивільного захисту та виконання її складовими задач за призначенням, спрямованих на запобігання виникненню НС або її ліквідацію та мінімізацію наслідків.

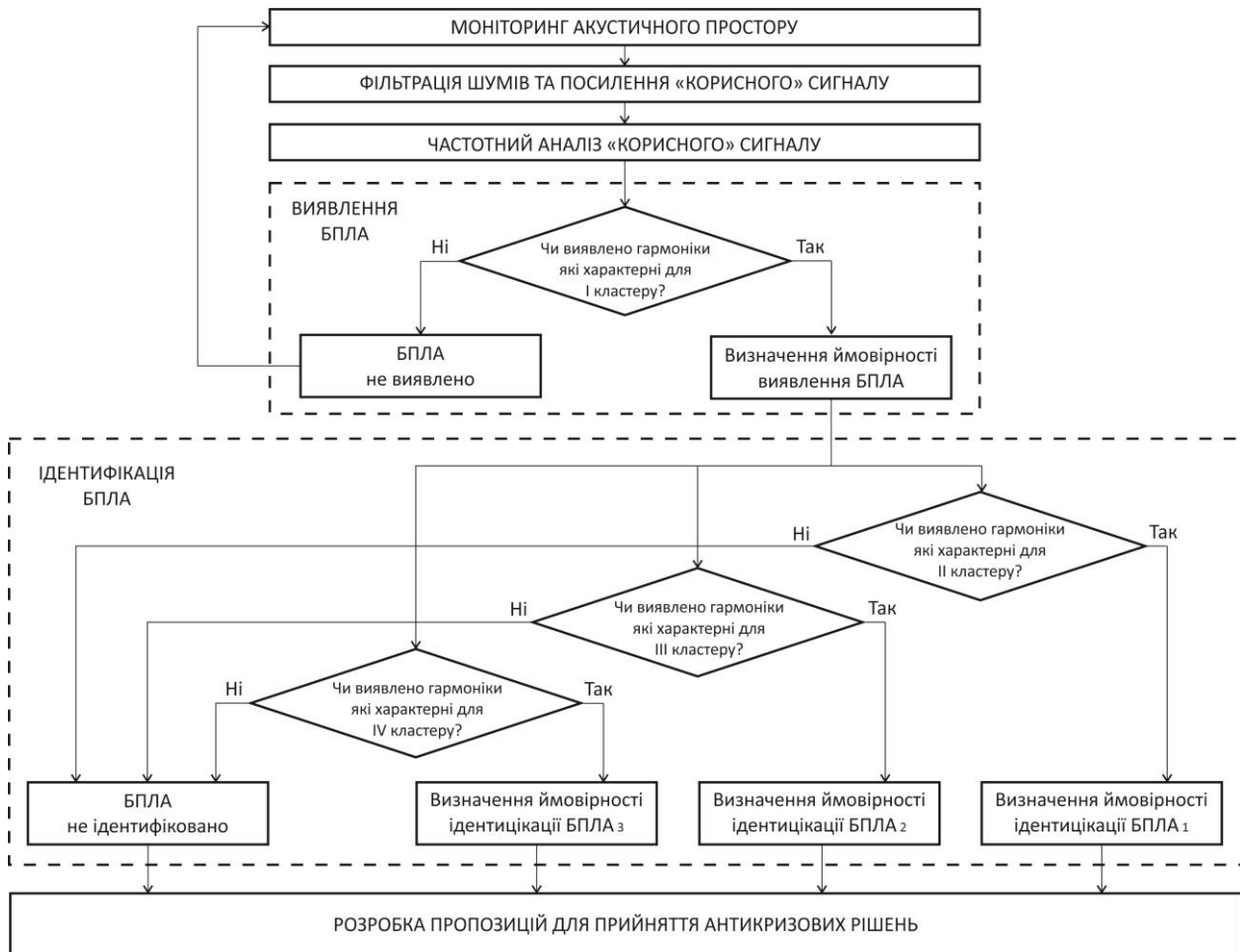


Рисунок 7 – Керуючий алгоритм методу виявлення та ідентифікації за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів безпілотних літальних апаратів

Обговорення

У роботі для реалізації представленого на рис. 7 алгоритму виявлення та ідентифікації за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів БПЛА застосовано метод вейвлет-аналізу для проведення частотного аналізу “корисного” сигналу. Цей метод дозволяє отримувати інформацію як про частотний, так і про часовий інтервал акустичного сигналу, що дає можливість виділяти характерні особливості спектру для різних моделей БПЛА. Перехід до вейвлет-перетворення пов’язаний з тим, що час для аналізу акустичних сигналів від БПЛА значно довший порівняно з тривалістю звуків пострілів (аналіз амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів пострілів вогнепальної зброї представлено у роботі [17]), що забезпечує більш детальну та якісну обробку даних.

Тому, у основу автоматичного виявлення БПЛА та визначення їх типів в роботі покладено аналіз частотно-часових характеристик акустичних сигналів від БПЛА, що дозволяє ідентифікувати літальні апарати в реальних умовах та сприяє підвищенню ефективності систем моніторингу інцидентів із застосуванням БПЛА, як джерел масштабних надзвичайних ситуацій.

У практичному застосуванні виділено дві основні переваги вейвлетів для аналізу сигналів від різних моделей БПЛА, а саме високі часова і частотна роздільні здатності. Математично це можна виразити як:

$$C_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

- де $C_x(a,b)$ – материнський (вихідний) вейвлет;
 $x(t)$ – вхідний акустичний сигнал від БПЛА;
 $\psi(t)$ – материнська вейвлет-функція (частіше використовують Морле або Мексиканську шляпку);
 a – масштаб, пов'язаний з частотою (чим більший масштаб, тим нижча частота);
 b – параметр зсуву в часі.

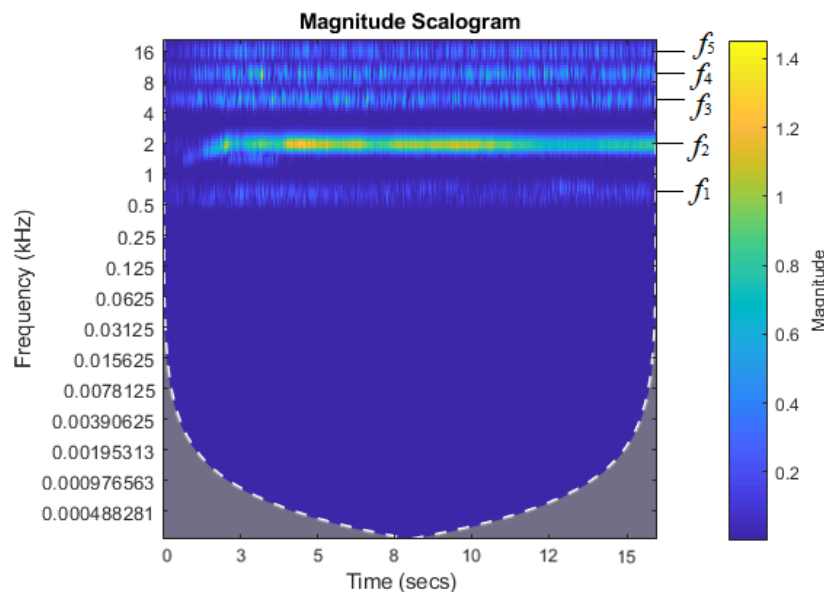


Рисунок 8 – Скалограма частотно-часової характеристики акустичного сигналу безпілотного літального апарату типу FPV 7inch ProDrone

Однією з ключових умов забезпечення відповідної достовірності ідентифікації БПЛА є раціональний час аналізу вхідного акустичного сигналу. Після проведення авторами численних досліджень із використанням різних типів БПЛА раціональний час для ідентифікації був визначений на рівні 15 с. Протягом цього інтервалу літальний апарат зазвичай виконує одну чи кілька характерних дій (наприклад, маневрує, змінює швидкість, курс або висоту). У бойовому режимі час ідентифікації може змінюватися залежно від активності апарата, тоді як у розвідувальному режимі, при стабільному положенні, після певного періоду часу відбувається корекція його розташування в просторі, і він переходить до роботи зі збільшеною потужністю.

У якості прикладу, на рис. 8 наведено відклики на акустичному спектрі БПЛА типу FPV 7inch ProDrone. У зазначеному діапазоні виділяються середні значення з максимальними амплітудами частот: $f_1 = 0,65$ кГц; $f_2 = 2,50$ кГц; $f_3 = 6,00$ кГц; $f_4 = 10,00$ кГц та $f_5 = 17,00$ кГц. Якщо амплітуда в цих діапазонах частот перевищує задане значення ($Magnitude = 1$) запускається операція підрахунку відліків протягом 15 с з їх накопиченням.

Таким чином, для ефективною реалізації запропонованої у роботі процедури виявлення та ідентифікації за амплітудно-частотними характеристиками акустичних сигналів БПЛА, шляхом застосування метод вейвлет-аналізу для проведення частотного аналізу «корисного» сигналу, повинні виконуватися наступні умови: 1) якщо відліки характерних частот акустичного

сигналу повторюються протягом 15 с більше 200 разів, то з ймовірністю 90 % можна стверджувати, що ця частота належить сигналу відповідного БПЛА; 2) якщо відліки характерних частот акустичного сигналу повторюються протягом 15 с менше 200 разів, то процедура автоматично повертається до моніторингу акустичного простору.

Висновки

1. Удосконалено метод автоматичного виявлення БПЛА та визначення їх типів на основі акустичних сигналів, який поєднує кластерний аналіз і вейвлет-аналіз. Застосування удосконаленого методу для трьох різних моделей БПЛА – Alpha Robotics Hummingbird 1000 SRTK, DJI Mavic 3t та FPV 7inch ProDrone – дозволило з ймовірністю до 90 % точно ідентифікувати тип БПЛА за їх акустичним сигналом, що підвищує точність і надійність систем моніторингу в реальних умовах, особливо в складних акустичних середовищах, таких як міські райони з високим рівнем фонових шумів.

2. Розроблено керуючий алгоритм удосконаленого методу, який передбачає виконання наступних процедур: 1) моніторинг акустичного простору охоронюваної зони за допомогою системи наземних автоматизованих пристроїв акустичного контролю та пасивної локації джерел небезпек; 2) фільтрація шумів та посилення «корисного» сигналу; 3) частотний аналіз «корисного» сигналу; 4) виявлення БПЛА, шляхом порівняння гармонік амплітудно-частотної характеристики прийнятого сигналу із складовими кластеру, що об'єднав характеристичні частоти для усіх досліджуваних БПЛА. В залежності від кількості збігів визначається ймовірність виявлення/невиявлення БПЛА; 5) ідентифікація виявленого БПЛА, шляхом одночасного порівняння гармонік амплітудно-частотної характеристики прийнятого сигналу із складовими кластерів, що окремо об'єднали характеристичні частоти кожного досліджуваного БПЛА. В залежності від кількості збігів визначається ймовірність ідентифікації/неідентифікації БПЛА; 6) розробка, за результатами виявлення інциденту застосування БПЛА та ідентифікації його типу, пропозицій для прийняття антикризових рішень, спрямованих встановлення режимів функціонування єдиної державної системи цивільного захисту та виконання її складовими задач за призначенням, спрямованих на запобігання виникненню НС або її ліквідацію та мінімізацію наслідків.

3. Подальші дослідження будуть спрямовані на вдосконалення існуючих алгоритмів обробки акустичних сигналів, зокрема на оптимізацію вейвлет-аналізу та кластеризації для обробки великих обсягів даних у реальному часі. Ключовим завданням є також інтеграція цих алгоритмів у автоматизовані системи ситуаційних центрів, що дозволить створити комплексні системи моніторингу НС з високим рівнем адаптивності до змінних умов роботи. Це забезпечить не лише підвищення ефективності виявлення загроз, а й своєчасне реагування на НС, що виникають у результаті застосування БПЛА, що стане важливим елементом системи національної безпеки.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. На Херсонщині внаслідок російського обстрілу загинули волонтери з Франції. URL: https://zaxid.net/na_hersonshhini_vnaslidok_rosiyskogo_obstrilu_zaginuli_volonteri_z_fra_nsiyi_n1579227

2. Росіяни атакували дроном автомобіль на Сумщині, загинуло подружжя. URL: [https://zaxid.net/rosiyani_atakuvali_dronom_avtivku_na_sumshhini_zaginulo_podruzzhya_a_n1592211](https://zaxid.net/rosiyani_atakuvali_dronom_avtivku_na_sumshhini_zaginulo_podruzzhya)
3. Російська армія влучила FPV-дроном у рейсовий автобус на Сумщині. URL: https://zaxid.net/rosiyska_armiya_fpv_dronom_vluchila_v_reysoviy_avtobus_na_sumshhini_n1594334
4. У Херсоні авто швидкої допомоги стало мішенню ворога. URL: <https://tsn.ua/ato/u-hersoni-avto-shvidkoyi-dopomogi-stalo-mishennyu-voroga-scho-vidomo-pro-naslidki-2684487.html>
5. Внаслідок російської атаки в Одесі загинула людина, ще понад десяток постраждали. URL: https://zaxid.net/vnaslidok_rosiyskoyi_ataki_v_odesi_zaginula_lyudina_shhe_ponad_desy_atok_postrazhdali_n1597477
6. Четверо постраждалих і пошкоджені авто: деталі ворожої атаки БПЛА на Харків. URL: <https://armyinform.com.ua/2024/11/13/chetvero-postrazhdalyh-i-poshkodzheni-avto-detali-vorozhoyi-ataky-bpla-na-harkiv/>
7. Тютюник В.В., Калугін В.Д., Писклакова О.О. (2018). Основоположні принципи створення у єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 4(50), 168–177. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7411>
8. Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 4 червня 2021 року «Щодо удосконалення мережі ситуаційних центрів та цифрової трансформації сфери національної безпеки і оборони», Введено в дію Указом Президента України від 18 червня 2021 року № 260/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text>
9. Al-Emadi, S.; Al-Ali, A.; Al-Ali, A. (2021). Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement through Generative Adversarial Networks. *Sensors*, 21, 4953. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/4953>
10. Utebayeva, D.; Ilibayeva, L.; Matson, E.T. (2023). Practical Study of Recurrent Neural Networks for Efficient Real-Time Drone Sound Detection: A Review. *Drones*, 7, 26. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/1/26>
11. SoundCom Technologies. URL: <https://www.soundcom.net/>
12. DroneShield is the world-leading innovator in counterdrone solutions. URL: <https://www.droneshield.com/>
13. ParaZero Drone Safety Solutions. URL: <https://parazero.com/home/>
14. DRONELOCK ~ Drone Against Drone System. URL: <https://www.joint-forces.com/defence-equipment-news/27749-dronelock-drone-against-drone-system>
15. Microflown Avisa. URL: <https://www.microflown-avisa.com/>
16. Сокольський С.О. та Мовчанюк А.В. (2023). Алгоритм оброблення аудіосигналів із використанням методу машинного навчання. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, 93, 39–51. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.93.39-51>.
17. Тютюник В.В., Левтеров О.А., Тютюник О.О., Усачов Д.В. (2024). Акустичний моніторинг джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застосуванням вогнепальної зброї. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 2(40), 269–292. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-19>.

References

1. Volunteers from France killed in Russian shelling in Kherson region. Available from: https://zaxid.net/na_hersonshhini_vnaslidok_rosiyskogo_obstrilu_zaginuli_volonteri_z_franstsiyi_n1579227

2. Russians attacked a car with a drone in Sumy region, killing a couple. Available from: https://zaxid.net/rosiyani_atakuvali_dronom_avtivku_na_sumshhini_zaginulo_podruzhzhy_a_n1592211
3. The Russian army hit a bus in Sumy region with an FPV drone. Available from: https://zaxid.net/rosiyska_armiya_fpv_dronom_vluchila_v_reysoviy_avtobus_na_sumshhni_n1594334
4. In Kherson, an ambulance became an enemy target. Available from: <https://tsn.ua/ato/u-hersoni-avto-shvidkoyi-dopomogi-stalo-mishennyu-voroga-scho-vidomo-pro-naslidki-2684487.html>
5. One person killed, more than a dozen injured in Russian attack in Odessa. Available from: https://zaxid.net/vnaslidok_rosiyskoyi_ataki_v_odesi_zaginula_lyudina_shhe_ponad_desy_atok_postrazhdali_n1597477
6. Four injured and cars damaged: details of enemy UAV attack on Kharkiv. Available from: <https://armyinform.com.ua/2024/11/13/chetvero-postrazhdalyh-i-poshkodzheni-avto-detali-vorozhoyi-ataky-bpla-na-harkiv/>
7. Tiutiunyk, V.V.; Kalugin, V.D.; Pisklakova, O.O. (2018). Fundamental principles of creating an information and analytical subsystem for managing the processes of prevention and localization of the consequences of emergencies in the unified state civil protection system. *Systems of control, navigation and communication*, 4(50), 168–177. Available from: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7411>
8. Decision of the National Security and Defense Council of Ukraine dated June 4, 2021 “On improving the network of situational centers and digital transformation of the sphere of national security and defense”, Enacted by Decree of the President of Ukraine dated June 18, 2021 #260/2021. Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text>
9. Al-Emadi, S.; Al-Ali, A.; Al-Ali, A. (2021). Audio-Based Drone Detection and Identification Using Deep Learning Techniques with Dataset Enhancement through Generative Adversarial Networks. *Sensors*, 21, 4953. Available from: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/15/4953>
10. Utebayeva, D.; Ilipbayeva, L.; Matson, E.T. (2023). Practical Study of Recurrent Neural Networks for Efficient Real-Time Drone Sound Detection: A Review. *Drones*, 7, 26. Available from: <https://www.mdpi.com/2504-446X/7/1/26>
11. SoundCom Technologies. Available from: <https://www.soundcom.net/>
12. DroneShield is the world-leading innovator in counterdrone solutions. Available from: <https://www.droneshield.com/>
13. ParaZero Drone Safety Solutions. Available from: <https://parazero.com/home/>
14. DRONELOCK ~ Drone Against Drone System. Available from: <https://www.joint-forces.com/defence-equipment-news/27749-dronelock-drone-against-drone-system>
15. Microflown Avisa. Available from: <https://www.microflown-avisa.com/>
16. Sokolskyi, S.O. and Movchanyuk, A.V. (2023). Audio signal processing algorithm using machine learning method. *Bulletin of NTUU “KPI”. Series Radio Engineering. Radio Equipment Manufacturing*, 93, 39–51. <https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.93.39-51>.
17. Tiutiunyk, V.V., Levterov, O.A., Tiutiunyk, O.O., Usachov, D.V. (2024). Acoustic monitoring of sources of emergency situations associated with the use of firearms. *Problems of emergency situations*, 2(40), 269–292. <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2024-40-19>.