

# Облікова картка дисертації

## I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0824U000288

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 11-01-2024

Статус: Наказ про видачу диплома

Реквізити наказу МОН / наказу закладу: №НСВС/32/24 від 26.03.2024



## II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Сокольський Сергій Олегович

2. Serhii Sokolskyi

Кваліфікація:

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-2409-1539

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 172

Назва наукової спеціальності: Електронні комунікації та радіотехніка

Галузь / галузі знань: електроніка та телекомунікації

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: Телекомунікації та радіотехніка

Дата захисту: 04-03-2024

Спеціальність за освітою: Телекомунікації та радіотехніка

Місце роботи здобувача:

Код за ЄДРПОУ:

Місцезнаходження:

Форма власності:

Сфера управління:

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

### **III. Відомості про організацію, де відбувся захист**

**Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради):** ДФ 26.002.109; ID 4359

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Берестейський, буд. 37, Київ, 03056, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Берестейський, буд. 37, Київ, 03056, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **V. Відомості про дисертацію**

**Мова дисертації:** Українська

**Коди тематичних рубрик:** 28.23.37, 47.14.17, 47.55.35, 55.47.81

**Тема дисертації:**

1. Акустичне виявлення безпілотних літальних апаратів
2. Acoustic detection of unmanned aerial vehicles

**Реферат:**

1. Сокольський С.О. Акустичне виявлення безпілотних літальних апаратів. – Кваліфікаційна наукова праця на здобуття наукового ступеня доктора філософії складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, 3 додатків, та містить 70 рисунків і 9 таблиць. Список використаної літератури включає в себе 50 джерел. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності системи виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів (МЛА) та обробки їхніх акустичних сигналів зареєстрованих вхідним сенсором. Завдання дослідження: 1) Проведення аналізу основних методів виявлення та локалізації МЛА; 2) Створення та накопичення бази аудіозаписів акустичних сигнатур різних моделей МЛА; 3) Розроблення математичної моделі для ідентифікації типу МЛА, використовуючи базу аудіозаписів їхніх акустичних сигнатур 4) Розроблення методу цифрової обробки акустичних сигналів із використанням

згорткової нейронної мережі (ЗНМ) глибокого навчання з оптимізатором Adam; 5) На основі запропонованого методу, розробити програмне забезпечення для обробки акустичних сигналів на предмет наявності сигнатур МЛА; 6) Створення акустичного детектора МЛА. 7) Перевірка ефективності розробленого програмного та апаратного забезпечення для виявлення МЛА. Об'єктом дослідження є процес акустичного виявлення МЛА. Предметом дослідження є методи реалізації системи передачі та оброблення акустичних сигналів МЛА. Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що: 1) Вперше запропоновано математичну модель ідентифікатора МЛА, наукова новизна якої полягає в тому, що вона ґрунтується на використанні бази аудіозаписів акустичних сигналів дронів та надає можливість зменшити похибку під час класифікації їхньої моделі. 2) Вперше розроблено метод цифрової обробки акустичних сигналів дронів, наукова новизна якого полягає в тому, що він ґрунтується на теорії штучного інтелекту та використовує ЗНМ глибокого навчання з оптимізатором Adam для підвищення швидкості та ефективності ідентифікації типу МЛА. 3) Удосконалено методику розрахунку кількості мел-фільтрів та їхнього частотного діапазону, що, на відміну від існуючих, враховує бажану частотну розділову здатність та дає змогу підвищити швидкість та точність отримання основних представлень аудіосигналу МЛА під час використання техніки зважування коефіцієнтів ШПФ за допомогою банків мел-фільтрів. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що: 1) На основі розробленої математичної моделі, створено базу аудіосигналів МЛА моделей «Mavic 2 Pro», «Mavic 3» та «FPV». 2) На основі розробленого методу та методики, створено програмне забезпечення для швидкого та ефективного оброблення аудіосигналів МЛА із використанням ЗНМ глибокого навчання з оптимізатором Adam. 3) Створено акустичний детектор МЛА з ефективною відстанню виявлення об'єктів до 200 метрів. 4) Надано відповідні універсальні рекомендації для подальшого вдосконалення системи детекції МЛА. За результатами дисертації опубліковано 6 наукових робіт: 3 статті в фахових виданнях України, з яких 2 у періодичних виданнях, що включенні до міжнародної наукометричної бази WEB OF SCIENCE, та 3 тези доповіді в збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій. У вступі роботи підтверджена актуальність, сформульована мета, завдання та методи дослідження, надана інформація про наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. У першому розділі був проведений порівняльний та критичний аналіз потенційних можливостей основних методів виявлення МЛА: оптичного, радіолокаційного та акустичного. Кожним із методів розраховано теоретичну максимальну дальність виявлення безпілотної моделі «DJI Mavic 3». У другому розділі розглянуто реалізацію простого та дешевого для конструювання акустичного детектора з одним мікрофоном. Він дає змогу виявляти акустичні коливання, що видають двигуни та лопоті дрону. За результатом тестових випробувань була створена база аудіофайлів шуму квадрокоптера «DJI Mavic 3». Спектри отриманих аудіозаписів випромінювання квадрокоптера надають змогу визначити основні частоти тонів, що є важливими ознаками під час розроблення алгоритму класифікації безпілотної. Третій розділ описує процес розроблення алгоритму для ефективного оброблення та класифікації аудіосигналів МЛА із використанням згорткової нейронної мережі глибокого навчання, побудови архітектури та теоретичного оцінювання ефективності її роботи. У четвертому розділі проведено практичне тестування роботи готової моделі детектора. Ефективна дистанція виявлення МЛА склала до 200 м. Ключові слова: дрон, малий безпілотний літальний апарат, БПЛА, виявлення цілей, акустична локація, контрольована зона, реєстратор сигналів, виявлення сигналів, спектр, оброблення сигналу, машинне навчання, нейронна мережа, глибоке навчання.

2. Serhii Sokolskyi. Acoustic detection of unmanned aerial vehicles – The qualifying scientific paper for the degree of Philosophy Doctor consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references (50 sources), 3 appendices, and contains 70 figures and 9 tables. The aim of the thesis is to improve the efficiency of the system for detecting and localizing small unmanned aerial vehicles (UAV) and processing of their acoustic signals registered by the input sensor. Research tasks: 1) Analyzing the main methods of detection and localization of UAVs; 2) Creation and accumulation of a database of audio recordings of acoustic signatures of different models of UAVs; 3) Development of a mathematical model for identifying the type of UAV, using a database of audio recordings of their acoustic signatures; 4) Development of a method for digital processing of acoustic signals using a convolutional neural network (CNN) of deep learning with the Adam optimizer; 5) Based on the proposed

method, develop software for processing acoustic signals for the presence of UAVs signatures; 6) Creating an acoustic detector for UAVs; 7) Checking the effectiveness of the developed software and hardware for detecting of UAVs. The object is the process of acoustic detection of the UAV. The subject is the methods of realization of the system of transmission and processing of acoustic signals of the UAV. The scientific novelty of the obtained results is that: 1) For the first time, a mathematical model of the UAV identifier is proposed. The scientific novelty of this model is that it is based on the use of a database of audio recordings of acoustic signatures of drones and makes it possible to reduce the error in classifying their model. 2) For the first time, a method of digital processing of acoustic signals of drones is developed, the scientific novelty of which is that it is based on the theory of artificial intelligence and uses a CNN of deep learning with the Adam optimizer to increase the speed and efficiency of the identification of the type of small unmanned aerial vehicles. 3) The method of calculating the number of mel-filters and their frequency range is improved, which, unlike the existing ones, takes into account the desired frequency resolution and makes it possible to increase the speed and accuracy of obtaining the main representations of the UAV audio signal when using the technique of weighting the FFT coefficients using banks of mel-filters. The practical significance of the obtained results is that: 1) On the basis of the developed mathematical model, a database of audio signals of UAV models “Mavic 2 Pro”, “Mavic 3” and “FPV”. 2) On the basis of the developed method and methodology, software for fast and efficient processing of audio signals of small UAV using a CNN of deep learning with the Adam optimizer is written. 3) An acoustic detector of small UAV with an effective object detection distance of up to 200 meters is created. 4) Relevant universal recommendations for further improvement of the small UAV detection system are provided. According to the results of the thesis, 6 scientific papers are published: 3 articles in professional editions of Ukraine, 2 of which are in periodicals included in the international scientometric database WEB OF SCIENCE, and 3 abstracts in the proceedings of international scientific and technical conferences. The introductory part confirms the relevance, formulates the aim, tasks, and methods of research, also provides information about scientific novelty, as well as the practical significance of the obtained results. In the first chapter, a comparative and critical analysis of the potential possibilities of the main methods of detecting small UAV, such as optical, radar and acoustic, is carried out. Each of the methods calculates the theoretical maximum detection range of the DJI Mavic 3 drone. In the second chapter, we consider the implementation of a simple acoustic detector with a single microphone. It allows detection of the sound emitted by the drone's engines and blades. Based on the test results, a database of audio files of the noise of the DJI Mavic 3 quadcopter is created. The spectra of the received audio recordings of the radiation of the quadcopter are important features in the development of the algorithm for the classification of drones. The third chapter describes the process of developing an algorithm for efficient processing and classification of UAV audio signals using a deep learning CNN, building the architecture, and theoretically evaluating of its performance. In the fourth chapter, practical testing of the finished detector model is carried out. The effective distance of UAV detection by the algorithm is 200 m. Keywords: drone, small unmanned aerial vehicle, UAV, target detection, acoustic location, controlled area, signal recorder, detection, spectrum, signal processing, machine learning, neural network, deep learning.

**Державний реєстраційний номер ДіР:**

**Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки:** Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

**Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності:** Розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки

**Підсумки дослідження:** Нове вирішення актуального наукового завдання

**Публікації:**

- С.О. Сокольський, А.В. Мовчанюк, «Огляд методів виявлення та локалізації малих безпілотних літальних апаратів» Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, №87, с. 46-55. 2021.
- С. О. Сокольський та А.В. Мовчанюк, «Електроакустичний тракт детектора для виявлення малих безпілотних літальних апаратів», Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 2, с. 135-144. 2023.
- С. О. Сокольський та А.В. Мовчанюк, «Алгоритм для оброблення аудіосигналів із використанням методу машинного навчання», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування, №93, с. 39-51. 2023.
- С.О. Григораш (Сокольський) та А.В. Мовчанюк, «Нові виміри застосування дронів», на III Міжнародній науково-практичній конференції "Філософія і наукова-технічна творчість у хронотопі технічного університету", Київ, Україна, с. 92-97.
- С.О. Сокольський та А.В. Мовчанюк, «Огляд методів виявлення і локалізації МЛА», на X Міжнародній науково-технічній конференції «РТПСАС-2021», Київ, Україна, с. 48-50.
- С.О. Сокольський та А.В. Мовчанюк, «Електроакустичний тракт детектора МЛА», на XI Міжнародній науково-технічній конференції «РТПСАС-2022», Київ, Україна, с. 88-90.

**Наукова (науково-технічна) продукція:** пристрої; програмні продукти, програмно-технологічна документація

**Соціально-економічна спрямованість:** підвищення продуктивності праці

**Охоронні документи на ОПВ:**

Наукові відкриття

1) Вперше запропоновано математичну модель ідентифікатора МЛА, наукова новизна якої полягає в тому, що вона ґрунтується на використанні бази аудіозаписів акустичних сигнатур дронів та надає можливість зменшити похибку під час класифікації їхньої моделі. 2) Вперше розроблено метод цифрової обробки акустичних сигналів дронів, наукова новизна якого полягає в тому, що він ґрунтується на теорії штучного інтелекту та використовує згорткову нейронну мережу глибокого навчання з оптимізатором Adam для підвищення швидкості та ефективності ідентифікації типу малих безпілотних літальних апаратів. 3) Удосконалено методіку розрахунку кількості мел-фільтрів та їхнього частотного діапазону, що, на відміну від існуючих, враховує бажану частотну розділову здатність та дає змогу підвищити швидкість та точність отримання основних представлень аудіосигналу МЛА під час використання техніки зважування коефіцієнтів ШПФ за допомогою банків мел-фільтрів.

**Впровадження результатів дисертації:** Впроваджено

**Зв'язок з науковими темами:**

## **VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Мовчанюк Андрій Валерійович
2. Movchanuk Andrey V.

**Кваліфікація:** к.т.н., доц., 05.02.02

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Додаткова інформація:** <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57192677873>

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Код за ЄДРПОУ:** 02070921

**Місцезнаходження:** проспект Берестейський, буд. 37, Київ, 03056, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

## **VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів**

### **Офіційні опоненти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Бойко Юлій Миколайович

2. Yulii M. Boiko

**Кваліфікація:** д. т. н., професор, 05.12.13

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0003-0603-7827

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Хмельницький національний університет

**Код за ЄДРПОУ:** 02071234

**Місцезнаходження:** вул. Інститутська, буд. 11, Хмельницький, Хмельницький р-н., 29016, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Зінченко Ольга Валеріївна

2. OLHA V. ZINCHENKO

**Кваліфікація:** д. т. н., доц., 05.13.06

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-3973-7814

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

**Код за ЄДРПОУ:** 38855349

**Місцезнаходження:** вул. Солом'янська, буд. 7, Київ, 03110, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **Рецензенти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Антипенко Руслан Володимирович
2. Ruslan V. Antipenko

**Кваліфікація:** к. т. н., доц., 05.12.07**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-8931-1977**Додаткова інформація:** ;<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6506585140>**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"**Код за ЄДРПОУ:** 02070921**Місцезнаходження:** проспект Берестейський, буд. 37, Київ, 03056, Україна**Форма власності:** Державна**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України**Ідентифікатор ROR:****Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Товкач Ігор Олегович
2. Igor O. Tovkach

**Кваліфікація:** к.т.н., 05.12.17**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-5989-6126**Додаткова інформація:****Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"**Код за ЄДРПОУ:** 02070921**Місцезнаходження:** проспект Берестейський, буд. 37, Київ, 03056, Україна**Форма власності:** Державна**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України**Ідентифікатор ROR:****VIII. Заключні відомості****Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
голови ради**

Степанов Михайло Миколайович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
головуючого на засіданні**

Степанов Михайло Миколайович

**Відповідальний за підготовку  
облікових документів**

Сокольський Сергій Олегович

**Реєстратор**

УкрІНТЕІ

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є  
відповідальним за реєстрацію наукової  
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна