

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

Трубчанінової Карини Артурівни

на дисертаційну роботу Чжана Міньцзяна

«Метод підвищення кібербезпеки безпілотних літальних апаратів із  
вбудованою системою ADS-B»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія

### **Актуальність теми**

Дисертаційна робота присвячена важливій науково-прикладній проблемі – підвищенню кібербезпеки безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які використовують ADS-B – систему автоматичного залежного спостереження. В умовах зростання кількості атак на безпілотну авіацію ця проблема має стратегічне значення для безпеки повітряного простору.

Робота виконана відповідно до завдань держбюджетної теми МОН України: «Дослідження методів контролю та захисту інформації в комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних та розподілених системах» (ДР № 0119U002603), у рамках якої здобувач брав участь у виконанні окремих етапів.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій сформульованих в дисертаційній роботі**

Наукові положення, висновки й рекомендації Чжаном Міньцзяном чітко обґрунтовані. Автором запропоновано новий метод стеганографічного вбудовування ідентифікаторів БПЛА у повідомлення формату ADS-B. Метод побудований на комплексному поєднанні математичних моделей (китайська теорема про остачі, скінченне кільце цілих чисел), адаптивного спектрального аналізу та алгоритмів цифрової обробки сигналів.

Експериментальні дослідження підтверджують достовірність результатів, які мають прикладне значення.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність підтверджується як математичними моделями (GERT-схеми, DFT/IDFT), так і результатами імітаційного моделювання та практичної реалізації на SDR-платформі PXI 1062. Використання показників BER, NMSE, MD, AD, кореляційних коефіцієнтів забезпечує об'єктивну кількісну оцінку ефективності методу.

**До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

– вперше розроблено математичну модель процесу стеганографічного вбудовування ідентифікатора БПЛА в дані формату ADS-B. Модель базується на китайській теоремі про остачі та теоремі про кінцеве цілісне кільце. Комплексна математична формалізація дозволила оцінити еквівалентні  $W$ -функції часу стеганографічного кодування та декодування ідентифікаторів БПЛА із вбудованою системою ADS-B;

– вперше розроблено метод стеганографічного вбудовування ідентифікаторів в дані формату ADS-B з використанням перетворення Фур'є. Відмінною особливістю розробленого методу є комплексне використання алгоритмів адаптивної модифікації спектральних компонентів сигналу для зменшення спотворень даних формату ADS-B. Це дозволило до 4 разів підвищити рівень скритності вбудованої інформації;

– вдосконалено спосіб адаптивного вибору спектральних компонентів сигналу ADS-B для вбудовування ідентифікатора, який відрізняється від відомих динамічним регулюванням амплітуди вбудовування у кожному фрагменті сигналу. Це дозволило зменшити ймовірність помилок розпізнавання прихованої інформації до 2 разів.

## **Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.**

Практична цінність підтверджується результатами тестування на реальній апаратній платформі. Запропонований метод може бути впроваджений у повітряні платформи управління БПЛА, у системи ADS-B IN, а також як компонент кіберзахисту в інфраструктурі Smart City.

## **Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих працях.**

За темою дисертації автор опублікував 7 наукових праць, серед них:

- 2 статті у виданнях, включених до Scopus / WoS,
- 2 у фахових українських виданнях,
- 3 матеріали міжнародних конференцій.

У співавторських публікаціях чітко вказано авторський внесок здобувача.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

## **Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота має чітку структуру, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку джерел та додатків. Кожен розділ логічно пов'язаний з наступним. Методологія викладена детально, з використанням сучасного математичного апарату та програмних засобів. Описані аналітичні, чисельні та експериментальні результати.

## **Академічна доброчесність**

Дисертація відповідає усім вимогам до оформлення. У роботі немає виявлених порушень академічної доброчесності. Посилання на використані джерела подані коректно, плагіат відсутній.

### **По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:**

1) Недостатньо описано можливий вплив методу на сумісність з авіаційними стандартами ICAO/Eurocontrol, особливо в контексті легалізації нових форматів сигналу.

2) Порівняння з криптографічними методами (наприклад, UAT, SABRE) виконано поверхово, бракує глибшого аналізу переваг/недоліків стеганографічного підходу у безпековому контексті.

3) Не подано оцінки енергоспоживання алгоритму при реалізації на вбудованих системах БПЛА, що важливо для автономного виконання в умовах обмежених ресурсів.

4) Бажано доповнити оцінку стійкості методу до атак типу "active warden", коли атакуючий свідомо намагається виявити або спотворити стеганографічне повідомлення.

## **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота Чжана Міньцзяна «Метод підвищення кібербезпеки безпілотних літальних апаратів із вбудованою системою ADS-B» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому розв'язано важливу прикладну задачу розробки нових та удосконалення існуючих моделей та методів, пов'язаних з підвищення кібербезпеки БПЛА з вбудованою системою ADS-B.

Подана дисертаційна робота «Метод підвищення кібербезпеки безпілотних літальних апаратів із вбудованою системою ADS-B» Чжана Міньцзяна відповідає спеціальності 123 – «Комп'ютерна інженерія», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора

філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Чжан Мінцзян заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 – «Комп'ютерна інженерія».

Офіційний опонент

Професор кафедри транспортного зв'язку

Українського державного університету

залізничного транспорту, д.т.н., професор

08.08.2025



Карина ТРУБЧАНІНОВА



Особистий підпис  
засвідчую 08 08 2025 р.  
Завідуючий канцелярією  
УкрДУЗТ

Карини ТРУБЧАНІНОВОЙ

*Свєтл. ЧЕЛОМБІТЬКО*