

## **ВИСНОВОК**

про наукову новизну та практичне значення результатів дисертації

**Хричова Владислава Сергійовича**

**«Радіолокаційна помітність об'єктів складної форми із покриттям та без нього»,**

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

з галузі знань 10 – Природничі науки

за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали.

### **1. Оцінка роботи здобувача у процесі підготовки дисертації і виконання індивідуального плану навчальної та наукової роботи.**

Хричов Владислав Сергійович згідно загального плану виконання освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії виконав дві складові: освітня та наукова. Згідно індивідуального навчального плану передбачалося 40 кредитів на освітню складову освітньо-наукової програми підготовки доктора філософії. Було отримано заліки по наступним предметам:

Іноземна мова (англійська) для аспірантів ;

Філософські засади та методологія наукових досліджень ;

Підготовка наукових публікацій та презентація результатів досліджень;

Інформаційні технології в прикладній фізиці ;

Актуальні проблеми сучасної фізики та наноматеріалів;

Актуальні проблеми сучасної радіофізики та електроніки.

Також складено іспити з наступних предметів:

Іноземна мова (англійська) для аспірантів ;

Актуальні проблеми сучасної прикладної фізики та наноматеріалів;

Актуальні проблеми сучасної радіофізики та електроніки.

Всі заплановані види робіт були виконані своєчасно. Здобувач плідно співпрацював з науковим керівником протягом усього терміну навчання в аспірантурі.

### **2. Обґрунтування вибору теми дослідження**

Від початку широкого використання радіолокаційних станцій (РЛС), при розробці нової техніки перед науковцями та інженерами постала задача розрахунку характеристик радіолокаційних сигналів, які відбиваються від різних об'єктів, які можуть бути розташованими на підстильній поверхні та бути обладнаними тими чи іншими маскувальними засобами. Основний інтерес при вивченні відбитого поля представляють ефективна поверхня розсіяння об'єкта (ЕПР) та діаграма зворотного розсіювання (ДЗР). Для більшості типових радіолокаційних об'єктів довжина хвилі зондуючих сигналів є малими у порівнянні з їх розмірами. Проведення експериментальних досліджень вимагає великих затрат часу та коштів, також експерименти надають неповну (фрагментарну) інформацію про розсіювальні властивості об'єкта. Тому створення нових ефективних методик для оцінки результатів експериментальних вимірювань є актуальною задачею. Такі методики повинні дозволяти ґрунтуючись на порівняно невеликій кількості експериментальних досліджень робити висновок про радіолокаційну помітність об'єкта, також оцінювати доцільність використання тих чи інших маскувальних засобів.

Найбільш прямий спосіб отримання відомостей про ЕПР і ДЗР полягає у вимірюванні радіолокаційного відбиття від самої цілі або точно виконаної її моделі. При цьому вимірювання може проводитись як на спеціальних радіолокаційних полігонах так і в польових умовах. Однією з переваг вимірювань на радіолокаційному полігоні є зручність використання моделей-макетів, які менше і дешевше реальних цілей. Однак обмеженість розмірів закритих полігонів обумовлює помилки вимірювань, при цьому головною причиною помилок вимірювання є відхилення фронту хвилі, опромінюючої макет цілі, від плоского. Іншим істотним джерелом похибок вимірів є різні конструкції, які можуть бути розташовані поблизу об'єкта, що досліджується, це джерело помилок називають «фоном».

Окрім зазначених недоліків прямих вимірів характеристик розсіювання радіолокаційних цілей в польових умовах, для їх проведення необхідно

належним чином обладнати полігон вимірювання і мати досить складні методики вимірювання ЕПР і ДЗР. Це підвищує роль теоретичних досліджень характеристик розсіювання об'єктів складної форми, такі дослідження мають надати можливість оцінки радіолокаційних параметрів об'єктів в тих випадках, коли неможливо чи складно провести експериментальні вимірювання.

Роль теоретичних досліджень характеристик розсіювання в роботі проектувальника РЛС полягає в тому, щоб забезпечити можливість оцінки параметрів розсіювання радіолокаційної цілі в тих випадках, коли неможливо чи складно провести потрібні вимірювання.

Таким чином, наразі важливою є розробка більш швидких та менш розрахунково вимогливих методів оцінки ЕПР складних об'єктів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка алгоритмів теоретичного розрахунку та зниження вірогідності пеленгування об'єкта складної форми. Алгоритм, що розробляється повинен враховувати поле, що розсіюється об'єктом, який може бути розташовано на певній підстильній поверхні та обладнано радіопоглинаючим покриттям. Для досягнення цієї мети були поставлені та виконані наступні завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан проблеми моделювання електромагнітного розсіювання на об'єктах складної форми;
2. Створити комп'ютерну програму для розрахунку поля, що розсіюється об'єктом складної форми, при цьому враховувати:
  - а) поле, що розсіюється гладкою частиною об'єкта;
  - б) поле, що розсіюється на ребрах об'єкта;
  - в) перевідбите поле між різними частинами об'єкта, а також між об'єктом та підстильною поверхнею;
  - г) вплив підстильної поверхні;
  - д) вплив покриттів різних типів та з різними параметрами.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітне поле, що розсіюється об'єктом складної форми.

**Предмет дослідження** – визначення радіолокаційних характеристик об'єкта складної форми.

**Методи дослідження.** В роботі для вирішення поставлених завдань були використані методи сучасної радіофізики, обчислювальної електродинаміки і математичної фізики:

- метод фізичної оптики (МФО) для отримання асимптотичних значень полів, що розсіюються окремими фацетами моделі;
- метод геометричної оптики (МГО) для отримання напрямків та полів при перевідбитті електромагнітних хвиль;
- метод падаючих та відбитих променів (Shooting and Bouncing Rays — SBR), що базується на алгоритмі відстеження променів та на МГО та МФО;
- метод крайових хвиль для розрахунку дифракції на ребрах об'єкту;
- алгоритми трасування променів для оптимізації алгоритму пошуку видимих елементів об'єкту складної форми;
- методи статистики для аналізу радіолокаційної помітності, ґрунтуючись на змодельованих даних щодо ЕПР об'єкту.

### **3. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Робота виконувалася на кафедрі теоретичної радіофізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в рамках держбюджетних науково-дослідних тем:

- «Методи та алгоритми розрахунку широкосмугових характеристик електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми для визначення їх радіолокаційної помітності» (номер держреєстрації 0117U004965);
- «Чисельне моделювання та вимірювання розсіяння електромагнітних хвиль радіолокаційного діапазону на військових та цивільних об'єктах складної форми» (номер держреєстрації 0118U002022);
- «Чисельні алгоритми аналізу, методики та засоби вимірювання електродинамічних характеристик поглинаючих, нелінійних та магнітних метаматеріалів і композитів» (номер держреєстрації 0119U002548);

- «Радіометрична система формування зображень наземних об'єктів в міліметровому діапазоні хвиль» (номер держреєстрації 0120U102311);
- «Побудова моделі радіолокаційного розсіяння на складному об'єкті через вимірювання в ближній зоні задля зниження помітності» (номер держреєстрації 0121U109884);
- «Дослідження закономірностей формування та керування станом електромагнітного поля у кластерних та/або топологічних метаповерхнях» (номер держреєстрації 0122U001656).

#### **4. Особистий внесок дисертанта в отриманні в отриманні наукових результатів та їх новизна**

Наукова новизна результатів дослідження, отриманих особисто здобувачем, полягає у наступному:

- Вперше було розроблено алгоритм створення та обробки моделі великогабаритного об'єкту складної форми для оцінки його радіолокаційної помітності. Об'єкт може бути розташовано на підстильній поверхні, до об'єкту можна застосовувати різні види покриттів в тому числі й килимового типу. Модель створюється для подальшої оцінки радіолокаційної помітності об'єкта на основі конструкторської моделі об'єкту або його креслень.
- Вперше створено та оптимізовано алгоритм обробки цієї моделі перед безпосередньо розрахунком повного відбитого поля.
- Вперше описані основні етапи моделювання та зазначено, які дані можна зберігати для подальшого використання у майбутніх моделюваннях, коли змінюються ті чи інші параметри моделі або падаючої хвилі.
- Вперше проведено порівняння різних підходів до створення моделей об'єкта, проведена оцінка їх ефективності. У якості тестових об'єктів використовувались як відносно прості об'єкти, так і модель реально існуючої техніки.
- Вперше показано, що використання КД-дерев із поділом за медіанним фацетом значно пришвидшує алгоритм пошуку видимих фацетів як для первинного випромінювання, так і для вторинного (перевідбиття).

- Вперше запропоновано та доведено ефективність збереження певної інформації на різних етапах моделювання для підвищення ефективності перерахунку розсіяного поля об'єктом складної форми.

- Вперше розроблено методика зберігання інформації щодо геометричних та електродинамічних параметрів об'єкту, що аналізується.

- Вперше показано, що для довільної підстильної поверхні з заданим коефіцієнтом відбиття можна отримати розсіяне поле у вигляді ступеневого ряду за коефіцієнтом відбиття, де коефіцієнти біля різних доданків (амплітуди напруженості електричних полів перевідбитих полів) можна виразити через набір амплітуд напруженості електричних полів для декількох підстильних поверхонь.

- Вперше було запропоновано методи оптимізації моделі об'єкту складної форми для зменшення його радіолокаційної помітності.

#### **5. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.**

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, результатів і висновків дисертації не викликає сумнівів і визначається наступним:

- 1) коректністю постановки задач;
- 2) використанням добре відомих та апробованих методів сучасної радіофізики, математичної статистики та числових методів;
- 3) погодженням результатів числового моделювання з добре відомими аналітичними або наближеними даними щодо розсіяння поля на простих цілях.

#### **6. Наукове та практичне значення результатів дисертації.**

Отримані в дисертації наукові результати є новими та науково значимими. Тематика створення малопомітної військової техніки є актуальною впродовж багатьох років, а отже дослідження щодо моделювання розсіяння електромагнітних хвиль на таких цілях, які наведені у дисертації, належать до основних наукових напрямів сучасної радіофізики. Вони відносяться до задач розсіяння електромагнітних хвиль на об'єктах зі складною формою поверхні.

Дослідження проведені під час написання дисертації використовувались для написання звітів науково дослідних робіт, які проводились на кафедрі теоретичної радіофізик факультетут радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем.

Розроблені підходи та алгоритми є надзвичайно корисними під час розробки нової малопомітної для радіолокаційних систем виявлення, розвідки та наведення зброї військової техніки та для оцінки радіолокаційної помітності зразків вже існуючої техніки з метою формування рекомендацій по її зниженню.

#### **7. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача в публікації.**

Основні результати дисертації опубліковані в 13 наукових працях, з них – 5 статті у наукових фахових виданнях України, 2 – в наукових зарубіжних виданнях, які включені до наукометричних баз Scopus та Web of Science, та в 6 тезах міжнародних наукових конференцій.

#### **Наукові праці в наукових фахових виданнях України:**

1. Хричов В.С., Легенький М.М. Фацетна модель об'єкту складної форми для розрахунку електромагнітного розсіяння // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2019. № 28. С. 44-52.

URL: <https://periodicals.karazin.ua/radiophysics/article/view/12594>

(Особистий внесок здобувача: створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

2. Khrychov V.S., Legenkiy M.N. Щодо моделювання розсіяння хвиль на об'єкті складної форми // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2018. № 29. С. 50-56.

URL: <https://periodicals.karazin.ua/radiophysics/article/view/15038>

(Особистий внесок здобувача: створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

3. Legenkij M.N., Khrychov V.S. Імпульсна антена на основі неоднорідної конічної лінії // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2019. № 31. С. 59-65.  
URL: <https://periodicals.karazin.ua/radiophysics/article/view/15047>

(Особистий внесок здобувача: обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

4. Хричов В.С., Легенький М.М. Методика розрахунку ефективної поверхні розсіяння об'єкта складної форми розташованого на підстильній поверхні з довільним коефіцієнтом відбиття // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021. № 34. С. 48-55.

URL: <https://periodicals.karazin.ua/radiophysics/article/view/18170>

(Особистий внесок здобувача: створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення моделювання для різних типів підстильної поверхні, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

5. Хричов В.С., Легенький М.М., Щодо зменшення помітності складного об'єкту на тлі підстильної поверхні, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія “Радіофізика та електроніка”, випуск 35, 2021.

URL: <https://periodicals.karazin.ua/radiophysics/article/view/18692>

(Особистий внесок здобувача: створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення моделювання із використанням різних методів зменшення помітності, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

**Наукові праці в періодичних наукових виданнях держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку,**



**проіндексованих в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science:**

6. Cui, J., Legenkiy, M., Khrychov, V., Shulga, S., Sun, Z., Zheng, Y. Diffraction properties of azimuthally symmetric gratings in a hollow circular dielectric waveguide (2020) // Results in Physics, Vol. 18, № 103204.

URL:<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85087725567&origin=resultslist&sort=plf-f>

(Особистий внесок здобувача: Обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

7. Legenkiy M., Khrychov V. "Numerical modeling of electromagnetic scattering from complex shape object with coating" Frequenz, paper № 20210062, 2021.

URL:<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85115636101&origin=resultslist&sort=plf-f>

(Особистий внесок здобувача: запропонував алгоритм моделювання різних видів покриттів при розрахунку розсіяного поля об'єктом складної форми, проведення розрахунків, обговорення та аналіз результатів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті)

**Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (Тези доповідей на наукових конференціях):**

8. Khrychov V., Legenkiy M. Facet Model Processing for Complex Shape Object Scattering Calculation // Proceedings of the IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET, 2018, PP. 192–195

URL:<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85054056482&origin=resultslist&sort=plf-f>

(Особистий внесок здобувача: створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення моделювання електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми, підготовка матеріалів та ілюстрацій, обговорення та аналіз результатів, оформлення статті, підготовка та доповідь на конференції)

9. Khrychov V., Legenkiy M. Electromagnetic Scattering for Complex Shape Objects with and without Cloaking // Proceedings of the IEEE international Conference on Ultrawideband and Ultrashort Smpulse Signals (uwbusis- 2018), Odessa – 2019.

URL:<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85057487211&origin=resultslist&sort=plf-f>

(Особистий внесок здобувача: проведення моделювання електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми, які оснащені різними видами покриттів, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті, обговорення та аналіз результатів, підготовка та доповідь на конференції)

10. Khrychov V., Legenkiy M. Cloak Modeling for Complex Shape Radar Target // Proceedings of IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv – 2019.

URL:<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85074920669&origin=resultslist&sort=plf-f>

(Особистий внесок здобувача: створення комп'ютерної програми для моделювання, проведення моделювання електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті, обговорення та аналіз результатів, підготовка та доповідь на конференції)

11. Khrychov V., Legenkiy M. Different components of the electromagnetic scattering of complex shape objects // Proceedings of the IEEE microwaves, radar and remote sensing symposium (MRRS-2020), 2020.

URL:<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85097722750&origin=resultslist&sort=plf-f>

(Особистий внесок здобувача: створення алгоритму для моделювання електромагнітного розсіяння з урахуванням різних компонент, підготовка матеріалів та ілюстрацій, оформлення статті, обговорення та аналіз результатів, підготовка та доповідь на конференції)

12. Khrychov V., Legenkiy M. Using KD-tree for Algorithm of Electromagnetic Scattering Calculation on Complex Shape Objects // Proceedings of the IEEE 3rd Ukrainian Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv – 2021

URL:<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85118921537&origin=resultslist&sort=plf-f>

(Особистий внесок здобувача: запропонував використовувати алгоритми трасування променів та KD-tree структури даних для моделювання електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми, підготовка матеріалів та ілюстрацій, обговорення та аналіз результатів, оформлення статті, підготовка та доповідь на конференції)

13. Khrychov V., Legenkiy M., "Modeling and Data Processing of the Electromagnetic Wave Scattering by Complex Shape Objects," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 550-553, doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037135.

URL:<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85149182918&origin=resultslist&sort=plf-f>

(Особистий внесок здобувача: Підготовка матеріалів та ілюстрацій, обговорення та аналіз результатів, оформлення статті, підготовка та доповідь на конференції)

#### **8. Дотримання академічної доброчесності**

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної доброчесності.

#### **9. Апробація матеріалів дисертації.**

Основні результати дисертаційної роботи були представлені, доповідались та

обговорювались на 6 міжнародних наукових конференціях:

1. Khrychov V., Legenkiy M. Facet Model Processing for Complex Shape Object Scattering Calculation // Proceedings of the IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, MMET, 2018, PP. 192–195
2. Khrychov V., Legenkiy M. Electromagnetic Scattering for Complex Shape Objects with and without Cloaking // Proceedings of the IEEE international Conference on Ultrawideband and Ultrashort Smpulse Signals (uwbusis- 2018), Odessa – 2019.
3. Khrychov V., Legenkiy M. Cloak Modeling for Complex Shape Radar Target // Proceedings of IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv – 2019.
4. Khrychov V., Legenkiy M. Different components of the electromagnetic scattering of complex shape objects // Proceedings of the IEEE microwaves, radar and remote sensing symposium (MRRS-2020), 2020.
5. Khrychov V., Legenkiy M. Using KD-tree for Algorithm of Electromagnetic Scattering Calculation on Complex Shape Objects // Proceedings of the IEEE 3rd Ukrainian Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv – 2021
6. Khrychov V., Legenkiy M., "Modeling and Data Processing of the Electromagnetic Wave Scattering by Complex Shape Objects," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 550-553, doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037135.

#### **10. Оцінка структури, мови та стилю дисертації.**

Дисертація є цілісною роботою, написаною науковим стилем мовлення з коректним застосуванням сучасної наукової термінології. Спільне викладення матеріалів дисертації є доступним для сприйняття. Результати досліджень викладені логічно й послідовно. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора

філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44), наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

**11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.**

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Хричова В.С. «Радіолокаційна помітність об'єктів складної форми із покриттям та без нього» відповідає спеціальності 105 – Прикладна фізика та наноматеріали. Здобувачем повністю виконано освітню та наукову складову освітньо-наукового рівня вищої освіти.

**12. Рекомендація дисертації до захисту.**

Дисертаційна робота Хричова В.С. «Радіолокаційна помітність об'єктів складної форми із покриттям та без нього» відповідає вимогам, передбаченим «Порядком присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44).

Здобувач представив основні результати своєї дисертаційної роботи на розширеному засіданні кафедри теоретичної радіофізики факультету радіофізики, біомедичної електроніки та комп'ютерних систем Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна щодо попередньої експертизи дисертації (Витяг з протоколу №8 розширеного засідання кафедри теоретичної радіофізики від 24.10.2023) у формі презентації та дискусії після її завершення. На даному засіданні було присутньо 18 співробітників з різних наукових та навчальних установ України, із яких 7 докторів наук, 6 кандидатів наук та 1 доктор філософії. Дисертанту було задано 9 запитань, на які він надав вичерпні відповіді. Також виступили 5 науковців, які позитивно відізнались про наукові дослідження Хричова В.С.

У рамках цього засідання було ухвалено одноголосно рекомендувати дисертаційну роботу Хричова В.С. «Радіолокаційна помітність об'єктів

складної форми із покриттям та без нього» до захисту в разовій спеціалізованій  
вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 –  
Прикладна фізика та наноматеріали з галузі знань 10 – Природничі науки.

В.о. завідувача кафедри  
теоретичної радіофізики  
факультету радіофізики, біомедичної  
електроніки та комп'ютерних систем  
кандидат фіз.-мат. наук, доцент



Вячеслав ХАРДІКОВ