

**РІШЕННЯ**  
**спеціалізованої вченої ради PhD 9051**  
**про присудження ступеня доктора філософії**

Спеціалізована вчена рада Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича PhD 9051, Міністерства освіти і науки України, м. Чернівці прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації на підставі прилюдного захисту дисертації «Метаструктури із паралельних провідників для систем провідного та безпровідного передавання електромагнітних сигналів» за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка «24» червня 2025 року.

Хобзей Микола Михайлович 1998 року народження, громадянин України, освіта вища: закінчив у 2020 році Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича за спеціальністю «Телекомунікації та радіотехніка».

15 вересня 2021 р. вступив на денну форму навчання до аспірантури у Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. За період навчання підготував дисертацію на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка та виконав освітньо-наукову програму. На сьогодні є аспірантом кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Дисертацію виконано у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича, Міністерства освіти і науки України, м. Чернівці.

Науковий керівник Саміла Андрій Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Здобувач має 16,5 наукових публікацій за темою дисертації, з них 1,5 статті у наукових фахових виданнях України, 6 статей у закордонних періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus (Q1, Q2, Q3), одна стаття у зарубіжному журналі, що додатково відображає результати та 9 друкованих праць апробаційного характеру:

1. Khobzei M., Tkach V., Vovchuk D. Mikhailovskaya A., Haliuk S., Samila A., Porins J., Salgals T., Bobrovs V., Ginzburg P. Deformable time-modulated wire media resonators. *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*. 2025. Vol. 12. P. 101343. (Scopus, Q2).
2. Vovchuk D., Khobzei M., Apostoliuk M., Tkach V., Simovski C. Broadband transfer of binary images via optically long wire media. *Nanophotonics*. 2023. Vol. 12, no. 14. P. 2797–2807. (Scopus, Q1).
3. Vovchuk D., Khobzei M. Investigation of frequencies characteristics of modified waveguide aperture by wire media. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. 2020. Vol. 93. P. 59–64. (Scopus, Q3).

4. Khobzei M. Sub-GHz Broadband Multi-channel Waveguiding Based on Subwavelength Wire Media. Security of Infocommunication Systems and Internet of Things. 2024. Vol. 2, no. 1. P. 01010.
5. Політанський Л., Вовчук Д., Галюк С., Хобзей М., Робулець П. Застосування провідникових метаструктур у радіотехнічних засобах для передавання та випромінювання ЕМ хвиль (огляд). Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 3. С. 102–110.

У дискусії взяли участь голова і члени спеціалізованої вченої ради:

**Ушенко Юрій Олександрович**, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

**Андрійчук Михайло Іванович**, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу числових методів математичної фізики Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України.

**Семенов Андрій Олександрович**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету.

**Солтис Ірина Василівна**, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

**Олар Олександр Валерієвич**, кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

**Андрійчук Михайло Іванович**, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу числових методів математичної фізики Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України. Висловлені такі зауваження:

1. На мій погляд, не зовсім вдалою є назва дисертаційної роботи, оскільки поняття метаструктури (метаматеріалу) відноситься до об'єктів, які мають компоненти з різними фізичними властивостями. Якщо розглядати СПП, які досліджуються в роботі, то з точки зору функціональних характеристик, їх можна розглядати як метаструктури, однак з точки зору технічної реалізації це не зовсім коректно.
2. Постановку задачі поширення ЕМ хвиль у структурі СПП сформульовано на описовому рівні з посиланням на джерела, які стосуються технічних та технологічних аспектів. Для кращого розуміння проблематики роботи, на мій погляд, варто було сформулювати електродинамічну постановку задачі і навести результати числового моделювання, які б мали узгоджуватися з результатами моделювання в середовищі CST Studio Suite.
3. В процесі проведення експерименту визначення резонансів Фабрі-Перо елементарної комірки не визначено умови, які визначають чистоту

експерименту. Резонанси чітко виділені, але не зрозуміло, в яких умовах проходив експеримент, чи необхідно було використовувати безехову камеру? Крім того, вказано, що на рис. 3б наведено експериментальні дані, але як видно з поведінки наведених кривих, вони більше відповідають результатам комп'ютерного моделювання.

4. В розділі 3, де проводиться дослідження СПП як хвилеводу для застосування в системі вузькосмугового передавання енергії ЕМ хвиль шляхом зміни геометричних розмірів СПП, не вказано які співвідношення необхідно встановлювати на період системи і радіус провідників, щоб взаємовплив окремих провідників не впливав суттєво на процес поширення ЕМ хвиль.
5. На рис. 4.15 (стор. 136) показано порівняння значень ефективного поперечника розсіювання, отриманих під час експериментів та комп'ютерного моделювання, при фіксованих значеннях періоду розташування провідників. Однак, дві криві наведено суцільною лінією; це не зовсім коректно, оскільки зрозуміло, що експериментальні дані отримано для дискретних значень частот.

*Семенов Андрій Олександрович*, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету. Висловлені такі зауваження:

1. Потребує детального пояснення термін «плазмова частота», який автор використав після формули (1.1) як опис змінної  $\omega_p$  на стор. 38. Також потребує додаткового пояснення термін «магнітна плазмова частота» який автор використав після формули (1.2) на сторінці 39.
2. У Висновках до розділу 2 на стор. 99 зазначено, що «Джерелами ЕМ хвиль виступали електрично малі дипольні антени ...» Електрично малі дипольні антени, це є несиметричні дипольні антени, довжина плеча яких менша чверті робочої хвилі. У п. 2.1 для дослідження елементарної комірки СПП автор використав півхвильову симетричну дипольну антену.
3. Назва п.п. 3.2 і 3.3 дисертаційної роботи має спільну фразу «Контроль частотними характеристиками». У зазначених підрозділах відсутня інформація що є об'єктом контролю. Можливо здобувач мав на увазі «Керування частотними характеристиками»?
4. На рисунку 2.2(б) показаний графік частотної залежності коефіцієнта відбивання  $S_{11}$  елементарної комірки структури з паралельних провідників у діапазоні частот 1,0-2,0 ГГц при збудженні електромагнітної хвилі дипольною антеною. Чисельні значення коефіцієнта відбивання  $S_{11}$  на частоті 0,935 ГГц становить біля 1,0 дБ та на частоті 1,865 ГГц становить біля 1,35 дБ. В абзаці над рисунком 2.2 (стор. 71) сказано: «Отримані коефіцієнти  $S_{11}$  показують, що досліджувана ЕК характеризується узгодження імпедансів із

вмонтованою дипольною антеною на частотах резонансу Фабрі-Перо ...» Потребує додаткового пояснення чи достатньо узгоджена елементарна комірка із вмонтованою дипольною антеною при вказаних чисельних значеннях коефіцієнта відбивання.

5. На рисунку 2.13(б) показаний графік частотних характеристик коефіцієнта відбивання комп'ютерної моделі структури з паралельних провідників суб-ТГц розмірів. На цьому графіку видно 12 резонансів у діапазоні частот від 0,1 ТГц до 1,0 ТГц із значеннями коефіцієнта відбивання  $S_{11}$  у діапазоні 0,02 дБ до 0,22 дБ. Які значення коефіцієнта стоячої хвилі їм відповідають? Чи будуть істотно розрізнятися вказані резонансні частоти засобами вимірювальної техніки при такій малій різниці абсолютної величини  $S_{11}$ ?
6. Не дотримана єдина термінологія по тексту дисертації. Наприклад, на стор. 37 у першому реченні п.п. 1.1.1. написано «діелектрична проникність стає негативною ...», а в наступному реченні написано «від'ємна діелектрична проникність ...».
7. Рисунок 1.4, що відображений на сторінках 40-41, розміщений до його згадування в тексті. Аналогічне зауваження до розміщення рисунка 2.5 на стор. 78-79.

**Солтис Ірина Василівна**, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Висловлені такі зауваження:

1. У підрозділі 2.4 наведено результати комп'ютерного моделювання процесу передавання растрових зображень через СПП, зокрема розподіли напруженості електричного поля в площині вихідної апертури на чотирьох різних частотах:  $f_1 = 2$  ТГц,  $f_2 = 3$  ТГц,  $f_3 = 3,5$  ТГц,  $f_4 = 3,85$  ТГц. Натомість у підрозділі 2.5, який демонструє результати експериментальних досліджень, аналогічні розподіли Е-поля та результати цифрового аналізу зображень подано лише для частот  $f_3$  та  $f_4$ . Незрозуміло, з чим пов'язана така вибіркковість, і чи проводилися експерименти для частот  $f_1$  та  $f_2$ .
2. Не розкрито фізичний механізм передавання растрових зображень у міжрезонансному діапазоні частот. Залишається незрозумілим, чому передавання зображень між резонансами Фабрі-Перо є ефективним, тоді як на самих частотах резонансів або кратних їм спостерігається суттєве погіршення якості передавання, що виявляється у зростанні коефіцієнта бітової помилки BER, як це проілюстровано на рис. 2.8г.
3. Розділ 3 присвячено вивченню конструктивних змін СПП (радіус провідників, періодичність їх розташування) з метою застосування структури в антенних технологіях. Основна увага зосереджена на характеристиках відбивання ( $S_{11}$ -параметри), що відображають ступінь узгодженості з джерелом сигналу. Однак недостатньо розглянуто

характеристики випромінювання в далекій зоні – зокрема діаграму спрямованості, її ширину та коефіцієнт підсилення. На рис. 3.5 наведено результати комп'ютерного моделювання діаграм спрямованості для частот 1,17 ГГц та 1,5 ГГц, однак не вказано, чи виконувались відповідні експериментальні дослідження, а також не проаналізовано, як геометричні зміни структури впливають на зазначені параметри.

4. Актуальна наукова тема модульованих у часі метаматеріалів знаходить дедалі ширше застосування у сучасних технологіях. Одним із ключових параметрів таких систем є швидкість модуляції. У розділі 4 розглянуто динамічне регулювання характеристик СПП шляхом механічної деформації (стискання/розтягування), однак відсутня оцінка максимально можливої частоти такої модуляції, що є критичним для визначення швидкодії пристрою та його практичної реалізації.

**Олар Олександр Валерієвич**, кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Висловлені такі зауваження:

1. На рис. 2.3а-б представлено експериментальний макет та результати дослідження функцій відбивання та передавання через елементарну комірку СПП шляхом вимірювання спектрів параметрів  $S_{11}$  і  $S_{21}$  відповідно. Однак отримані залежності, наведені на рис. 2.3б, виглядають зашумленими та містять, крім резонансів Фабрі-Перо, додаткові низькочастотні осциляції, що може викликати сумніви щодо достовірності таких вимірювань. Залишається незрозумілим, з чим саме це пов'язано, та чи проводилось калібрування вимірювальних кабелів перед початком експерименту?
2. Підрозділ 2.3 присвячено визначенню допустимого значення просторової роздільної здатності апертури СПП для передавання растрових зображень. Проте із наданого опису не зовсім зрозуміло, чому саме обране значення просторової роздільної здатності дорівнює  $2a$ , а також чим зумовлена різниця між результатами комп'ютерного моделювання та експериментальних досліджень щодо перехресного передавання сигналів у межах СПП.
3. Підрозділи 4.1 та 4.2 присвячені розвитку ідеї динамічного контролю електромагнітних характеристик СПП шляхом її механічної деформації та описують механізм фізичної реалізації такого підходу у вигляді експериментального зразка. Проте залишаються відкритими такі питання:
  - чи передбачалося стиснення або розтягнення СПП одночасно вздовж двох осей, і чи проводилися відповідні дослідження;

- чому для аналізу обрані саме моди TE<sub>22</sub> та TE<sub>30</sub>, чи розглядалися моди вищих порядків, які, завдяки більшому Q-фактору, потенційно можуть покращити роздільну здатність згідно з підходом, запропонованим у роботі;
- яким чином змінні умови навколишнього середовища, зокрема вологість, впливають на електромагнітні характеристики експериментальної СПП, враховуючи, що в якості основи використано еластичний матеріал – поліпропілен.

На дисертацію та анотацію Миколи Михайловича Хобзея надійшло п'ять звернень. Всі вони позитивні та не містять зауваження

Перше звернення надійшло від доктора технічних наук, професора Леоніда Михайловича Заміховського, завідувача кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій і систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. У зверненні підкреслюється актуальність теми дослідження, пов'язаної з використанням структур із паралельних провідників у телекомунікаційних та сенсорних системах. Відзначено, що у роботі запропоновано низку інноваційних рішень, зокрема багатоканальний хвилевід, адаптивну антену та модель ендоскопу для передавання зображень у суб-ТГц діапазоні. Результати дослідження мають практичну значущість, підтверджену експериментами та апробацією. Леонід Михайлович Заміховський висловлює переконання, що дисертаційна робота є завершеним дослідженням, а дисертант заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії.

Друге звернення надійшло від доктора технічних наук, професора Володимира Петровича Лисечка, професора кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту. У зверненні наголошено на актуальності теми дисертації, яка відповідає сучасним викликам галузі телекомунікацій та радіотехніки, зокрема у контексті впровадження технологій 5G, IoT та медичної візуалізації. Відзначено наукову новизну дослідження, що полягає у використанні структур із паралельних провідників для передавання зображень, керування резонансними характеристиками та адаптивного застосування в антенних системах. Практичну цінність роботи підтверджують створені прототипи та їх апробація у сертифікованих лабораторіях. Володимир Петрович Лисечко вважає, що дисертація є завершеним дослідженням і автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії.

Третє звернення надійшло від д-ра Ярослава Луцика, асистент-професора кафедри фізики твердого тіла Лодзького університету (Польща). У своєму зверненні д-р Луцик відзначає високу актуальність теми дисертації Миколи Хобзея, яка пов'язана з розробкою метаструктур на основі провідникових середовищ для передавання електромагнітних сигналів. Автором запропоновано інноваційні рішення, зокрема концепцію аналогів

оптично довгих ендоскопів для передачі зображень, а також механічне керування резонансними характеристиками. Практична реалізація охоплює створення багатоканального хвилеводу, антен адаптивної структури, сенсорних модулів, придатних для використання в технологіях 5G, медичній діагностиці та моніторингу конструкцій. Робота має вагому експериментальну базу, результати оприлюднено у рецензованих виданнях (Scopus Q1-Q3) та представлено на міжнародних конференціях. На думку д-ра Луцика, дисертація відповідає міжнародним вимогам до PhD-досліджень, і її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії.

Четверте звернення подано д-ром Марексом Парфйоновсом, старшим науковим співробітником Інституту фотоніки, електроніки та телекомунікацій Ризького технічного університету (Латвія). У своєму зверненні він підкреслює, що дисертаційна робота Миколи Хобзея є цінним внеском у галузь прикладної електродинаміки та систем на основі поширення хвиль. Особливу увагу приділено новаторському підходу до використання провідникових метаструктур для передавання зображень у ГГц і суб-ТГц діапазонах, а також реалізації адаптивних резонансів через зміну геометрії провідників. Д-р Парфйоновс наголошує на методологічній цілісності дослідження, ефективному поєднанні чисельного моделювання та експерименту, високому рівні опублікованих результатів і їх практичній значущості. З урахуванням вищезазначеного, він повністю підтримує присудження Миколі Хобзею ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

П'яте звернення надійшло від професора Аміра Боага, професора Школи електротехніки Тель-Авівського університету (Ізраїль). У зверненні професор зазначає, що знайомий із Миколою Хобзеєм ще з 2019 року, коли той розпочав експериментальні дослідження в Ізраїлі, зокрема в галузі лінзових антен. Попри обмежений час перебування, робота завершилася публікацією в журналі, що було високим досягненням, на той час, для магістранта. Професор ознайомився з основними положеннями дисертації, зокрема через англomовну анотацію та міжнародні публікації здобувача, які вийшли у журналах рівня Q1-Q3. Він відзначає наукову якість досліджень, які охоплюють як моделювання, так і експериментальну перевірку, у тому числі в сертифікованій безеховій камері Тель-Авівського університету. У роботі, на його думку, розкрито значимі результати у сфері метаматеріалів, сенсорних пристроїв і адаптивних антен. На підставі цього професор Боаг повністю підтримує присудження Миколі Хобзею ступеня доктора філософії зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Результати голосування:

«За» 5 членів ради,  
«Проти» 0 членів ради.

На підставі результатів голосування спеціалізована вчена рада PhD 9051 присуджує Хобзею Миколі Михайловичу ступінь доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка.

Голова спеціалізованої вченої ради PhD 9051  
доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Чернівецького національного університету  
імені Юрія Федьковича



Юрій УШЕНКО