

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Гнатюка Максима Олександровича**

**«Розвиток методу інтегральних рівнянь часткових областей,**

**що перетинаються, для розв'язання хвилеводних задач дифракції»,**

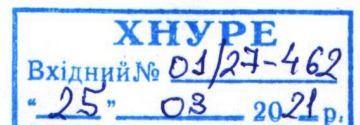
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.03 — радіофізика

### **Актуальність теми дисертації**

Прогрес у конструюванні хвилеводних пристроїв для техніки сантиметрових, міліметрових і, особливо останніми роками, терагерцевих довжин хвиль, стимулюється наявністю малих втрат, великих допустимих потужностей та наявністю високої добротності хвилеводних трансформаторів у цих діапазонах за відносно малих їх розмірів. Серед базових елементів для моделювання функціональних властивостей багатьох хвилеводних пристроїв виділяються плоско-поперечні неоднорідності, що фізично реалізуються у вигляді зміщення і стиків хвилеводів різного розміру поперечного перерізу та тонкі металеві діафрагми. Моделювання пристроїв та виявлення електродинамічних властивостей таких одиночних і зв'язаних неоднорідностей, зокрема, у хвилеводних трансформаторах терагерцевого діапазону, пов'язане з необхідністю урахуванням взаємодії вищих типів хвиль. Такі складні задачі вимагають строгої постановки та розв'язування із застосуванням ефективних чисельно-аналітичних методів електродинамічного аналізу. У зв'язку з цим велике наукове теоретичне і практичне значення має розвиток існуючих та створення нових методів розв'язання хвилеводних задач в строгій електродинамічній постановці.

Метод інтегрального рівняння є одним із універсальних строгих електродинамічних методів. До переваг цього методу можна віднести те, що застосування інтегрального рівняння дозволяє знизити розмірність початкової задачі, а побудова чисельного алгоритму на цій основі пов'язана з можливістю досягати більшої точності розв'язку у порівнянні з методами, у яких використовуються диференціальні рівняння. У цьому руслі в дисертаційній роботі Гнатюка М. О. розглядаються метод Шварца та метод частинних перетинних областей, що базуються на використанні інтегрального рівняння. Цими методами рівняння Максвелла зводяться до інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду, які, як відомо, є коректними та не вимагають додаткового застосування алгоритмів регуляризації у процесі одержання розв'язків електродинамічних задач зі складними геометричними границями та відповідними граничними умовами для поля. Постановка задачі у вигляді алгоритму виділення часткових областей здійснюється з урахуванням фізичних особливостей впливу досліджуваної структури на основні та додаткові області поширення електромагнітної хвилі та дозволяє



встановити початкове наближення розв'язку задачі. А саме такі особливості алгоритмізації вигідно відрізняють вказані методи від інших відомих чисельно-аналітичних методів.

Вищезазначеним підтверджується **актуальність** теми дисертаційного дослідження Гнатюка М. О. у плані теоретичного розвитку методу Шварца та методу частинних перетинних областей для розв'язання хвилеводних задач з геометричними нерегулярностями, що фізично реалізуються у багатьох практично реалізованих сучасних трансформаторах надвисокочастотного електромагнітного поля.

### **Наукова новизна дисертаційної роботи**

Наукова новизна результатів розглядуваної дисертаційної роботи полягає у розвитку методу Шварца та методу частинних перетинних областей для аналізу розподілів компонент електромагнітного поля та дослідження електродинамічних властивостей хвилеводних структур, що виникають у задачах конструювання багатьох хвилеводних трансформаторів. Особлива увага у роботі приділяється розвиненню підходу, що дозволяє розширити область застосування ітераційного методу Шварца і покращити його збіжність для задач аналізу фазованих антенних решіток, що утворені пласкопаралельними хвилеводами зі скінченною товщиною стінок.

Автор роботи демонструє розроблені числові алгоритми, що дозволили зменшити громіздкість ітераційного методу Шварца на етапі розрахунку коефіцієнту відбиття. Таким чином, автором вперше методом Шварца розв'язана задача дифракції електромагнітної хвилі на з'єднанні двох прямокутних хвилеводів у випадках їх співвісного з'єднання та з'єднання, у якому хвилеводи мають одне спільне ребро.

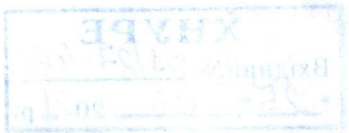
Для покращення алгоритмічних властивостей методу Шварца та методу частинних перетинних областей у розв'язанні скалярних та векторних задач, коли область визначення поля розбивається на три або більшу кількість частинних областей, автор розробляє підхід, що скорочує аналітичний етап застосування вказаних методів до розв'язку електродинамічної задачі шляхом урахування компонентів векторів електромагнітного поля у кожній частинній області. Такий підхід реалізується завдяки представленню компонентів векторів поля у вигляді розвинення за системою власних функцій кожної частинної області.

Ефективність розробленої методики продемонстрована прикладом розв'язання двох задач: скалярної задачі дифракції на фазованій антенній решітці на пласкопаралельних хвилеводах і східчастим вирізом у стінках хвилеводів, а також векторної задачі дифракції у прямокутному хвилеводі із послідовною стрибкоподібною зміною його поперечних розмірів.

Порівняння розрахунків автора із результатами, отриманими за допомогою комерційних програм електродинамічного моделювання, підтвердило ефективність розробленого в дисертаційній роботі підходу.

### **Наукове і практичне значення результатів**

Наукове і практичне значення отриманих в роботі результатів полягає у тому, що розвинені автором методи Шварца та метод частинних перетинних



областей та алгоритми, що сформовані на їх основі, є застосовними для ефективного розрахунку електродинамічних характеристик різних типів трансформаторів електромагнітних хвиль, зокрема, нескінчених фазованих антенних решіток, утворених плоскопаралельними хвилеводами за наявності апертурних неоднорідностей та структур, що складаються з повздовжньо-нерегулярних прямокутних хвилеводів.

Представлені автором результати дослідження впливу повздовжніх розмірів проміжного прямокутного хвилеводу на частотну характеристику модуля коефіцієнту відбиття каскадного з'єднання трьох прямокутних хвилеводів є важливим науковим і практичним результатом, що з урахуванням строгої електродинамічної постановки розвинутого методу дозволяє говорити про ефективність даного методу при розв'язанні оптимізаційних задач хвилеводних пристроїв.

### **Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів і висновків**

Достовірність та обґрунтованість результатів і висновків дисертації забезпечується використанням строгих електродинамічних методів, відповідністю математичних моделей рівнянням Максвелла. Достовірність отриманих результатів підтверджується також їх порівнянням з результатами, отриманими іншими методами, проведенням досліджень щодо збіжності результатів чисельного моделювання. Додатково адекватність теоретичних і геометричних моделей перевірено розглядом граничних випадків конфігурації в задачах аналізу неоднорідностей.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих наукових роботах**

Результати дисертаційної роботи Гнатюка М. О. опубліковані у повному обсязі у 15 наукових роботах, 5 статей з яких опубліковано у спеціалізованих фахових виданнях, включених у перелік МОН України за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика, та дві статті опубліковано у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus. Апробацію роботи підтверджено 10-ма публікаціями, виданих у збірниках наукових праць конференцій, дві публікації з яких індексуються у Scopus.

Дисертація написана грамотною технічною мовою з правильним використанням термінології радіофізичної науки. Оформлення дисертації та автореферату відповідає вимогам МОН України, що висуваються до кандидатських дисертацій.

Зміст автореферату повністю відповідає основним ідеям і положенням дисертації.

### **Зауваження щодо змісту дисертації**

1. В четвертому розділі роботи автор відмічає зниження коефіцієнту відбиття хвиль нескінченною фазованою антенною решіткою на хвилеводах зі східчастими вирізами в стінках та хвилеводному трансформаторі на прямокутних хвилеводах. Ефекти, що призводять до такого зниження відбиття хвиль не пояснюються. Можливо, для цього доцільним було б

детальне дослідження властивостей електромагнітного поля в областях узгоджувальних неоднорідностей.

2. Для досягнення більшої наочності результатів аналізу хвилеводних структур та, можливо, для в'яснення деяких питань ефективності (збіжності, наприклад) розроблюваного підходу (задачі розділу 3 та першої задачі розділу 4 дисертації) було б доцільним представити їх порівняння з результатами, отриманими за допомогою відомих САПР (HFSS, CST Microwave Studio, тощо).

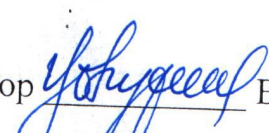
3. Для представлених у розділі 2 дисертації результатів дослідження нескінченної фазованої антенної решітки з плоскошаруватим діелектричним заповненням плоскопаралельних хвилеводів, доцільно було б подати критерії, за якими обиралися параметри вставок для забезпечення оптимального узгодження.

Вважаю, що зазначені недоліки не знижують загальної позитивної оцінки наукового рівня дисертаційної роботи Гнатюка М. О. і не ставлять під сумнів основні ідеї, висновки та результати роботи автора.

#### Загальний висновок

Дисертаційна робота Гнатюка М. О. є завершеною науковою працею в області радіофізики, що розв'язує актуальну наукову задачу розвитку строгих методів електродинамічного аналізу хвилеводних систем. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані для розробки та дослідження хвилеводних узгоджувальних, частотно селективних, випромінюючих та інших пристроїв та систем. Тема дисертації, її зміст та отримані результати відповідають паспорту спеціальності 01.04.03 – радіофізика та профілю спеціалізованої вченої ради Д64.052.03.

В цілому, дисертація задовольняє вимогам пунктів 9, 11, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013 р., а її автор Гнатюк Максим Олександрович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:  
завідувач кафедри вищої математики  
Національного університету  
«Запорізька політехніка»,  
доктор фізико-математичних наук, професор  В. М. Онуфрієнко  
« 19 » березня 2021 р.

Підпис Володимира Михайловича Онуфрієнка засвідчую.

Учений секретар  
Національного університету  
«Запорізька політехніка», к.соц.н., доцент  В. В. Кузьмін  
« 19 » березня 2021 р.

