

## ВІДГУК

офіційного опонента Дубровки Федора Федоровича  
на дисертаційну роботу Стешенка Сергія Олександровича  
*«Узагальнення та розвиток чисельно-аналітичних методів у задачах  
електродинаміки з кусково-координатними границями»*,  
яку подано до захисту на здобуття наукового ступеня доктора фізико-  
математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Перш за все, оціню дисертацію в цілому. Серед багатьох застосувань і різних математичних моделей, що використовують чисельно-аналітичні підходи обчислювальної електродинаміки, виділю три головних аспекти.

1. Узагальнено традиційний метод часткових областей (МЧО або Mode-Matching Technique) на довільні структури з кусково-координатними границями. Аналогічний чисельно-аналітичний підхід розвинено на розрахунок з'єднань регулярних хвилеводів з напівнескінченими періодичними структурами. Останню задачу доведено до точного визначення багатомодових матриць розсіювання. Це відкриває дорогу до чисельного дизайну різноманітних вузлів, що з'єднують «регулярну» і «періодичну» частини НВЧ об'єктів, які повсюдно зустрічаються в мікрохвильовій техніці від вакуумних приладів до антенної техніки.

2. Автором запропоновано і реалізовано новий підхід до точного аналізу і синтезу в декількох важливих задачах електродинаміки, де присутні «великомасштабні» об'єкти і принципово необхідні дрібноструктурні елементи, не обов'язково періодичні. Це надзвичайно актуально в антенній техніці, в вакуумних приладах НВЧ та терагерцового діапазону і в прискорювальній техніці, де точне моделювання і особливо синтез таких 3D об'єктів залишаються занадто ресурсомісткими або неможливими для сучасних комерційних пакетів, що базуються на кінцево-різницевих розв'язках.

3. Продемонстровано на практиці важливість врахування багатомодової взаємодії у різноманітних мікрохвильових або оптичних об'єктах. Така взаємодія часто породжує нові електродинамічні ефекти і призводить до нових напрямків,

наприклад, з дослідження «метаматеріалів». Властивості останніх базуються на тісній електродинамічній взаємодії складних 3D об'єктів і не могли бути передбачені в рамках традиційних уявлень. До таких ефектів, що інтенсивно вивчаються, можна віднести «негативне заломлення», яке може забезпечувати надроздільну здатність, та «штучну оптичну активність», або, іншими словами, обертання площини поляризації. Цей «чисто електромагнітний» ефект не пов'язаний зі специфічними властивостями матеріалу, наприклад з ефектом Фарадея. У разі «штучної оптичної активності» саме можливість точного аналізу 3D векторних задач в структурах з дискретним просторовим спектром (зазначена у пункті 1) дала можливість автору не тільки виявити явище повороту площини поляризації, чим часто і обмежуються, але і синтезувати й експериментально перевірити обертач площини поляризації з гранично малими поздовжніми розмірами.

Особливо відзначу широке застосування автором підходу, назвемо його «спектральним», коли неоднорідні задачі розсіювання аналізуються з детальним урахуванням розв'язків однорідних задач в області комплексних власних частот. Це дає, з одного боку, такий собі «каркас сингулярних точок» для інтерпретації явищ розсіювання та перетворення хвиль, а з іншого – допомагає в узагальненні і прогнозуванні інших проявів електродинамічних ефектів. Як приклад, наведу дослідження «дієдральності» геометрії спряжених двошарових плоско-кіральних об'єктів, що ведуть до узагальнення поняття поздовжньої симетрії об'єктів з обертальною симетрією. Виявилось, що класичне поняття «симетричного двопортовика» можна перенести і на «плоско-кіральні бішари» з єдиною відмінністю, яка полягає в повороті системи координат вихідного порту. Можна сподіватися, що на цьому шляху автор знайде й інші узагальнення.

Не зупиняючись детально на всіх розділах дисертації, постараюся виділити характерні моменти формальної оцінки.

**Актуальність проблем**, вирішених С. О. Стешенком, пов'язана з тим, що далеко не всі дослідницькі та практичні задачі електродинаміки можуть бути успішно розглянуті за допомогою відповідних комерційних обчислювальних

засобів. Іноді заважає мала точність, іноді занадто великі часові витрати, а, в разі дуже добротних ефектів, і нестійкість результату. На жаль ті точні і швидкі методи, які вже при початковому формулюванні враховують граничні умови або деяку їх частину на аналітичному рівні, традиційно вимагали індивідуального підходу до кожної конкретної задачі. Цікавим є той факт, що в «узагальнених» проєкційних розв'язках МЧО характерні точки АЧХ, як і власні розв'язки матричних операторів, існують вже на малих порядках усікання, що впливає із загальної теорії.

У дисертації вирішено проблему автоматичної побудови всієї структури матричних операторів проєкційних розв'язків, що також включає розрахунок інтегралів зв'язку при знаходженні матриць розсіювання плоско-поперечних з'єднань складних хвилеводів з фрагментарно-заданими розкладаннями багатомодових базисів. Природно, що це вдалося реалізувати на базі сучасних проблемно-орієнтованих мов програмування, які дозволили покласти на плечі комп'ютера розшифрування топології задачі і організацію обчислювального процесу в цілому. Можливість ступінчастої апроксимації криволінійних поверхонь хвилеводів за рівнем універсальності наближує чисельно-аналітичні розв'язки до універсальних, що базуються на кінцево-різницевих методах, зберігаючи відомі переваги перших.

Підхід, запропонований R. H. McPhie і K. L. Wu для розрахунку з'єднання круглого і прямокутного (або хрестоподібного) хвилеводів, узагальнено автором на з'єднання круглих і кусково-декартових хвилеводів (Г-, П-, Н-подібні тощо і). Необхідність розрахунку таких фрагментів виникає досить часто, наприклад, при розгляданні «гаммадионів» (свастик) у метаматеріалах.

Крім узагальнення МЧО С. О. Стешенком запропоновано низку нових рішень в тих актуальних задачах, які все ж вимагали індивідуального підходу. Серед них:

- створення повної моделі антени «дифракційного випромінювання», включаючи синтез профілю гребінчастої структури з урахуванням розсіювання хвилі діелектричного хвилеводу на вхідній і вихідній ділянках. За кордоном подібні

антени називають антенами «витічних хвиль». Тут задача зводилася до сингулярних інтегральних рівнянь, для розв'язання яких використано метод дискретних особливостей. Для синтезу профілю глибин ґратки за діаграмою спрямованості запропоновано метод, що враховує на початковому етапі синтезу точні енергетичні характеристики випромінювання при розсіянні власної хвилі діелектричного хвилеводу на окремій канавці;

- розв'язок задачі про збудження багат шарових ґраток зі срібних нанокуль одним або декількома дипольними джерелами, що дозволило встановити зв'язок між ефектом субхвильового фокусування і власними режимами нескінченних ґраток;

- детальний аналіз зв'язку випромінювання з апертури плоскопаралельного хвилеводу з гофрованими фланцями шляхом розгляду власних режимів періодичних структур;

- запропоноване нове дисперсійне рівняння для круглого хвилеводу з діелектричною вставкою, яке не має особливостей. Цей підхід може бути узагальнено на випадок багат шарових круглих хвилеводів.

Природно, що результати дисертації в області радіофізики мають розглядатися, перш за все, як створення нового, практично важливого інструменту для розв'язання задач електродинаміки: як тих, що давно потребують розв'язання, так і тих, що недавно виникли в радіофізиці. Конкретні приклади застосувань, наведені в дисертації, породжені задачами, що виникли в ІРЕ НАНУ в вакуумній електроніці (клинотрон), в антенній техніці (антена дифракційного випромінювання), при модернізації радіотелескопів в РІ НАНУ і новими напрямками радіофізики, такими, наприклад, як дослідження і використання метаматеріалів (у автора це - дієдральні «метакомірки», плоско-кіральні бішари в хвилеводах і у вільному просторі, границя розділу з напівнескінченим шаруватим середовищем метаматеріалу тощо).

Серед уже реалізованих практично важливих результатів слід відзначити:

- запропонований і чисельно оптимізований надкомпактний перестроюваний обертач площини поляризації у круглому хвилеводі,

- обертач площини поляризації у круглому хвилеводі, утворений парою гофрованих фланців,

- фільтри і переходи у хвилевідному тракті радіотелескопа.

До них також відносяться програмні інструменти, що використовуються в інших споріднених підрозділах в області електроніки і антенної техніки, що включають

- повну 3D електродинамічну модель клинотрона з П-подібними ламелями в гребінці, з реальною конфігурацією вхідного і вихідного вузлів, яка вже використовується при дослідженні і проектуванні вакуумних приладів терагерцового діапазону.

- модель з синтезом антени витічних хвиль, яка використовується для розробки реальних антен.

Недоліком дисертації, мабуть, можна вважати її значне «перевантаження». Число розв'язаних задач велике. Тут автора можна зрозуміти, однак читачеві важко виділити лейтмотив. В принципі вистачило б узагальнення МЧО в декартових і циліндричних координатах, що супроводжується серією застосувань в хвилеводах, антенах, холодних системах електронних приладів НВЧ та в метаматеріалах. Стилістичні недоліки не варті уваги.

З вищевикладеного випливає, що в дисертації С. О. Стешенка «Узагальнення та розвиток чисельно-аналітичних методів у задачах електродинаміки з кусково-координатними границями», яку подано до захисту на здобуття ступеня доктора фізико-математичних наук, вирішено фундаментальну проблему обчислювальної електродинаміки, що полягає в узагальненні та подальшому розвитку чисельно-аналітичних методів розв'язання електродинамічних задач у радіофізиці. Думаю, що закладені в ній розв'язки ще дадуть свої плоди в нових дослідженнях в області метаматеріалів. Загалом, що рецензована робота являє приклад широкого застосування різних математичних методів, що останнім часом зустрічається нечасто, виконана на високому теоретичному рівні, містить багато нових наукових результатів, має значну практичну цінність і заслуговує на найвищу оцінку.

Вважаю, що дисертація С. О. Стешенка задовольняє усі чинні вимоги до докторських дисертацій, а її автор безперечно заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Доктор технічних наук,  
професор,  
професор кафедри теоретичних основ радіотехніки  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
Заслужений діяч науки і техніки України,  
Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки



Федір Дубровка

*Зі згодою проф. Дубровки Ф.*  
*завершено*



*Сіман Аветісханян*