

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Яцика Миколи Васильовича “Моделі та обчислювальні методи дослідження нелінійних шарових електродинамічних структур”, представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дослідження

Дослідження електродинамічних характеристик нових матеріалів у діапазонах терагерцових хвиль на сучасному етапі демонструє їхні нелінійні властивості. Врахування цих властивостей обумовило в свою чергу бурхливий розвиток багатьох галузей теоретичної та прикладної електродинаміки, зокрема лазерної техніки, спектроскопії, оптоволоконних ліній зв'язку, а також знайшло численні застосування в таких галузях, як екологія, медицина та біологія.

Одним з типів нових матеріалів, які зараз інтенсивно досліджуються і впроваджуються, є нелінійні діелектрики з керованою діелектричною проникністю. Їхнє використання дає можливість підвищити багатофункціональність приладів мікроелектроніки і на основі нових науково-технічних рішень розширити область їх застосування.

Створення нових типів діелектриків для впровадження та виробництва сучасних пристроїв функціональної мікроелектроніки вимагає всебічного аналізу їх властивостей, оскільки це дає можливість широко використовувати їх у процесі модуляції, детектування, посилення, ресстрації, запам'ятовування, відображення і інших типів перетворення електричних і оптичних сигналів.

Особливу увагу дослідників привертає дослідження матеріалів з нелінійними властивостями в діапазоні резонансних частот. Аналіз резонансних властивостей нелінійних електродинамічних об'єктів вимагає розвитку нових підходів. Для успішного аналізу необхідно використовувати строгі методи аналізу граничних нелінійних задач радіофізики. Вищевказане свідчить про актуальність досліджень, виконаних у поданій дисертаційній роботі. Виконання дисертаційної роботи пов'язане з низкою міжнародних наукових та вітчизняних проектів, що є додатковим підтвердженням її актуальності.

Структура та зміст роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який включає 120 найменувань, двох додатків і містить 65 ілюстрацій. Загальний обсяг роботи складає 188 сторінок, з них 163 сторінок основного тексту.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, окреслено її наукову специфіку, сформульовано мету роботи та задачі дослідження. Також наведено коротку характеристику результатів дослідження, їх наукове та практичне значення, ступінь апробації результатів та опублікування.

Перший розділ містить аналіз предметної області, яка стосується теми дисертації. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що прояв того чи іншого механізму поляризованості залежить від величини поля збудження, частоти, його фізичних параметрів тощо.

Підкреслено, що на основі аналізу системи рівнянь Максвелла, яка



використовується для опису нелінійних хвильових процесів ізотропної, немагнітної, лінійно поляризованої (для Е-поляризованої) та нелінійної шаруватої діелектричної структури з кубічною поляризацією середовища з використанням просторово-часових координатах можна перейти до скалярних нелінійних хвильових рівнянь відносно електричної складової електромагнітного поля. Водночас, нелінійний гармонійний аналіз в частотній області описується нескінченною системою нелінійних рівнянь в часткових похідних, які відповідають кратним частотам розсіяння і генерації хвиль.

Проаналізовано також систему нелінійних рівнянь що описує процес генерації третьої гармоніки при збудженні поперечно неоднорідної нелінійної діелектричної шаруватої структури квазіоднорідним електромагнітним полем (пакетом плоских хвиль). Це дало змогу побудувати в наступному строгу електродинамічну модель нелінійної шаруватої електродинамічної структури.

У **другому розділі** проведено дослідження системи нелінійних крайових задач розсіяння і генерації хвиль третьої гармоніки нелінійною шаруватою діелектричною структурою на базі еквівалентної їй системи одновимірних (уздовж висоти структури) нелінійних інтегральних рівнянь Гаммерштейна відносно невідомих функцій. Застосування квадратурних формул дозволяє звести отриману систему нелінійних інтегральних рівнянь до системи комплексних нелінійних алгебраїчних рівнянь другого роду. Для розв'язання системи використано блочно ітераційний алгоритм, на кожному кроці якого розв'язуються системи лінеаризованих алгебраїчних рівнянь.

Порівняння результатів обчислень, отриманих наближенням заданого поля і запропонованим самоузгодженим підходом при розв'язанні задачі генерації третьої гармоніки на нелінійній тришаруватій структурі, показало, що хоча наближення заданого поля і дозволяє оцінити без істотних обчислювальних витрат основні радіаційні характеристики структури, яка досліджується, до наближеного поля не може бути застосована така важлива фізична характеристика як баланс енергії. На відміну від наближення заданого поля, запропонований самоузгоджений підхід позбавлений цього фізичного протиріччя. Це є *суттєвий предмет наукової новизни роботи*.

У **третьому розділі** запропоновано метод дослідження спектральних задач з індукованою на частоті випромінювання (розсіяння і генерації) проникливістю діелектричного шару. Лінеаризація нелінійних задач та їх аналітичне продовження в область комплексних значень частотного параметра дозволяє перейти до аналізу спектральних задач, а саме до відшукування власних частот і відповідних їм нетривіальних рішень однорідних лінійних задач для шарів з індукованою діелектричною проникливістю.

Нетривіальні розв'язки цих спектральних задач дозволяють записати електричні компоненти власного поля в аналітичній формі. А власні частоти, тобто характеристичні числа лінеаризованої задачі, знаходяться в процесі розв'язання відповідних дисперсійних рівнянь із застосуванням методу Ньютона або його модифікацій. Відносна добротність власних коливань розглядається як відношення добротності поля власного коливання на частоті розсіяння до добротності поля власного коливання на частоті генерації при частоті збудження.

На основі аналізу динаміки випромінювання нелінійних шаруватих структур і відповідної поведінки характеристичних чисел індукованих спектральних задач проведено аналіз резонансних енергетичних процесів розсіяння і генерації хвиль нелінійними об'єктами. Показано, що зі збільшенням амплітуди падаючого поля зростанню енергії генерації відповідають ділянки монотонності функції відносної

добротності власних коливань. При цьому суттєвій приріст енергії генерації спостерігається в області монотонного зменшення цієї функції.

У **четвертому розділі** наведено результати моделювання запропонованих у роботі методів. Зокрема, на прикладі задачі розсіювання і генерації хвиль поля третьої гармоніки нелінійної шаруватої структури проведено реалізацію методу чисельного аналізу резонансних енергетичних властивостей випромінювання. Для цього використано розв'язки відповідних матричних рівнянь, що отримані із застосуванням квадратурних формул відповідно до систем нелінійних інтегральних рівнянь Гаммерштейна (при аналізі випромінювання хвиль) і до лінійних однорідних інтегральних рівнянь Фредгольма другого роду (при визначенні власних частот індукованих спектральних задач), на резонансних частотах нелінійної структури.

Згідно з результатами моделювання нерегулярна динаміка резонансних процесів розсіювання/генерації хвиль спостерігається поблизу власних частот досліджуваного об'єкта. Проведено детальний аналіз властивостей випромінювання в області резонансних частот структури.

Коректність отриманих числових результатів забезпечується співпадінням обчислень проведених методами Сімпсона і Уеддла.

Встановлено, що алгоритм самоузгодженого розв'язання задачі розсіювання, побудований з використанням квадратурних формул Уеддла для систем рівнянь 121 порядку, більш чутливий до похибок обчислень, ніж той же алгоритм, реалізований за допомогою квадратурних формул Сімпсона для систем 301 порядку. При такому співвідношенні точок колокації втрата в точності розв'язку методом Уеддла не більша однієї значущої цифри в порівнянні з методом Сімпсона. Це відкриває перспективи розв'язання низки нових нелінійних задач резонансного розсіювання і генерації хвиль структурами з нелінійним розподілом діелектричної проникності.

Досліджено обумовленість матриць, що описують як наведені власні частоти, так і резонансні багаточастотні хвильові процеси випромінювання нелінійною шаруватою структурою. Це встановлює непрямий критерій для тестування виродження матриць у точках спектра і дає можливість оцінити чутливість до обчислювальних помилок запропонованого методу, а також дослідити поведінку хвильових процесів в області резонансних частот.

На основі проведених числових розрахунків виявлено низку нових фізичних ефектів, зокрема, показано, що ефект зменшення прозорості нелінійної шаруватої структури при резонансному збудженні є наслідком енергообміну, який витрачається на генерацію вищих гармонік.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, їх достовірність

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів, отриманих в дисертації, підтверджується використанням апробованих в електродинаміці підходів розв'язання електродинамічних задач розсіювання нелійними структурами, які ґрунтуються на використанні рівнянь Максвелла з аналітично коректним переходом до системи граничних задач щодо комплексних амплітуд Фур'є повних полів розсіювання і генерації. Достовірність отриманих результатів підтверджується також співпадінням теоретичних висновків з результатами числових розрахунків. Частина результатів отримана шляхом порівняння двох числових методів інтегрування, що також

підтверджує адекватність вибраної моделі і коректність застосування числових процедур.

Новизна наукових положень дисертаційної роботи

Робота присвячена дослідженню властивостей розсіяння та генерації кубічно поляризованих шаруватих структур, які збуджуються сильним електромагнітним полем, зокрема, отримано нові оригінальні результати для тришарової структури із знакозмінною кубічною сприйнятливістю середовища та одношарову структуру з додатною кубічною сприйнятливістю середовища.

У процесі розв'язання науково-технічного завдання, яке було поставлене в роботі, виходячи з її мети, автором було отримано низку нових науково-технічних результатів, серед яких, на мій погляд, найважливішими є:

1. Самоузгоджений метод аналізу системи нелінійних граничних задач, що зводиться до розв'язання еквівалентної системи нелінійних інтегральних рівнянь. На відміну від існуючих методів, він дозволяє провести аналіз характеристик розсіювання і генерації хвиль нелінійними структурами та оцінити коректність отриманих результатів на основі критерію балансу енергії.

2. На основі метод аналізу спектральних задач з індукованою діелектричною проникністю нелінійного шару встановлено, що для нелінійних шарів на частотах збудження і генерації, близьких до власних частот, збільшення енергії з ростом амплітуди падаючого поля супроводжується монотонним зменшенням величини відносної добротності власних коливань, що дозволяє прогнозувати зони максимальної генерації енергії;

3. Проведений числовий аналіз резонансних властивостей розсіяння і генерації хвиль нелінійними шаровими структурами дозволяє за резонансні частоти збудження вибирати величини, які визначаються дійсною частиною комплексних власних частот індукованих спектральних задач, що суттєво спрощує аналіз резонансних процесів розсіяння та генерації коливань.

Практичне значення одержаних результатів

В дисертаційній роботі розроблено моделі і методи аналізу електродинамічних властивостей нелінійних шаруватих структур з керованою діелектричною проникністю та запропоновано ефективні алгоритми їх числового аналізу.

Результати проведених досліджень дозволили виявити нові фізичні закономірності, що вказують на можливість підвищення багатofункціональності електронних приладів; проектування множників частоти і інших електродинамічних пристроїв, що містять нелінійні діелектрики. Практичне значення результатів підтверджується їх впровадженням. Розроблені в дисертаційній роботі математичні моделі та методи використано у відділі теорії дифракції та дифракційної електроніки ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАНУ при проведенні науково-дослідних робіт зі створення електродинамічних засобів генерації, посилення, детектування та розповсюдження терагерцового випромінювання, а також в навчальному процесі при підготовці аспірантів Інституту. Частину результатів отримано в процесі виконання міжнародних проектів, що проводились спільно НАН України та науковими установами Німеччини і Швеції.

Основні результати роботи опубліковано в 26 працях, з них 16 індексуються в наукометричних базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, та працях

22 Міжнародних науково-технічних конференцій. Це в першу чергу такі престижні неукові конференції як UWBUSIS (2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 pp.), DIPED (2010, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 pp.), Workshop on Large-Scale Modeling (2012), “Days on Diffraction” (2012, 2015, 2016 pp.), PIERS (2012), DSMMPH (2015, 2017 pp.), MSMW (2016 p.), IEEE UKRCON (2017, 2019 pp.).

В загальному, матеріали дисертації повно викладені у 33 роботах: з них 7 статей (1 розділ в закордонній монографії, 2 статті у міжнародних наукових періодичних виданнях, 2 статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з технічних наук, 2 статті у міжнародних наукових періодичних виданнях) та 26 матеріалів тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Основні наукові положення і висновки, які представлені в дисертації та авторефераті, ідентичні між собою. Автореферат відображає актуальність роботи, зміст і суть одержаних наукових результатів, їх практичне значення, детально виокремлює особистий внесок здобувача та демонструє широку апробацію результатів. Дисертаційна робота та автореферат оформлені відповідно до вимог МОН України. Виклад матеріалу дисертації супроводжується необхідними посиланнями на першоджерела. Дисертація та автореферат викладені літературною українською мовою, на високому професійному рівні. Основні теоретичні та прикладні положення і результати коректно та логічно сформульовано і подано у зрозумілій формі. Разом з тим до роботи є низка зауважень.

Зауваження

1. Практичне значення роботи (ст. 31) висвітлено неповно, замість конкретних результатів декларуються положення, які частково перекликаються з науковою новизною. В роботі отримано низку важливих практичних результатів, про які тут не згадується.

2. На мій погляд, недоцільно наводити перелік праць міжнародних конференцій в апробації результатів дисертації (ст. 33-34 дисертації), адже вони вже викладені попередньо. Це саме стосується завдань, які необхідно виконати в роботі (ст. 56), бо вони перераховані на ст. 28.

3. На ст. 41 одержано хвильове рівняння (1.11), яке пов'язує електричну компоненту ЕМ поля, вектор електричного зміщення та вектор поляризованості. Автор стверджує, що це рівняння нелінійне, але природа його нелінійності з'ясовується лише на ст. 44.

4. На ст. 44 вводиться поняття кубічної поляризованості, але воно не пояснюється з фізичної точки зору. Тут це варто було би зробити, оскільки це є вступний розділ. Те саме стосується генерації третьої гармоніки (підрозділ 1.3, ст. 46).

5 Система (2.8) для визначення складових компонент електричного поля нелінійна, тому важливе значення для отримання того чи іншого типу розв'язку має вибір початкового наближення. Але автор не пояснює з яких міркувань були вибрані початкові наближення на стор. 71 для системи (2.8). Аналогічні питання виникають і для системи (4.1), хоча там область початкового наближення окреслена.

6 Рисунки 2.4, 3.8, 3.11, 3.13, 3.16, 3.18 4.3, 4.4, 4.6 перевантажені сукупністю даних, що затрудняє їх ефективний аналіз.

7 В тексті дисертації виявлено низку описок, стилістичних та орфографічних помилок і неточностей. Зокрема, неправильними є слова “шарові” і “поляризуємість” – має бути “шаруваті” і “поляризованість” – по всьому тексту роботи; словосполучення

“індукованих полем падаючого поля” (ст. 3) є недоречним; звороти “розробити обчислювальні моделі аналізу” (ст. 28), “удосконалено обчислювальні моделі аналізу” (ст. 30) – некоректні – обчислювальними є методи, а не моделі; вживається словосполучення “поза шару” замість “поза шаром” – по всьому тексті роботи; “уявлення для лінійної частини” – по всьому тексті роботи – є неправильним, має бути “подання, зображення, форма”; “в поперек” неоднорідному нелінійному діелектричному шарі” (по всьому тексті роботи) – потрібно вживати “в поперечному”; Абсолютне значення “істинних” величин (ст. 54) – має бути “дійсних”; Умова 2.3 – умова “безперервності” (ст. 60) – має бути “неперервності”; систему нелінійних “інтегрованих” рівнянь (2.6) (ст. 63) – має бути “інтегральних”; У “численних” експериментах (ст. 75) – має бути “числових”; Здійснено “моделювання” запропонованих в роботі методів (ст. 168) – має бути “апробацію, перевірку”.

Вищевказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість і не знижують загальної позитивної оцінки проведеного обсягу досліджень.

Висновок

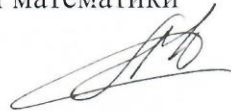
Дисертаційна робота Яцика М. В. “Моделі та обчислювальні методи дослідження нелінійних шарових електродинамічних структур ” є оригінальною і завершеною науково дослідною роботою в якій розв’язано важливе науково-технічне завдання побудови математичних методів аналізу нелінійних шаруватих електродинамічних структур у резонансному діапазоні частот на основі розв’язання фізично обґрунтованих граничних задач математичної фізики, а також розробки ефективних обчислювальних методів і алгоритмів розв’язання задач розсіяння і генерації хвиль.

Робота відповідає вимогам паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (п.п. 1, 4, розд. II).

За актуальністю теми, обсягом проведених досліджень, їх новизною, теоретичним і практичним значенням дана дисертаційна робота повністю відповідає вимогам МОН України, зокрема п. п. 9, 10, 12, 13, 14 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., щодо кандидатських дисертацій за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а її автор, Яцик Микола Васильович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент:

завідувач відділу числових методів математичної фізики
Інституту прикладних проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України,
доктор технічних наук, ст. н. сп.



Андрійчук М. І.

23 квітня 2021 р.

Підпис Андрійчука М. І.
з а в і д ч у ю
Вчений секретар ІППММ
ім. Я.С.Підстригача НАНУ
03.Кравченко

