

Л.В. КАРПОВА¹, О.О. БОЙКО

Хмельницький національний університет

І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ

Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького

МОДЕЛЮВАННЯ НВЧ ПРИСТРОЇВ І АНТЕН В ЗАДАЧАХ ЇХ АНАЛІЗУ, СИНТЕЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ

В статті узагальнено основні сучасні методи та засоби електродинамічного моделювання НВЧ структур і антен. Наведено узагальнений аналіз різних систем імітаційного моделювання. Запропоновано моделі та алгоритми імітаційного моделювання елементів трактів НВЧ та випромінюючих структур, альтернативних натурним лабораторним експериментам.

Ключові слова: електродинамічні задачі, надвисокі частоти, антени, моделювання, імітаційне моделювання, програми, чисельні методи.

L. V. KARPOVA, O. O. BOYKO

Khmelnitskyi National University

I. I. CHESANOVSKYY

National Academy of State Borderguard service of Ukraine named after B. Khmelnytskyi

MODELLING OF MICROWAVE DEVICES AND ANTENNAS IN THE PROBLEMS OF THEIR ANALYSIS, SYNTHESIS AND OPTIMIZATION

At the present stage of development of the radio engineering field, simulation modelling, considering the availability of a wide range of instruments for its implementation, virtually displaces full-scale experiments in the laboratory practice of the educational process and scientific research. The range of modern simulation tools for radio engineering tasks includes a large number of different purpose, computational and mathematical basis of systems, which combined with the rapidly increasing computing power of electronic computers make it possible not only to perform calculations of any external complexity and complexity. conditions. The article summarizes the basic modern methods and means of electrodynamic modelling of microwave structures and antennas. The generalized analysis of different simulation systems is presented. Models and algorithms for simulation of elements of microwave tracts and radiating structures alternative to full-scale laboratory experiments are proposed. The purpose of this article is to provide a comparative assessment of modern microwave simulation systems and radiating structures and to summarize the methods of numerical solution of electrodynamic problems used in modern electrodynamic modelling systems.

Keywords: electrodynamic problems, ultra high frequencies, antennas, simulation, simulation modelling, programs, numerical methods.

Вступ. На сучасному етапі розвитку радіотехнічної галузі імітаційне моделювання, враховуючи доступність широкого класу інструментів його здійснення, практично витісняє натурні експерименти в лабораторній практиці освітнього процесу і наукових досліджень. Спектр сучасних інструментів імітаційного моделювання радіотехнічних задач включає велику кількість різних за призначенням, обчислювальною і математичною основою систем, що в поєднанні з стрімко зростаючою обчислювальною потужністю електронно-обчислювальних машин дають змогу не тільки проводити розрахунки будь-якої складності а і враховувати цілі комплекси зовнішніх і внутрішніх умов. Така гнучкість, оперативність а в деяких випадках і достовірність є недоступною для натурального лабораторного експерименту, особливо в задачах дослідження НВЧ і випромінюючих структур, що робить системи імітаційного моделювання в даній галузі основним інструментом лабораторних досліджень.

Метою даної статті є порівняльна оцінка сучасних систем імітаційного моделювання НВЧ та випромінюючих структур і узагальнення методів чисельного розв'язку електродинамічних задач, що використовуються в сучасних системах електродинамічного моделювання.

Для розв'язку задачі електромагнітного поля існують різні підходи, які зводяться до аналітичного або чисельного розв'язку відповідних інтегральних або диференціальних рівнянь в частотній або часовій області [8]. Аналітичні розв'язки точні, але можуть бути отримані лише для обмеженого кола простих структур. Чисельні розв'язки наближені, але можуть бути успішно застосовані для довільних структур. При цьому, незважаючи на те, що вони можуть давати результат лише із певною точністю, в більшості практичних задач цього цілком достатньо. На рис. 1 наведено класифікацію методів розв'язку рівнянь Максвелла, що широко використовуються на практиці.

В основі усіх сучасних систем імітаційного моделювання покладено числові методи розв'язку задач, які, хоча і відрізняються базовими підходами до знаходження розв'язку, проте дають змогу аналізувати пристрої різної складності як у частотній, так і в часовій (просторовій) області. Враховуючи обчислювальні потужності сучасних ЕОМ, для кожного типу пристрою можна підібрати і реалізувати чисельний метод, який для конкретних умов забезпечить найшвидший розрахунок його електродинамічних характеристик із заданою якістю (точністю, частотною чи просторовою деталізацією, тощо).



Рис. 1. Класифікація методів розв'язку рівнянь Максвелла

Одними з найпоширеніших методів чисельного аналізу, що застосовуються в системах імітаційного моделювання НВЧ пристроїв і антен є метод моментів, метод скінченних елементів, метод скінченних різниць у часовій області і метод ліній передач [7, 8].

Сутність застосування даних методів, стосовно прямої задачі електродинаміки, яка полягає у знаходженні розподілу полів і струмів при відомій геометрії електродинамічної структури і заданих параметрах середовища. За такої постановки задачі вихідними для моделювання електромагнітних полів є рівняння Максвелла з урахуванням відповідних граничних умов. Теоретично, за будь-якої складності, дана задача має аналітичний розв'язок, що в багатьох випадках може бути знайдений і з використанням засобів автоматизації, проте такий підхід є недоцільним, оскільки в практичних задачах, в тому числі і лабораторних дослідженнях НВЧ пристроїв і антен точність розв'язку є умовною (мінімально достатньою для процедури апроксимації). Виходячи з цього, значну увагу в прикладній електродинаміці приділяють саме чисельним методам розв'язку, які є відносно простими в дискретних алгоритмах обчислень і здатні забезпечити необхідну достовірність результатів.

Із широкого спектру математичних методів моделювання, які використовуються в сучасних програмних системах можна виділити цілу низку методів, що стали основою, або безпосередньо використовуються для чисельних розрахунків.

Метод моментів (МоМ – Method of Moments). При аналізі моделей за допомогою методу моментів загальний підхід до задач поширення та випромінювання електромагнітних хвиль полягає в зведенні отриманих інтегральних рівнянь до системи лінійних алгебраїчних рівнянь з M невідомими, які є коефіцієнтами певного розкладання для струму або поля за відомими функціями. Суть методу полягає в наступному: область, для якої шукається розв'язок, розбивається на скінчену кількість елементів, зі своїми (довільними) апроксимуючими функціями. Із цих функцій, з певними коефіцієнтами, утворюється система рівнянь для якої справедливими є виконання наступних умов: за межами елементів апроксимуюча функція рівна нулю; на границі двох елементів значення апроксимуючих функцій однакові. Процедура знаходження невідомих коефіцієнтів визначається геометрією структури, для якої проводиться розрахунок, а це вимагає додаткового аналізу вихідних умов, що відноситься до недоліків даного методу, при цьому, немає необхідності задання граничних умов, що відноситься до переваг методу.

Метод скінченних елементів (FEM – Finite Element Method)) практично позбавлений цього недоліку, оскільки при формуванні розв'язку геометрія враховується розмірами ділянок розбиття – чим складніша (дрібніша) геометрія поверхні, тим мілкіші ділянки (об'єми) розбиття і навпаки. Такий підхід дає змогу значно оптимізувати чисельні розрахунки завдяки адаптації точності обчислень в різних місцях електродинамічної структури. Даний метод показує свою ефективність у розрахунках різноманітних хвилеводних структур, при застосуванні абсорбуючих граничних умов, для розрахунку різноманітних антен та задач розсіювання.

Гібридні методи. Для вирішення специфічних задач були розроблені і застосовуються ряд гібридних методів, що ґрунтуються на базових принципах методу моментів і методу скінченних елементів. MLFMM (Multilevel Fast Multipole Method) – багаторівневий метод моментів, заснований на швидкому алгоритмі розрахунку. PO (Physical Optics) – Метод фізичної оптики використовується у випадку розрахунку електрично-великих площ або діелектричних структур. Це класичний метод наближеного розв'язку електродинамічних задач, який також називається методом Кірхгофа. В межах цього методу задача пошуку струмів на металевих поверхнях виключається, а струм приблизно обчислюється через магнітне поле падаючої на об'єкт хвилі. МоМ/PO – гібридний метод Моментів/Фізичної оптики. Метод геометричної оптики (GO – Geometrical Optic) заснований на техніці розповсюдження променя, при якій моделі об'єктів розраховуються на основі розповсюдження, заломлення і віддзеркалення оптичного променя. Гібридний метод Моментів/Геометричної оптики (МоМ/GO).

Метод однорідної теорії дифракції (UTD – Uniform Theory of Diffraction) є сучасним методом наближеного розв'язку задач розсіювання хвиль на великих об'єктах. Поверхня представляється набором плоских багатокутників, які мають спільні ребра. Поле, розсіяне багатокутником, ділиться на дві складові: геометро-оптична, утворена плоскою поверхнею і поле, що утворюється ребрами. МоМ/UTD – гібридний

метод Моментів/однорідної теорії дифракції.

Метод геометричної теорії дифракції GTD (Geometrical Theory of Diffraction). Хвильове поле представляється в вигляді суми полів променевого типу, при цьому дифракційна задача зводиться до визначення амплітуд і фаз квазіпроменевих полів із граничних умов. Генерація полів променевого типу відбувається на границях розділення середовищ і на границях «світло-тінь».

Розглянуті методи, в задачах аналізу поля випромінювання антен і розподілу енергії в НВЧ структурах не завжди є зручними, оскільки, у випадку частотного аналізу, розрахунки необхідно повторювати для кожної із частот в частотному діапазоні, для якого проводиться аналіз. Для розв'язку такого типу задач зручнішими є методи, що ґрунтуються на аналізі у часовій області. При їх застосуванні, можливо отримати характеристики пристрою відразу у всій смузі частот шляхом застосування перетворення Фур'є до часового відгуку системи.

Одним із найбільш популярних методів аналізу у часовій області є метод скінченних різниць, що застосовується для розв'язку різноманітних задач електродинаміки. Враховуючи, що аналіз проводиться у часовій області, шляхом застосування імпульсів різної форми, з використанням даного методу можна проводити дослідження пристроїв із різною робочою смугою частот. Частотні характеристики, при цьому, отримуються шляхом застосування дискретного перетворення Фур'є до часового відгуку системи.

Метод скінчених інтегралів FIT (Finite Intergation Technique) є одним із найпотужніших інструментів чисельного моделювання широкого спектру структур по трьох основних причинах: по-перше, цей метод може бути застосований у всьому частотному діапазоні, від постійного струму до високих частот. По-друге, даний метод легко застосовується до електрично складних конструкцій. По-третє, метод скінчених інтегралів підходить не тільки для будь-якого типу решіток, але й використовує різні способи дискретизації при моделюванні. Даний метод відрізняється своєю універсальністю, оскільки може бути реалізований як у часовий, так і в частотній області моделювання, а також не накладає обмежень на тип сітки дискретизації простору.

Одним із розповсюджених методів часового аналізу НВЧ пристроїв і антен є метод лінії передач (MTL – Method of Telegraph Lines), який базується на аналогії між поширенням електромагнітних хвиль і поширенням електричних імпульсів у лініях передачі та дуже схожий за можливостями до методу скінченних різниць у часовій області. Даний метод потребує більше обчислювальних затрат, проте при розв'язанні задач, де має місце складна геометрія, дає кращі результати.

Таблиця 1

Чисельні методи аналізу та прикладні програми, в яких вони застосовуються

№ з/п	Чисельний метод	Система моделювання
1	Метод моментів МоМ (Method of Moments)	FEKO, HFSS, MMANA, EDF-EME
2	Метод скінченних елементів FEM (Finite Element Method)	FEKO, HFSS, CST MWS, EMPro
3	Гібридний метод моментів/скінченних елементів МоМ/FEM	FEKO, ANSYS HFSS
4	Багаторівневий метод моментів MLFMM (Multilevel Fast Multipole Method)	FEKO, EDF-EME
5	Метод фізичної оптики PO (Physical Optics)	FEKO, HFSS, Emit (SES), Savant (SES), XGtd, EDF-EME
6	Гібридний метод Моментів/Фізичної оптики МоМ/PO	FEKO, EDF-EME
7	Метод геометричної оптики GO (Geometrical Optic)	Emit (SES), Savant (SES), XGtd
8	Гібридний метод Моментів/Геометричної оптики МоМ/GO	FEKO
9	Метод однорідної теорії дифракції UTD (Unitform Theory of Diffraction)	FEKO, HFSS, Emit (SES), Savant (SES), XGtd, EDF-EME
10	Гібридний метод Моментів/однорідної теорії дифракції МоМ/UTD	FEKO, EDF-EME
11	Метод геометричної теорії дифракції GTD (Geometrical Theory of Diffraction)	EDF-EME
12	Метод скінченних різниць в часовій області FDTD (Finite Difference Time Domain)	FEKO, CST MWS, ANSYS HFSS, EMPro
13	Метод скінченних інтегралів FIT (Finite Intergation Technique)	CST MWS, ANTENNA MAGUS
14	Дискретний метод Гальоркіна DGTD (Discontinuous Galerkin Time Domain)	ANSYS HFSS
15	Метод ідеального граничного наближення PBA (Perfect Boundary Approximation)	CST MWS
16	Метод інтегральних рівнянь FE-BI (Intergal Eguation Method Solve)	ANSYS HFSS
17	Метод падаючого і віддзеркаленого променів SBR (Shooting and Bouncing Ray)	Signa (SES)
18	Метод еквівалентних струмів MEC (Method of Equivalent Currents)	XGtd
19	Метод фізичної теорії дифракції PTD (Physical Theory of Diffraction)	EDF-EME
20	Метод інструментальної теорії дифракції ITD (Instrumental Theory of Diffraction)	EDF-EME

Додатково можна виділити ще ряд методів, що застосовуються для розв'язку специфічних задач: дискретний метод Гальоркіна (DGTD – Discontinuous Galerkin Time Domain), який застосовується для розв'язку задач з імпульсним джерелом збудження; ідеальне граничне наближення (PBA – Perfect Boundary

Approximation), що застосовується як метод апроксимації для ідеальних граничних умов, для поліпшення моделювання об'ємних структур довільної геометричної форми; метод інтегральних рівнянь (FE-BI – Intergal Eguation Method Solve); метод падаючого і відбитого променів (SBR – Shootingand Bouncing Ray); метод еквівалентних струмів (MEC – Method of Equivalent Currents); метод на основі фізичної теорії дифракції (PTD – Physical Theory of Diffraction); інструментальна теорія дифракції (ITD – Instrumental Theory of Diffraction); метод допоміжних джерел (MAS – Method of Auxilaru Sources).

В табл. 1 наведено перелік методів чисельного розв'язку електродинамічних задач та прикладних програм моделювання НВЧ пристроїв і антен, в яких вони застосовуються.

На рис. 2 наведена графічна ілюстрація інтенсивності застосування різних методів чисельного аналізу в прикладних програмах моделювання НВЧ структур та антен.

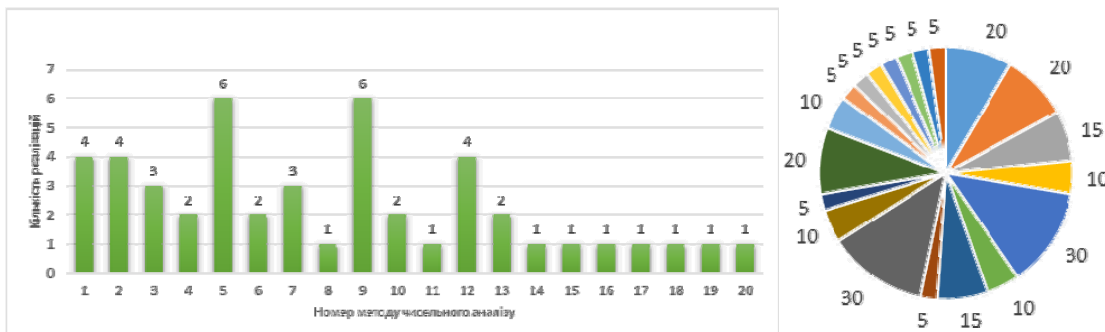


Рис. 2. Діаграма інтенсивності застосування методів чисельного аналізу в прикладних програмах моделювання

З наведених даних можна дійти висновку, що певні підходи більш популярні за інші, проте, це хибна думка. Хоча всі без винятку програми електродинамічного моделювання мають свою практичну спрямованість, в них інтегруються додаткові засоби візуалізації результатів, для отримання яких більш зручними є певні методи. При цьому, обчислювальне ядро системи будується на методі чисельного аналізу, який є найбільш ефективним для класу задач, для розв'язку яких розробляється система.

Для підтвердження цього, варто розглянути функціональні можливості сучасних програм моделювання НВЧ структур і антен.

FEKO (FEldberechnungbeiKorpernmitbeliebigerOberflache) призначена для проведення розрахунку електромагнітного поля тіл довільної форми (рис. 3) [2, 11].

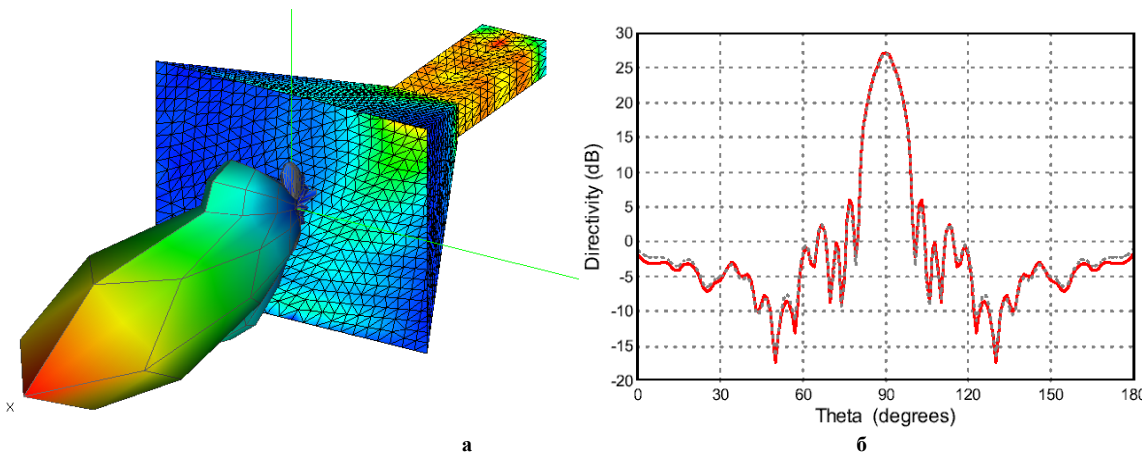


Рис. 3. Візуалізація результатів моделювання рупорної антени в системі моделювання FEKO

Дає змогу проводити аналіз випромінювання широкого класу антен (рупорних, мікросмужкових, дрових, рефлекторних, конформних, широкодіапазонних антен і антенних решіток), включаючи розрахунок і аналіз діаграм спрямованості, небезпечних зон випромінювання, параметрів і характеристик антен, розташованих на об'єктах складної форми (кораблях, літаках, бронемашинах, тощо). Аналіз електромагнітної сумісності, включаючи ефективність екранування, міжкабельне проходження сигналів за складних граничних умов, аналіз шкідливих факторів електромагнітного випромінювання. Система включає широкий набір інструментів радіочастотного аналізу НВЧ компонентів: аналіз хвильових структур, зокрема, фільтрів, щілинних антен, спрямованих відгалужувачів; аналіз трьохмірних електромагнітних кіл: мікросмужкових фільтрів, відгалужувачів, індукторів.

Дана система, завдяки своїй зручності та широкому спектру задач, що розв'язуються, знайшла широке застосування в лабораторних практикумах з дисциплін, що спрямованні на вивчення НВЧ техніки і антен.

ANSYS HFSS (High Frequency System Simulator). Пакет програм для тривимірного

електромагнітного моделювання і розробки височастотних радіоелектронних і антенних пристроїв [6, 11]. На рис. 4 представлено візуалізацію результатів розрахунків рупорної антени в програмі ANSYS HFSS.

До основних можливостей ANSYS HFSS можна віднести моделювання тривимірного електромагнітного поля довільних провідних і випромінюючих структур, розрахунок матричних параметрів НВЧ структури (S, Y, Z матриці), розрахунок коефіцієнту стоячої хвилі (КСХ) в задачах аналізу ліній передач, розрахунок параметрів випромінювання і розсіювання (діаграми спрямованості, коефіцієнти спрямованої дії, підсилення антен, ЕПР тощо). Дана програма має широкий набір інструментів візуалізації результатів аналізу у вигляді 3D розподілу струмів, векторів щільності потоку потужності, розподілів електромагнітних полів (у близькій і далекій зонах).

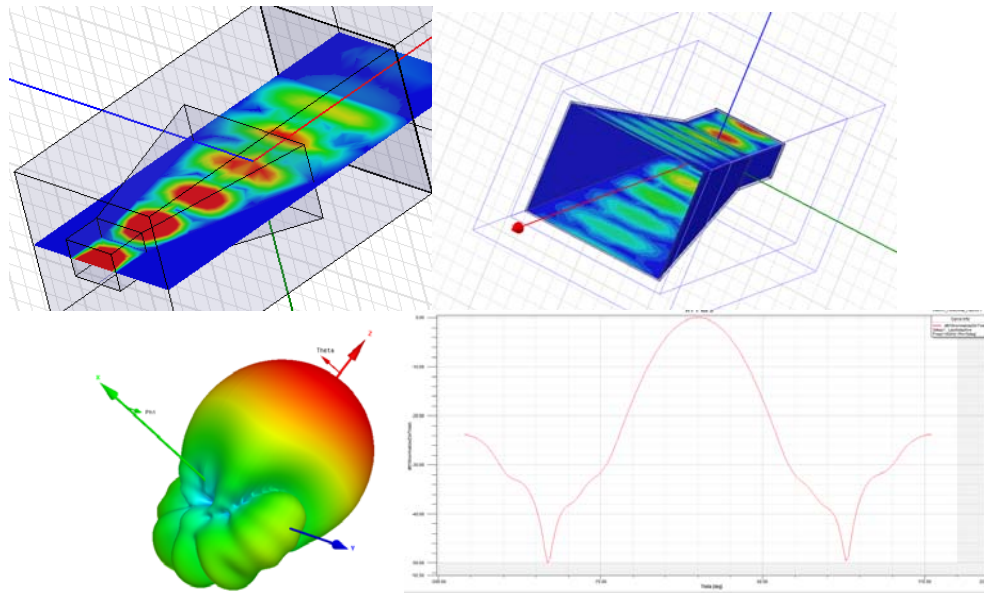


Рис. 4. Візуалізація результатів моделювання рупорної антени в системі моделювання ANSYS HFSS

Однією з вагомих переваг даної програми, є можливість використання різних плагінів-конструкторів [9], що значно спрощує процес створення моделей. Як приклад, на рис. 5 наведено інтерфейс програми HFSS Antenna Design Kit, використання якої дає змогу без значних зусиль створювати геометрію великої кількості антен для подальшого моделювання в ANSYS HFSS.

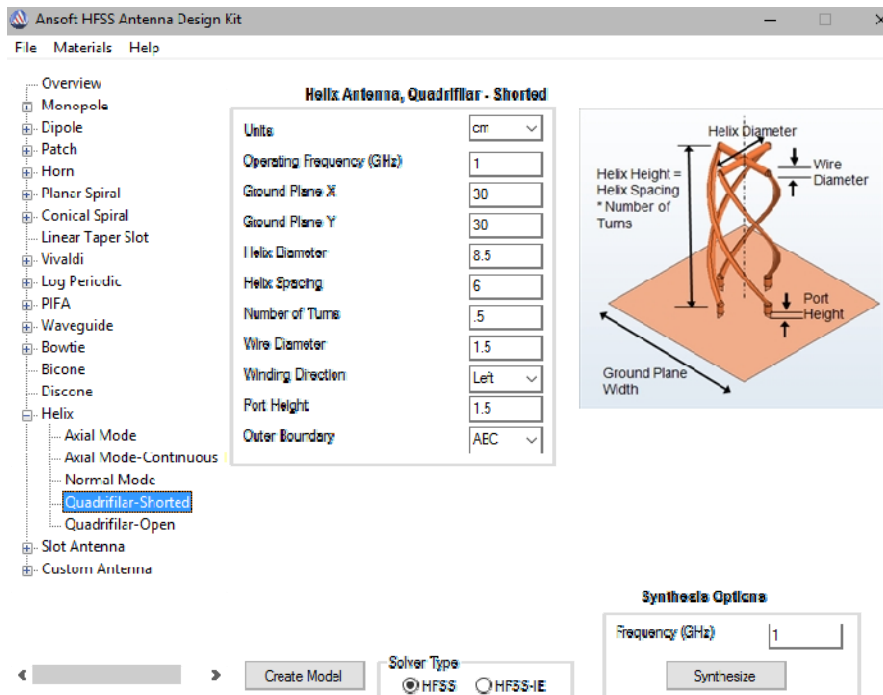


Рис. 5. Інтерфейс програми HFSS Antenna Design Kit

μ WaveWizard поєднує в собі гнучкість 2D/3D методу скінченних елементів з швидкістю і точністю традиційних методів узгодження мод. Простий процес складання складних НВЧ-структур з використанням основних блоків виключає необхідність створення повної 3D моделі всієї структури і прискорює процес

проекування [3]. На рис. 6 наведено приклад моделювання НВЧ фільтру та його результати у вигляді амплітудно-частотної характеристики.

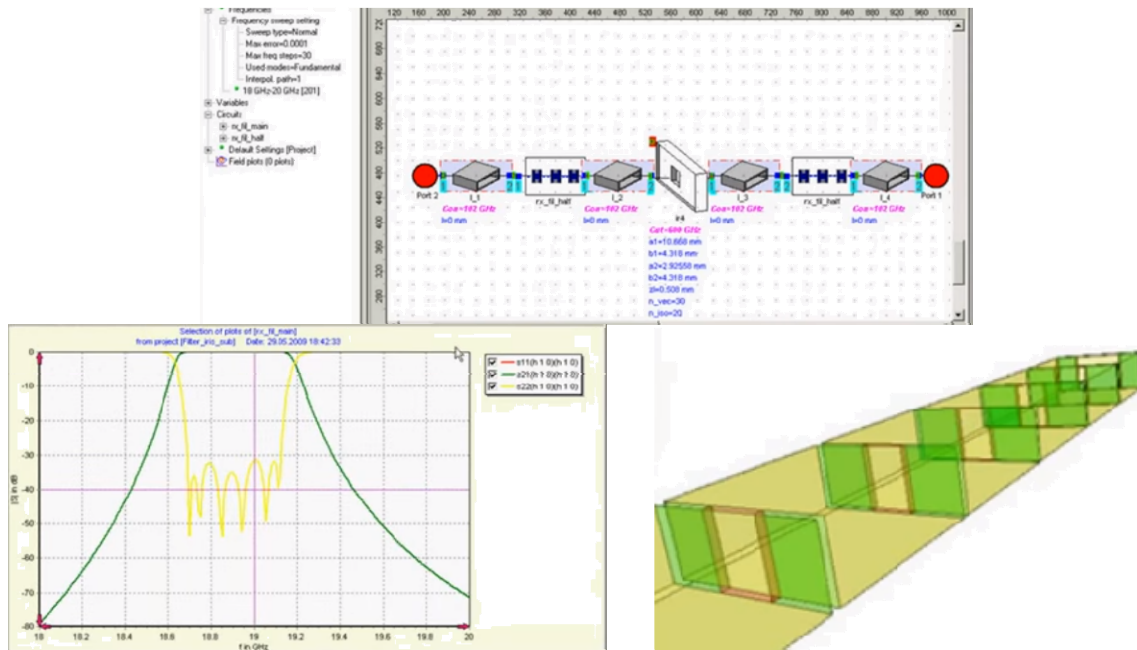


Рис. 6. Моделювання НВЧ фільтру

MMANA (Macato Mori Antenna Analyzer). За допомогою MMANA можливі розрахунки і аналіз антен (рис. 7), реалізованих як довільний набір тонких провідів заданого діаметра.

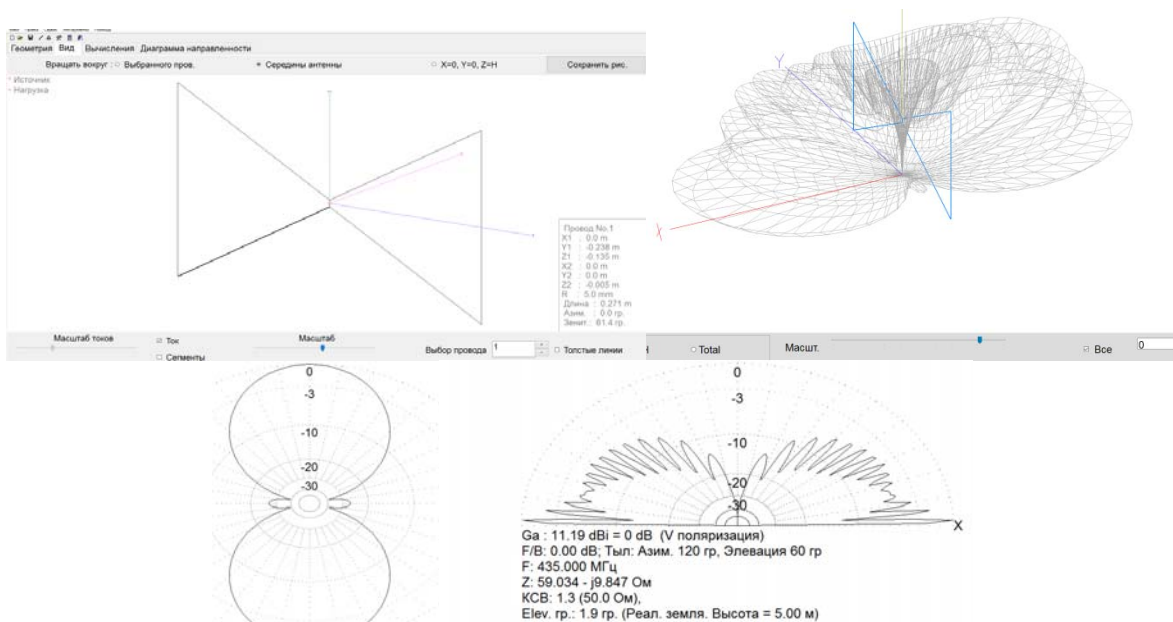


Рис. 7. Результати моделювання антени в програмі MMANA

Програма дає змогу створювати і редагувати конструкцію антени з відрізків заданої товщини, розраховувати діаграми спрямованості антен у вертикальній і горизонтальній площинах, одночасно порівнювати результати моделювання декількох антен, редагувати конструкцію кожного елемента антени, включаючи можливість змінювати форму елемента без зміни його резонансної частоти. За допомогою програми можна здійснювати автоматичну оптимізацію антени, гнучко налаштовуючи $Z_{вх}$, КСХ, підсилення, мінімум вертикального кута випромінювання, відображаючи ці параметри у вигляді графіків, зберігати всі кроки оптимізації у вигляді окремої таблиці. Також програма дає змогу автоматично розраховувати кілька типів узгоджувальних пристроїв, виконувати розрахунки котушок, контурів, узгоджувальних пристроїв на LC елементах, узгоджувальних пристроїв на відрізках довгих ліній, індуктивності і ємності, а також виконаних з відрізків коаксіального кабелю.

Sonnet Suites. Пакет програм Sonnet Suites призначений для електромагнітного моделювання планарних НВЧ структур [4]: смужкових і мікросмужкових ліній, копланарних хвилеводів, одно-

багатошарових друкованих плат, що включають перехідні отвори різних конфігурацій, вертикальних мікросмужкових ліній, а також антен.

CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS). Призначена для чисельного моделювання тривимірних високочастотних пристроїв (антен, фільтрів, відгалужувачів, планарних багатошарових структур) [10].

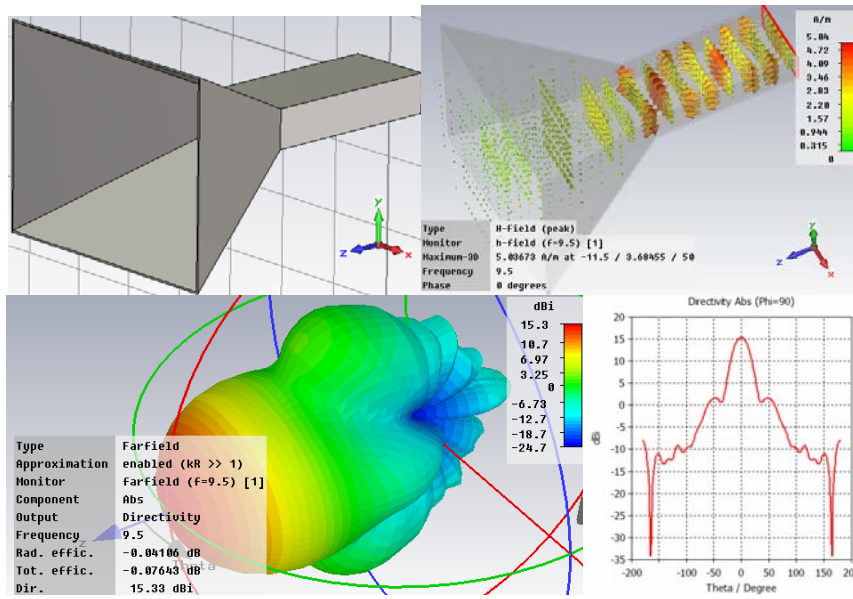


Рис. 8. Результати моделювання антени в програмі CST MWS

Дана програма (рис. 8) дає змогу моделювати хвилеводи, хвилеводні і мікросмужкові направлені відгалужувачі потужності, дільники і суматори потужності, хвилеводні, мікросмужкові і діелектричні фільтри, одно- і багатошарові мікросмужкові структури, лінії передачі, коаксіальні і багатовивідні з'єднувачі, коаксіально-хвилеводні коаксіально-смушкові переходи, оптичні хвилеводи і комутатори, різні типи антен: рупорні, спіральні, планарні тощо. На рис. 6 представлено результати моделювання рупорної антени.

AWR Microwave Office. Представляє собою універсальну систему моделювання всіх видів радіочастотних і НВЧ пристроїв, починаючи від складних НВЧ вузлів і закінчуючи інтегральними НВЧ мікросхемами [5].

Antenna Magus. Містить велику базу даних (рис. 9) по більш ніж 250 видах антенних і фідерних пристроїв, що розроблені за заданими параметрами підсилення, смуги пропускання і ширини діаграми спрямованості, причому для того або іншого параметра синтезується оптимальна конфігурація обраного виду пристрою [1].



Рис. 9. Інтерфейс програми Antenna Magus

Варто зазначити, що наявні моделі антен проходять випробування і процедуру верифікації для підтвердження їх коректності відповідно до широкого набору технічних вимог до антен. Програма дає можливість будувати 2D і 3D графіки електродинамічних характеристик, крім того, створену модель можна експортувати в програмне забезпечення Feko, CST MWS.

Electromagnetic Professional (EMPro). Програма платформа електромагнітного тривимірного моделювання призначена для аналізу об'ємних електромагнітних ефектів різних електронних компонентів, включаючи корпуси високошвидкісних і високочастотних мікросхем, з'єднувальні лінії, антени, внутрішньосхемні і зовнішні пасивні елементи, з'єднання друкованих плат.

Signa+Emit+Savant (SES). Singa – програмне забезпечення для аналізу в радіолокаційному діапазоні, забезпечує швидкий і точний прогноз для розрахунків полів у далекій зоні. Має можливість генерування

профілів дальності на основі виявлення істотних особливостей розсіювання. Emit – програмне забезпечення, призначене для аналізу електромагнітної сумісності радіоелектронних систем. Savant – програмне забезпечення, що вирішує завдання електромагнітної сумісності і електромагнітної безпеки.

XGtd. Призначена для високочастотного електромагнітного моделювання полів дальньої зони і параметрів розсіювання, аналізу електромагнітних випромінювань і перешкод, властивостей поглинаючих матеріалів на електрично-великих об'єктах. Програма дає змогу візуалізувати електромагнітні характеристики в 2D і 3D.

EDF-EME. Програмне середовище електромагнітного моделювання кораблів. Оперує тривимірною моделлю корабля. Дає змогу виконувати розрахунки не тільки електромагнітної обстановки і рівнів електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, але й проводити оцінку електромагнітної безпеки промислових і біологічних об'єктів, радіоелектронної помітності корабля, проводячи розрахунки його ефективної площі розсіювання, у тому числі з урахуванням впливу підстилаючої морської поверхні.

OptenniLab. Спеціалізоване програмне забезпечення (рис. 10), призначене для автоматичного синтезу кіл узгодження НВЧ пристроїв, оцінки максимально допустимої смуги робочих частот антен і розрахунків гіршого випадку розв'язки між декількома антенами в системі.

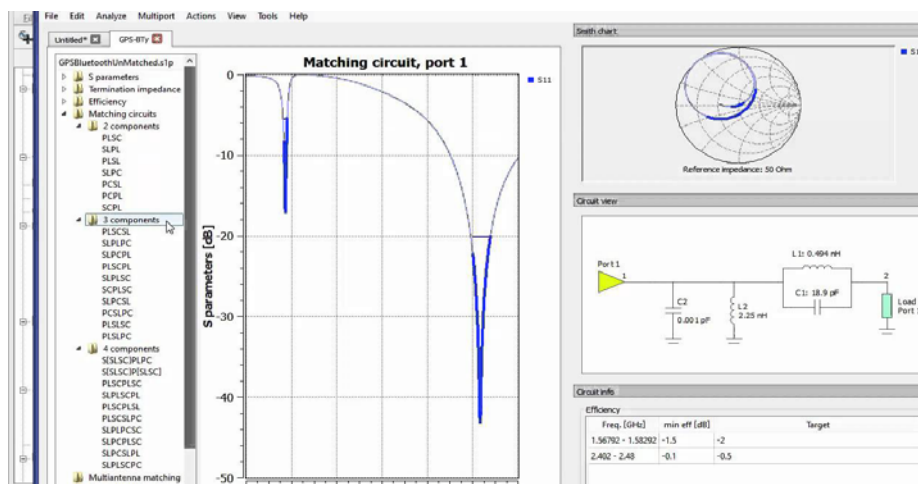


Рис. 10. Моделювання узгоджувального пристрою в програмі Optenni Lab

Висновки

В цілому можна підсумувати, що характер задачі визначає математичні методи, які найкраще підходять для розрахунків і обумовлює вибір середовища моделювання. На сьогоднішній день, спектр середовищ моделювання охоплює всі практичні задачі електродинамічного аналізу, в тому числі і задачі навчального характеру. Це далеко не повний перелік програм електродинамічного моделювання, оскільки існує ще велика кількість вузькоспеціалізованих систем побудованих на основі різних чисельних методів, в тому числі і не розглянутих в статті.

Література

1. Introducing Antenna Magus [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу : http://moasoft.com.co.kr/download/Antenna_Magus.pdf.
2. Сайт компанії «EMSS», розробника комплексу програм FEKO [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.emss.de.
3. Сайт програми FEKO [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.feko.info
4. Сайт компанії-розробника програми μ WaveWizard [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.mician.com.
5. Сайт компанії-розробника програми SonnetSuites [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.sonnetsoftware.com.
6. Сайт компанії-розробника програми AWR Microwave Office [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.web.awr.com/Usa/Products/Microwave-Office
7. Сайт компанії «Ansoft» – розробника програми HFSS Ansoft [Електронний ресурс]. – Режим доступу : www.ansoft.com
8. Анализ функциональных возможностей систем моделирования электродинамических характеристик морских радиоэлектронных средств [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу : <https://docplayer.ru/64341114-Analiz-funkcionalnyh-vozmozhnostey-sistem-modelirovaniya-elektrodinamicheskikh-harakteristik-morskih-radioelektronnyh-sredstv.html>.
9. Сучасні методи аналізу, синтезу і оптимізації пристроїв надвисоких частот та антен : методичні рекомендації для студентів напряму підготовки 6.050901 «Радіотехніка» / Д. О. Василенко. – К. : НТУУ «КПІ», РТФ, 2015. – 61 с.

10. Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST MicrowaveStudio / А. А. Курушин, А.Н. Пластиков. – М. : Издательство МЭИ, 2010.

11. Банков С.Е. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М. : ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009.

References

1. Introducing Antenna Magus [Elektronnyi resurs]. – 2019. – Rezhym dostupu : http://moasoftware.co.kr/download/Antenna_Magus.pdf.
2. Sait kompanii «EMSS», rozrobnyka kompleksu prohram FEKO [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : www.emss.de.
3. Sait prohramy FEKO [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : www.feko.info
4. Sait kompanii-rozrobnyka prohramy μ WaveWizard [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : www.mician.com.
5. Sait kompanii-rozrobnyka prohramy SonnetSuites [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : www.sonnetsoftware.com.
6. Sait kompanii-rozrobnyka prohramy AWR Microwave Office [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : www.web.awrcorp.com/Usa/Products/Microwave-Office
7. Sait kompanii «Ansoft» – rozrobnyka prohramy HFSS Ansoft [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu : www.ansoft.com
8. Analiz funkcionalnyh vozmozhnostey sistem modelirovaniya elektrodinamicheskikh harakteristik morskikh radioelektronnykh sredstv [Elektronnij resurs]. – 2019. – Rezhim dostupu : <https://docplayer.ru/64341114-Analiz-funkcionalnyh-vozmozhnostey-sistem-modelirovaniya-elektrodinamicheskikh-harakteristik-morskikh-radioelektronnykh-sredstv.html>.
9. Suchasni metody analizu, syntezy i optymizatsii prystroiv nadvysokykh chastot ta anten : metodychni rekomendatsii dlia studentiv napriamu pidgotovky 6.050901 «Radiotekhnika» / D. O. Vasylenko. – K. : NTUU «KPI», RTF, 2015. – 61 s.
10. Kurushin A. A. Proektirovanie SVCh ustrojstv v srede CST MicrowaveStudio / A. A. Kurushin, A.N. Plastikov. – M. : Izdatelstvo MEI, 2010.
11. Bankov S.E. Raschet antenn i SVCh struktur s pomoshyu HFSS Ansoft / S.E. Bankov, A.A. Kurushin. – M. : ZAO «NPP «RODNIK», 2009.

Рецензія/Peer review : 11.06.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. В.В. Мартинюк