

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Сальман Рашід Уайд

УДК 621.396.6

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ТОНКОПРОВОДОВИХ АНТЕН З
НЕЛІНІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХНЕВОГО ІМПЕДАНСУ**

05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
професор
Лучанінов Анатолій Іванович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
професор кафедри основ радіотехніки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор
Горобець Микола Миколайович,
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна
завідувач кафедри прикладної електродинаміки;

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Попенко Ніна Олексіївна,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я.Усікова НАН України, Харків,
провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться "___" _____ 2015 р. о _ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.03 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14, ауд. 13.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий “__” _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Протягом останніх років значна увага приділяється дослідженню антен та розсіювачів, які мають в своєму складі нелінійні елементи. Це пояснюється тим, що використання нелінійних ефектів, які виникають в таких пристроях, дозволило за допомогою сучасних радіотехнічних засобів вирішити низку прикладних завдань, які не вирішуються традиційними методами. Наприклад, ефект виникнення спектральних складових у відгуку нелінійного розсіювача, які відсутні у вхідному впливі, є основою нелінійної радіолокації. Він також використовується в ході реалізації штучних матеріалів для стелс-технологій, керованих частотно-селективних поверхонь, в ході створення ректен для систем безпроводової передачі енергії, нелінійних маркерів, що використовуються для прихованого позначення спеціальних об'єктів або людей у випадках проведення рятувальних робіт у важкодоступних місцях, для реалізації автономних ретрансляторів сенсорних мереж і т.д.. Сьогодні сфера технічних використань нелінійних ефектів, які виникають під час випромінювання та розсіювання електромагнітних хвиль безперервно розширюється, зростає кількість нелінійних радіотехнічних пристроїв, які використовують даний ефект. Подальше впровадження нанотехнологій та освоєння оптичного діапазону хвиль призвели до появи нового типу антен, так званих "нелінійних наноантен".

Внаслідок цього – дослідження принципів та методів моделювання випромінювачів та розсіювачів, у складі яких є елементи з нелійними характеристиками, можна вважати важливим напрямком розвитку та вдосконалення техніки сучасних радіотехнічних систем.

За кордоном дослідження в цій галузі провадять школи дослідників під керівництвом Wilson J.L., Engheta N., Sarkar T. K., Weiner D. D., Lee K.C., Miller E.A., Djordjevic A.R., Штейншлейгера В.Б., Вернигорова Н.С., Парватова Г.Н., Умнова О.Л., Ларцова С.В., Петрова Б.М., Семенихіної Д.В., Горбачева О.О., Слепяна Г.Я., Банкова С.Є. В Україні найбільш відомі школи під керівництвом Я.С. Шифріна (ХНУРЕ) та Ю. Ф. Зіньковського (НТУ КПП).

На сьогодні найбільш загальним підходом є підхід з використанням нелінійних граничних умов (НГУ), який розвивається школами Б.М. Петрова та Я.С. Шифріна. Він оснований на тому, що нелінійні елементи істотно змінюють властивості одного з параметрів електродинамічних пристроїв – поверхневого імпедансу, характеристики якого стають нелійними. Саме ця обставина дозволила сформулювати задачу дослідження випромінювачів і розсіювачів пристроїв з нелійними елементами як задачу аналізу антен з нелійним поверхневим імпедансом (АНП).

Узагальнена модель АНП вже частково розроблена. Вона базується на методі нелінійних інтегральних рівнянь (НІР) для структур з нелійними граничними умовами, сформульованими для періодичного або майжеперіодичного режиму в просторово-частотній області. Недолік цієї моделі – вона непридатна для моделювання більш складних режимів, зокрема – перехідного режиму, або режиму динамічного хаосу. Тому актуальною є задача створен-

ня такої моделі, яка б дозволяла провадити моделювання в просторово-часовій області. Її розв'язання дає можливість більш повного дослідження нелінійних ефектів, які виникають в антенах та розсіювачах з нелінійним поверхневим імпедансом, для подальшого розвитку нових принципів побудови електродинамічних пристроїв з розподіленими або квазірозподіленими нелінійними елементами, як пристроїв функціональної електроніки з новими якостями.

Таким чином, тема дисертаційного дослідження, спрямованого на розвиток методів аналізу нестационарного режиму тонкопроводових антен з нелійними властивостями поверхневого імпедансу та подальші дослідження їхніх характеристик, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі основ радіотехніки радіотехнічного факультету Харківського національного університету радіоелектроніки. Наведені в дисертації результати досліджень пов'язані з дослідженнями за д/б темою № 260-5, фінансованої Міністерством освіти та науки України, у розробці якої автор брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета даної дисертаційної роботи полягає в розвитку методів моделювання нестационарних режимів тонкопроводових електродинамічних структур, що містять елементи з розподіленими і зосередженими нелінійними властивостями, і в дослідженні, на прикладі конкретних структур, нелінійних режимів їх функціонування.

Відповідно до поставленої мети в дисертації сформульовано та вирішено такі задачі:

1. На основі методу нелінійних інтегральних рівнянь у просторово-часовій області розроблено математичну модель АНПІ, яка придатна для моделювання нестационарних режимів.

2. Отримано компонентні рівняння, які описують випромінюючу структуру АНПІ в просторово-часовій області.

3. Модифіковано алгоритм і пакет програм аналізу тонкопроводових випромінювачів з метою дослідження нестационарних режимів, які виникають в досліджуваних структурах.

4. Розроблені модель та методи використано для дослідження характеристик тонкопроводових антен з неоднорідно розподіленим поверхневим імпедансом та для вивчення раніше не з'ясованих особливостей нелінійних режимів в таких пристроях, а також для оцінки характеристик нелінійних розсіювачів з метою їх використання під час розробки сучасних радіотехнічних пристроїв.

Об'єкт дослідження – процес перетворення коливань і хвиль в електродинамічних пристроях, що містять нелінійні елементи із зосередженими та розподіленими параметрами.

Предмет дослідження – моделі, які забезпечують прийнятну для практики проектування точність аналізу вихідних параметрів АНПІ.

Методи дослідження. В ході вирішення поставлених задач було використано математичний апарат електродинаміки, теорії нелінійних коливань, теорії

антен з нелінійними елементами, теорії НВЧ-кіл, а також методи числового аналізу й математичного моделювання.

Наукова новизна полягає у тому, що:

1. Удосконалено модель тонкопроводових антен з нелінійними властивостями поверхневого імпедансу, яка, на відміну від існуючих, дозволяє проводити аналіз нестационарних режимів таких пристроїв з урахуванням нерівномірного розподілу нелінійного поверхневого імпедансу вздовж провідників випромінюючої структури, а також придатна для моделювання антен та розсіювачів, випромінюючі структури яких виконані з вуглецевих нанотрубок. В рамках запропонованої моделі отримано систему рівнянь стану відносно часових залежностей струму в довільному перерізі провідників АНПІ та системи компонентних рівнянь у просторово-часовій області.

2. Вперше досліджено вплив неоднорідно розподіленого нелінійного поверхневого імпедансу на характеристики антен і розсіювачів (розподіл струму, ефективність генерації вищих гармонік, діаграму спрямованості) та показана можливість керування ними за рахунок зміни закону розподілу та величини нелінійного імпедансу.

3. Вперше з'ясовані умови виникнення режиму генерації субгармонік та хаотичних коливань в АНПІ з індуктивним характером нелінійного поверхневого імпедансу.

4. Досліджено можливості підвищення ефективності генерації гармонік при нелінійному розсіюванні електромагнітних хвиль та показано можливість реалізації коефіцієнта перетворення частоти, близького до граничного за рахунок вибору форми та розмірів випромінюючої структури.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному.

1. На основі розробленої моделі запропоновано методика та реалізовано алгоритм і програмні засоби для розрахунків характеристик нестационарних режимів АНПІ. Від аналогічних вони відрізняються можливістю використання різноманітних програмних пакетів схемотехнічного моделювання.

2. Розроблені моделі й алгоритми значно розширюють можливості адекватних розрахунків і прогнозування параметрів антен, у складі яких є нелінійні елементи з зосередженими та розподіленими властивостями.

3. Отримано додаткові знання про характеристики нестационарних режимів АНПІ, зокрема про умови виникнення режиму динамічного хаосу.

4. Розроблені методика і пакет програм можуть бути використані для аналізу інших електродинамічних пристроїв з лінійними та нелінійними характеристиками, зокрема, провідових випромінювачів і розсіювачів довільної конфігурації, в тому числі і для аналізу розсіяння електромагнітних хвиль вуглецевими нанотрубками.

5. Сукупність даних, яка отримана під час дослідження характеристик конкретних нелінійних розсіювачів, є, по-суті, вихідним матеріалом для подальших практичних досліджень у напрямку розробки нових типів таких пристроїв та прогнозування параметрів і характеристик систем, у складі яких вони використовуються.

5. Принципи моделювання, реалізований алгоритм і програмні засоби для розрахунків нестационарних режимів АНП, розроблені в дисертаційній роботі, використані в науково-дослідній роботі ХНУРЕ (д/б тема №260-5). Матеріали дисертаційної роботи також впроваджено в навчальний процес кафедри основ радіотехніки ХНУРЕ в курсі "Проектування пристроїв інформаційних мереж", а також при виконанні магістерських атестаційних робіт студентів спеціальностей "Радіотехніка" та "Системи технічного захисту інформації", що підтверджено відповідними актами про впровадження.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є результатом наукових досліджень автора. Особистий вклад здобувача у роботах, які виконані в співавторстві полягають у наступному:

- у роботах [1, 3, 7, 8, 10] – розроблено математичну модель, запропоновано та програмно реалізовано ефективний алгоритм розрахунку елементів узагальненої матриці власних і взаємних імпедансів тонкопровідних випромінювачів та проведено тестування розробленого пакета програм;

- у роботах [2, 9] – здійснено розрахунки та проаналізовано ефективність різних числових методів моделювання антен з вуглецевих нанотрубок;

- у роботах [4, 6] – проведено моделювання нелінійних ефектів та аналіз отриманих результатів, визначено можливості режиму динамічного хаосу в антенах з НПП;

- у роботі [5] – надано практичні рекомендації щодо вибору випромінюючих структур нелінійних розсіювачів з підвищеною ефективністю випромінювання на частотах гармонік.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення дисертаційної роботи були представлені та обговорювалися на таких міжнародних конференціях:

11-й Міжнародній науково-технічній конференції «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science», (Львів – Славське, 2012 р.); 2-й Міжнародній науково-практичній конференції "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки" (Чернівці, 2012 р.); 9-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2013» (м. Севастополь, 2013 р.); на IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), (м. Одеса, 2013 р.).

Публікації за темою дисертації. Основні результати дисертації опубліковані у 10 наукових працях. Серед них 4 статті у фахових виданнях з переліку, затвердженого ВАК України (одна з них [5] – у виданні, що входить до міжнародних реферативних баз даних) одна стаття [3] – у закордонному виданні, одна стаття [4] – у виданні, що входить до міжнародних реферативних баз даних (всього 6 статей), а також 4 роботи у матеріалах наукових конференцій міжнародного рівня.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел (147 найменувань). Загальний обсяг роботи – 165 стор. (78 рисунків, 9 таблиць).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено основні результати, які мають наукову новизну та практичне значення. Наведено структуру та стислу анотацію розділів роботи.

У **першому розділі** дисертаційної роботи наводиться огляд сучасного стану техніки АНПІ та методів їх моделювання. Показано, що значна кількість таких антен є тонкопровідними антенами довільної конфігурації. Зазначено також, що математична модель тонкопровідних АНПІ є ефективним інструментом для дослідження загальних особливостей нелінійних ефектів, притаманних й іншим типам антен, до складу яких входять елементи з нелінійними властивостями.

Зазначено, що для аналізу нелінійних пристроїв, до яких належать АНПІ, використовуються два типи моделей – структурна модель і модель на основі змінних стану. Дано стислу характеристику цих моделей і показано, що такий розподіл носить чисто умовний характер. У тому випадку, коли рівняння стану мають аналітичний розв’язок, з моделі на основі змінних стану можна отримати структурну модель. Це дало змогу для подальшого аналізу АНПІ вибрати модель на основі змінних стану і сформулювати етапи аналізу АНПІ при використанні такої моделі:

- вибір змінних стану, моделей елементів, які входять до схеми АНПІ, отримання рівнянь стану, вихідних рівнянь і співвідношень для обчислення зовнішніх характеристик АНПІ;
- розв’язання рівнянь стану;
- знаходження вектора вихідних параметрів;
- визначення зовнішніх характеристик АНПІ.

У другій частині розділу розглянуто теоретичні методи дослідження АНПІ. Показано, що підхід, оснований на розв’язанні рівнянь Максвелла, спільно з відповідними граничними умовами як для області нелінійності, так і поза нею, може бути застосований лише до обмеженого кола задач. Розглянуто спрощення вихідної задачі за допомогою методу нелінійних граничних умов (НГУ), який дозволяє виключити з розгляду деяку область простору і поля в ній, задаючи певний зв’язок між векторами поля на межі цієї області. НГУ були застосовані до розв’язання ряду нелінійних крайових задач. Проте розроблені моделі справедливі або для випадків «слабкої» нелінійності, або для моделювання сталого періодичного режиму АНПІ з нелінійністю довільного вигляду. Отримані системи нелінійних інтегральних рівнянь, які за своєю суттю є рівняннями стану АНПІ, сформульовано в просторово-частотній області. Їх використання істотно спрощує аналіз сталих режимів АНПІ, але не дозволяє провадити моделювання більш складних нестационарних режимів, наприклад перехідних процесів при імпульсному збудженні АНПІ, або режиму динамічного хаосу. Відомі методи аналізу на основі НР у просторово-часовій області придатні тільки для моделювання АНПІ, до складу яких входять нелінійні елементи із зосередженими параметрами. Тому у дисертації, як першорядна, поставлена задача створення математичної моделі, яка дає можливість аналізу нестационар-

них режимів АНПІ, до складу яких входять елементи з розподіленими нелінійними властивостями. Вирішення даної задачі і є суттю подальшого розвитку методів аналізу тонкопроводових АНПІ, що складає мету досліджень даної дисертації.

Другий розділ присвячений розробленню математичної моделі й алгоритму аналізу нестационарних режимів тонкопроводових АНПІ довільної конфігурації. В основу моделі покладено метод інтегральних рівнянь для тіл, на поверхні яких виконуються локальні НГУ, тобто миттєві значення дотичних складових векторів напруженості електричного $\mathbf{E}(q,t)$ і магнітного $\mathbf{H}(q,t)$ полів, зв'язані співвідношенням:

$$\mathbf{n}_q \times \mathbf{E}(q,t) = -\hat{\mathbf{Z}}\{q, \mathbf{n}_q \times \mathbf{H}(q,t)\}, \quad (1)$$

де \mathbf{n}_q – зовнішня нормаль до поверхні провідника в точці q ; $\hat{\mathbf{Z}}\{\cdot\}$ – нелінійний оператор, що описує властивості поверхневого імпедансу провідників.

Задача вирішувалась у такій постановці: в однорідному ізотропному просторі з параметрами (ε_0, μ_0) розташоване тіло об'ємом V_1 (рис. 1), на поверхні якого виконуються НГУ (1). Поверхня вважається гладкою. Об'єм $V^{\text{ст}}$ містить

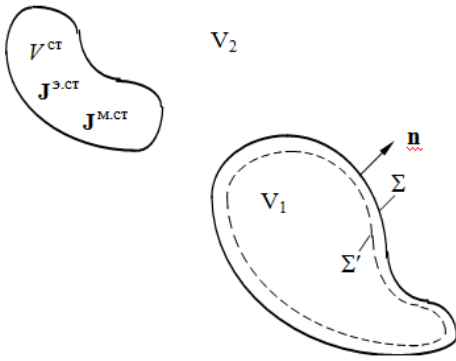


Рис. 1. До постановки задачі збудження тіл з нелінійними граничними умовами

сторонні джерела $\mathbf{J}^{\text{э.ст}}$ і $\mathbf{J}^{\text{м.ст}}$, що створюють в точці q на поверхні Σ напруженості полів $\mathbf{E}^i(q,t)$, $\mathbf{H}^i(q,t)$. Потрібно визначити поле в просторі поза V_1 , тобто в області V_2 .

Оскільки задача є нелінійною, то природно, що в загальному випадку необхідно оперувати з фізичними величинами – часовими залежностями полів, оскільки нелінійні операції не можна виконувати безпосередньо з комплексними амплітудами.

Вихідними для отримання інтегральних рівнянь для тіл з НГУ, як і у випадку лінійних задач, є інтегральні співвідношення для полів. У дисертації за основу взято співвідношення, яке отримано з використанням леми Лоренца, сформульованої безпосередньо для просторово-часової області:

$$\begin{aligned} T\mathbf{E}(p,t) = \mathbf{E}^i(p,t) + \frac{1}{4\pi} \int_{\Sigma} \left\{ -\frac{\mu}{R} \frac{\partial \mathbf{J}(q,\tau)}{\partial \tau} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\varepsilon} \text{grad}_p \int_0^{\tau} \text{div}_p \left[\frac{\mathbf{J}(q,t)}{R} \right] dt - \frac{1}{R^2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \mathbf{J}^{\text{м}}(q,\tau) \times \mathbf{R} \right\} d\sigma_q, \quad (2) \end{aligned}$$

де $\mathbf{E}^i(t)$ – напруженість електричного поля сторонніх джерел, $\mathbf{J}(q,\tau)$ та $\mathbf{J}^{\text{м}}(q,\tau)$ – еквівалентні електричний та магнітний струми, ε, μ – діелектрична та магнітна проникність середовища, що заповнює V_2 , $\tau = t - (R/c)$, $c = 1/\sqrt{\varepsilon\mu}$, \mathbf{R} –

вектор, що з'єднує точки джерела і спостереження, T – коефіцієнт ($T=1$ при $p \in V_2$, $T=1/2$ при $p \in \Sigma$, $T=0$ при $p \in V_1$).

У результаті математичних викладок отримано нелінійне інтегральне рівняння (3). Воно складається з двох частин – лінійної і нелінійної. Лінійна частина $L\{\mathbf{i}(q,t)\}$ характеризує таку саму антену, як і аналізована, але з ідеально провідною поверхнею, а нелінійна частина $\aleph\{\mathbf{i}(q,t)\}$ характеризує нелінійні властивості антени.

$$L\{\mathbf{i}(q,\tau)\} - \aleph\{\mathbf{i}(q,\tau)\} = \mathbf{E}_{tg}^i(p,t). \quad (3)$$

де

$$L\{\mathbf{i}(q,t)\} = \frac{1}{8a\pi^2} \mathbf{n}_p \times \int_L \left\{ -\frac{\mu}{R} \frac{\partial \mathbf{i}(q,\tau)}{\partial \tau} + \frac{1}{\varepsilon} \text{grad}_p \int_0^\tau \text{div}_p \left[\frac{\mathbf{i}(q,t)}{R} \right] dt \right\} dl_q, \quad (4)$$

$$\aleph\{\mathbf{i}(q,t)\} = \frac{1}{4\pi} \mathbf{n}_p \times \int_L \left\{ \frac{1}{R^2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \hat{\mathbf{Z}}\left\{q, \frac{\mathbf{i}(q,\tau)}{2\pi a}\right\} \times \mathbf{R} \right\} dl_q. \quad (5)$$

Тут a – радіус провідників випромінювача, $\mathbf{i}(q,\tau)$ – повний струм через поперечний переріз провідника. Інтегрування ведеться по довжині провідника.

Це рівняння є інтегро-диференціальним рівнянням з різними областями розташування точок спостереження та джерела. Його використання можливо, якщо припустити, що стороннє поле і відгук випромінювача мають обмежений спектр, чим виключається утворення "різких" імпульсних фронтів. Надалі ми допускаємо, що це припущення виконано для нестационарного режиму, тобто виключаємо з розгляду режим імпульсного збудження випромінювача з різкими фронтами.

Далі НІР (3) з використанням методу Гальоркіна з різними системами базисних функцій ($\{\Phi_n(q)\}$ – для лінійної частини, $\{\hat{\Phi}_n(q)\}$ – для нелінійної) зведені до операторної системи рівнянь:

$$\tilde{\mathcal{L}}_n \{i_m(\tau)\} - \aleph_n \{-\hat{i}_m(\tau)\} = e_n(t) \quad \text{для } n = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Тут: $i_m(\tau) = -\hat{i}_m(\tau)$ – часові залежності струмів у тих перетинах провідника, для

яких функції $\Phi_m(q) = \hat{\Phi}_m(q) = 1$, $\tilde{\mathcal{L}}_n \{i_m(\tau)\} = \sum_{m=1}^M \int_L \Phi_n(p) L\{i_m(\tau) \Phi_m(q)\} dl_p$,

$$\aleph_n \{i_m(\tau)\} = \int_L \hat{\Phi}_n(p) \aleph \left\{ - \sum_{m=1}^N \hat{i}_m(\tau) \hat{\Phi}_m(q) \right\} dl_p, \quad e_n(t) = \int_L \Phi_n(p) \mathbf{E}_{tg}^i(p,t) dl_p$$

$$\forall n = \overline{1, N}.$$

Співвідношення (6) є системою рівнянь стану схеми (рис. 2). Розв'язання цієї системи рівнянь можна здійснити з використанням добре розвинутих методів аналізу нелінійних схем у часовій області, але для цього потрібно знати залежність $\mathbf{v}(t) = \tilde{\mathcal{L}}\{\mathbf{i}(\tau)\}$ в часовій області ($\mathbf{v}(t)$, $\mathbf{i}(\tau)$ – вектори, елементами яких є функції $v_m(t)$ та $i_m(\tau)$, $\tilde{\mathcal{L}}\{\cdot\}$ – матричний оператор з елементами $\tilde{\mathcal{L}}_n \{i_m(\tau)\}$,

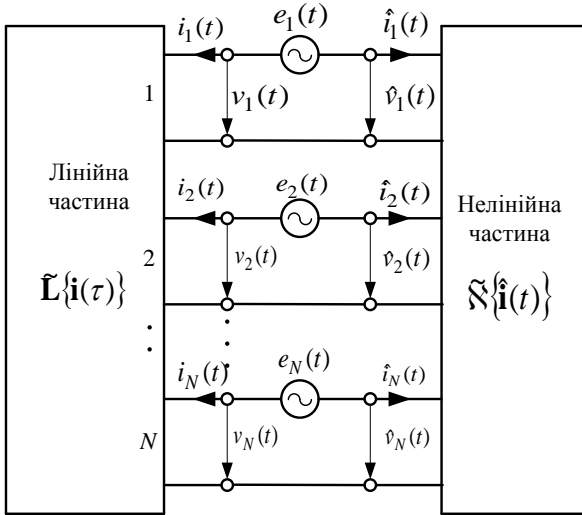


Рис. 2. Представлення електродинамічної структури з нелінійним поверхневим імпедансом у вигляді багатовходової нелінійної схеми

$n, m = \overline{1, N}$), тобто фактично потрібна побудова еквівалентної схеми лінійного багатополюсника в часовій області. З іншого боку, аналіз лінійної частини подібних підсистем, які є складними електродинамічними структурами, з лінійними характеристиками (наприклад, провідові випромінювачі або розсіювачі довільної конфігурації) набагато більш ефективно може бути виконаний в частотній області. До сьогодні для цього розроблені ефективні методи та пакети прикладних програм.

Далі показано, що напруга холостого ходу $v_k(t)$, ($k = \overline{1, N}$), на k -му вході багатополюсника лінійної частини зв'язана з струмами його входів $i_j(\tau)$, ($j = \overline{1, N}$) інтегралом згортки:

$$v_k(t) = \sum_{j=1}^N \int_0^t \mathcal{G}_{kj}(t-\tau) i_j(\tau) d\tau, \quad k = \overline{1, N}, \quad (7)$$

в якому функція $\mathcal{G}_{kj}(t)$ є зворотним перетворенням Фур'є частотних залежностей елементів узагальненої матриці власних і взаємних імпедансів $Z_{kj}(\omega)$ інтегрального оператора (4), тобто:

$$\mathcal{G}_{kj}(t) = \mathfrak{F}^{-1}[Z_{kj}(\omega)]. \quad (8)$$

де $\mathfrak{F}^{-1}[\cdot]$ означає операцію зворотного перетворення Фур'є.

Таким чином, за допомогою (7) встановлюється зв'язок між векторами $\mathbf{v}(t)$ і $\mathbf{i}(\tau)$, що і є описом лінійної частини АНП в часовій області. При цьому слід врахувати наступне. Числовий аналіз електродинамічної структури (тобто обчислення функцій $Z_{kj}(\omega)$) може бути виконаний для кінцевого числа дискретних частот. У свою чергу, в часовій області, функції $\mathcal{G}_{kj}(t)$ також мають обчислюватися для дискретних часових інтервалів (інтервалів кінцевої тривалості). Внаслідок цього згортка функцій $\mathcal{G}_{kj}(t)$ і з струмами входів, також має виконуватися з використанням операції дискретної згортки. Така операція вимагає значних витрат часу і тому число вибірок функцій $\mathcal{G}_{kj}(t)$ має бути по можливості мінімальним. Розглянуто способи підвищення ефективності обчислення елементів оператора $\mathfrak{L}\{\mathbf{i}(\tau)\}$. Для обчислення функцій $Z_{kj}(\omega)$ запропоновано та реалізовано досить ефективний алгоритм та комплект програм NANO_WIRE.

Далі в розділі розглянуто особливості визначення вихідних параметрів та характеристик АНПІ для нестационарного режиму. Отримано у вигляді дискретної згортки співвідношення для обчислення найбільш інформативної характеристики – просторово-часового розподілу напруженості поля випромінювання (розсіяння) АНПІ. Відмічено наступне. Якщо при дослідженні сталого періодичного режиму, випромінений (розсіяний) сигнал АНПІ також буде періодичним, то він характеризується комплексними амплітудами на частоті збудження і частотах вищих гармонік. Для цього випадку можна використовувати традиційні параметри антен (діаграма спрямованості, КНД, ефективна площа розсіювання і т.п.), які визначають вихідні параметри АНПІ на частотах всіх спектральних складових у відгуку антени. Якщо ж розглядаються нестационарні режими антен або розсіювачів, наприклад, при дослідженні поля нелінійного розсіювача, слід враховувати властивості індикатора, використовованого для виявлення і детектування розсіяного сигналу. Тому визначення вихідних параметрів вимагає окремого уточнення для кожного конкретного випадку.

В заключному підрозділі наведені результати перевірки достовірності розроблених програмних продуктів.

У третьому розділі наведені результати числових дослідження нелінійних ефектів у тонкопроводових випромінювачах (розсіювачах) з індуктивним поверхневим імпедансом (рис. 3). Вважалось, що АНПІ збуджується монохроматичним стороннім джерелом, яке може бути або ідеальним джерелом струму, або джерелом ЕРС, або джерелом постійної потужності.

Для розрахунків використано два пакети програм – WIRE_ANSI і AWRDE. За допомогою першого з них визначалися частотні залежності елементів матриць власних і взаємних опорів $Z_{kj}(\omega)$ для вібраторів з лінійним поверхневим. За допомогою пакета Microwave Office, з використанням отриманих у WIRE_ANSI даних, формувалася повна модель випромінювача з розподіленим нелінійним поверхневим імпедансом (НПІ) і проводилося рішення рівнянь стану (6), в результаті чого визначався вектор в $\mathbf{i}(\tau)$ і, як результат, розподіл струму вздовж випромінювача. На останньому етапі за допомогою NANO_WIRE визначалися характеристики випромінювання досліджуваних структур.

У першому підрозділі основна увага приділена нерівномірному розподілу нелінійного поверхневого імпедансу провідників АНПІ при періодичному режимі їх роботи. На відміну від відомих досліджень, передбачалось, що поверхневий індуктивний імпеданс випромінювача на ділянці від $\xi_{NL\min}$ до $\xi_{NL\max}$ має нелінійні властивості і, крім того, на цій ділянці оператор \hat{Z} залежить від поздовжньої координати ξ , тобто

$$\mathbf{n} \times [\mathbf{n} \times \mathbf{h}_0 \hat{Z}_s(\xi, |\mathbf{H}(\xi, t)|)] = \mathbf{n} \times \left\{ \mathbf{n} \times \mathbf{h}_0 \hat{L}[\xi, |\mathbf{H}(\xi, t)|] \frac{d}{dt} |\mathbf{H}(\xi, t)| \right\}. \quad (9)$$

Всі наведені нижче результати отримані для поліноміальної залежності індуктивності від струму у вигляді:

$$L(I(\xi, t)) = L_0(\xi) + L_2(\xi) I^2(\xi, t), \quad (10)$$

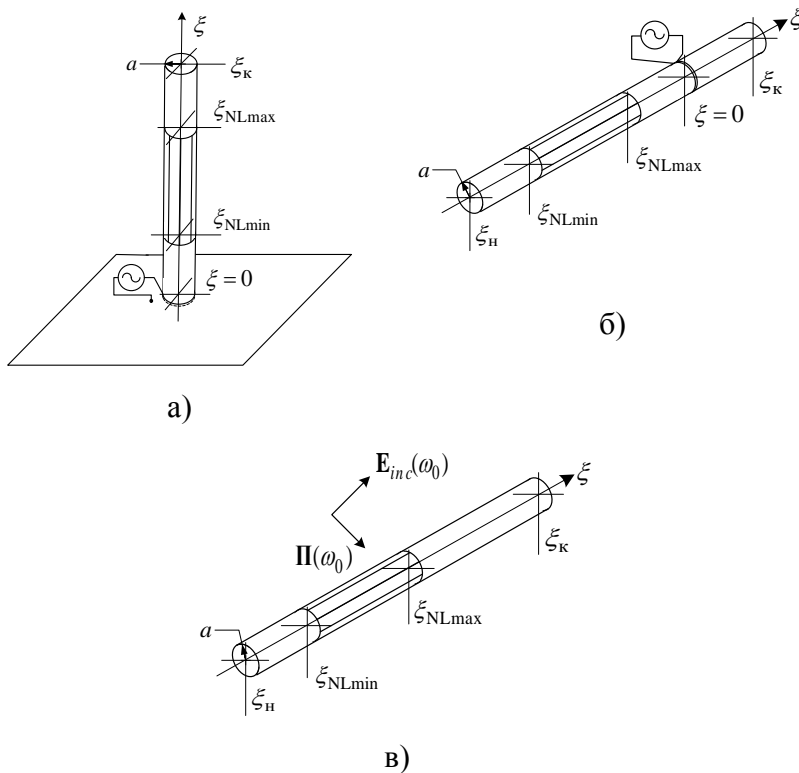


Рис. 3. Ескізи модельованих структур з нелінійним поверхневим імпедансом

а) несиметричний вібратор; б) прямолінійний вібратор у вільному просторі; в) нелінійний розсіювач

від ξ_{NLmax} . Так випадок $\xi_{NLmax} = 0$ відповідає зосередженій нелінійній індуктивності, а випадок $\xi_{NLmax} = \xi_{\kappa}$ – нелінійній індуктивності, рівномірно розподілений по всій довжині вібратора. Досліджено вплив розширення області НПІ на розподіл струму вздовж вібратора та його діаграму спрямованості на основній частоті та частотах вищих гармонік. Показано, що при розширенні області НПІ максимум розподілу струму на основній частоті зміщується від центру вібратора до краю. Це свідчить про збільшення його еквівалентної електричної довжини за рахунок укорочення довжини хвилі струму, обумовленого розподіленням НПІ індуктивного характеру. На частотах вищих гармонік при розширенні області нелінійності характер розподілу струму якісно не змінюється (рис. 4), але спостерігається зростання амплітуди струму в максимумі розподілу, що можна бачити на рис. 5. (На рис. 4 наведено розподіли струму, відповідно 1 – $\xi_{NLmax} = 0$, 2 – $\xi_{NLmax} = 0,021\lambda_0$, 3 – $\xi_{NLmax} = 0,042\lambda_0$, 4 – $\xi_{NLmax} = 0,083\lambda_0$, 5 – $\xi_{NLmax} = 0,167\lambda_0$, 6 – $\xi_{NLmax} = 0,23\lambda_0$).

Досліджувалась також зміна діаграм спрямованості (ДС) на основній частоті та частотах вищих гармонік. Вони схожі з виявленими вище змінами розподілу струму. Так, при розширенні області НПІ форма ДН на третій гармоніці якісно не змінюється, але зростають величини максимумів ненормованих ДС (див. рис. 6, 7).

де $L_0(\xi)$ і $L_2(\xi)$ – коефіцієнти, що описують лінійну і нелінійну частини індуктивності. У ході досліджень основна увага приділялася впливу нелінійності імпедансу і тому було покладено $L_0(\xi) = 0$.

Спочатку було розглянуто збудження джерелом струму. Розподіл усередненої погонної індуктивності описувався наступним чином:

$$L_2(\xi) = \text{const} \text{ при} \\ 0 < \xi \leq \xi_{NLmax}, \\ \text{та } L_2(\xi) = 0 \text{ при} \\ \xi_{NLmax} < \xi \leq \xi_{\kappa}.$$

Такий розподіл описує зміну розміру області нелінійності в залежності

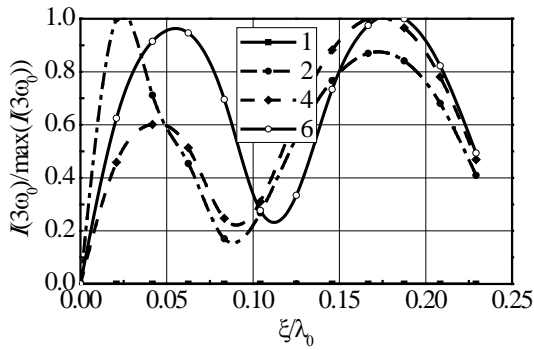


Рис. 4. Розподіл струму третьої гармоніки уздовж несиметричного вібратора при різних розмірах області з НПІ

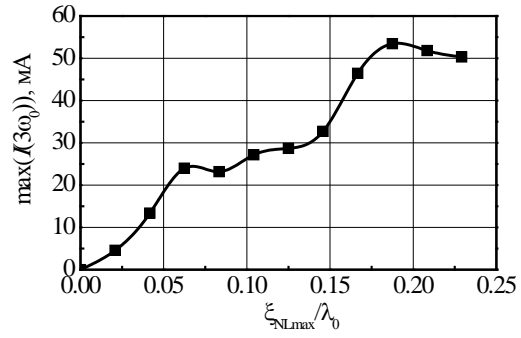


Рис. 5. Залежність амплітуди струму третьої гармоніки в максимумі від розміру області з НПІ

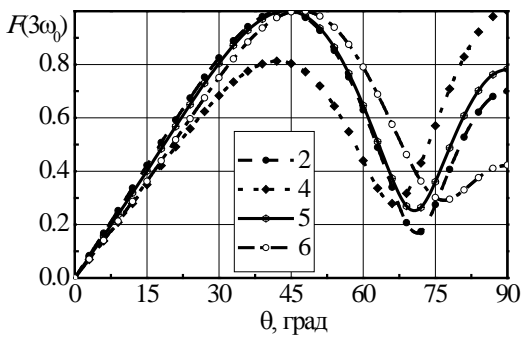


Рис. 6. Нормована ДС на третій гармоніці при різних розмірах області з НПІ

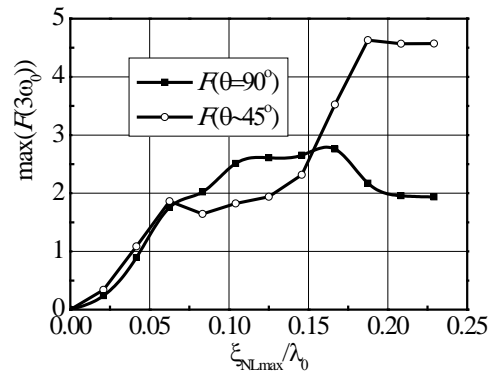


Рис. 7. Максимальне значення ненормованої ДС на третій гармоніці

Була розглянута також поведінка розподілу струму при зміні положення області НПІ вздовж осі вібратора (зміщення області НПІ) При цьому вважалося, що розміри області НПІ $\xi_{\xi_{NLmax}} - \xi_{\xi_{NLmin}} \ll \lambda_0$ (зосереджена не лінійність), а координата середини цієї області дорівнює ξ_{NL} . На відміну від попереднього випадку, при зміщенні області НПІ розподіл струму значно змінюється в залежності від місцеположення НПІ (рис. 8) і, окрім того, існують оптимальні з точки зору генерації вищих гармонік положення області НПІ (рис. 9).

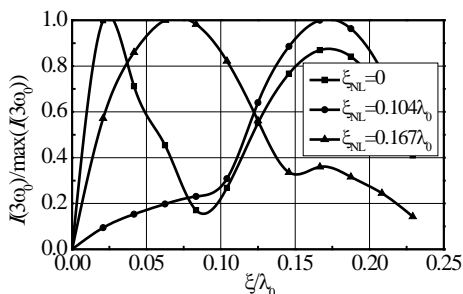


Рис. 8. Розподіл струму третьої гармоніки уздовж вібратора при різних положеннях області з НПІ

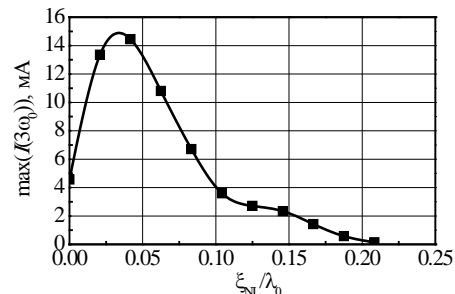


Рис. 9. Залежність амплітуди струму третьої гармоніки в максимумі від положення області з НПІ

В дисертаційній роботі також наведено результати детального аналізу збудження несиметричного вібратора джерелом ЕРС, а також результати досліджень симетричного вібратора та нелінійного розсіювача при різних розподілах НПП вздовж провідника (як випадки розширення та зміщення області НПП, так і випадки, коли величина $L_2(\xi)$ змінюється в області НПП за більш складними законами). Показано, що НПП антени або включення в антену квазірозподілених нелінійних елементів значно впливають на її характеристики, що дає змогу керування розподілом струму на поверхні антени і, відповідно, її ДС за рахунок зміни величини та розподілу НПП. Це стосується як робочої частоти антени, так і вищих гармонік. Важливим також виявляється і тип джерела збудження АНПП, від якого суттєво залежать її характеристики на частотах гармонік.

У другому підрозділі наведено результати досліджень нестационарного режиму вібратора з неперервно розподіленим НПП. Мета досліджень полягала в пошуку можливості виникнення режиму динамічного хаосу в АНПП за рахунок вибору величини нелінійності поверхневого імпедансу та/або рівня зовнішнього впливу. Для досягнення даної мети провадилися розрахунки розподілу струму для різних значень L_2 . Величина L_2 змінювалася від $0,1 \text{ мкГн/А}^2$ до 100 мкГн/А^2 , тобто від "слабкої" до "сильної" нелінійності імпедансу. При цьому контролювалися спектр і характер часової залежності струму в заздалегідь обраному перерізі випромінювача. Передбачалося, що в пристрої існує хаотичний режим якщо: спектр коливання є безперервним, а характер часової залежності істотно змінюється при незначних змінах рівня зовнішнього впливу.

Результати досліджень показали, що при $P_{in} > 30 \text{ дБм}$, $L_2 > 70 \text{ мкГн/А}^2$ та частоті зовнішнього впливу $1,5 \text{ ГГц}$ характеристики коливань струму в різних перерізах вібратора (рис. 10) відповідають поставленим критеріям.

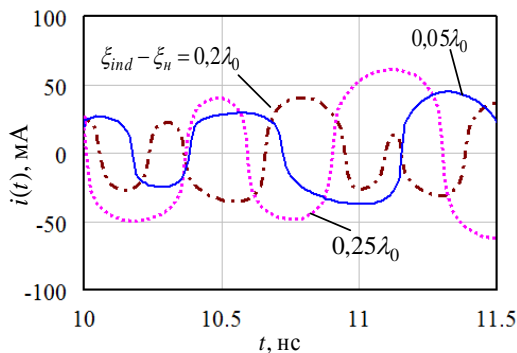


Рис. 10. Часові залежності струму в різних перетинах вібратора

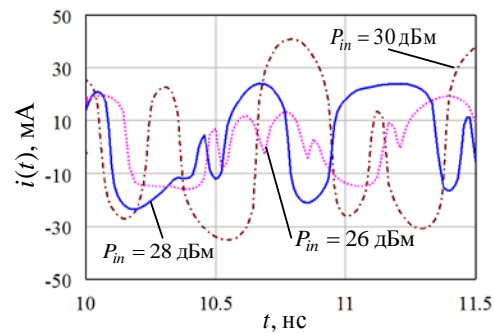


Рис. 11. Часові залежності струму при різних рівнях входного впливу

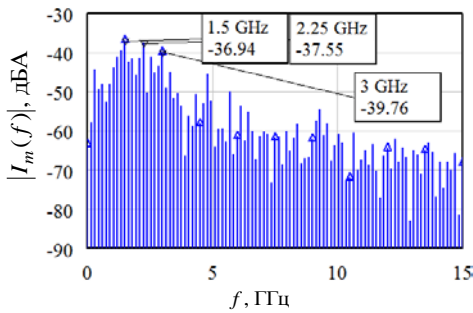


Рис. 12. Спектральна густина струму в перерізі вібратора

(складова основної частоти має рівень -37 дБм, а рівень складової з частотою 2,25 ГГц - -37,55 дБм). Це свідчить про наявність режиму динамічного хаосу в даному випадку. В роботі детально досліджено особливості формування хаотичного режиму. Показано, що такий режим притаманний і розсіювачам з розподілом НПП, а також, що при підвищенні частоти зовнішнього впливу режим динамічного хаосу спостерігається при менших величинах НПП. Так, при частоті 3 ГГц режим динамічного хаосу спостерігається вже починаючи з $L_2 \approx 7$ мкГн/А².

У третьому підрозділі наведено результати досліджень нелінійних розсіювачів, які використовуються як нелінійні маркери для прихованого позначення спеціальних об'єктів або людей у випадках проведення рятувальних робіт у важкодоступних місцях, для реалізації автономних ретрансляторів сенсорних мереж. Метою досліджень було вирішення завдання збільшення ефективності випромінювання НР на який-небудь з обраних гармонік за рахунок раціонального вибору характеристик випромінюючої структури. Як нелінійні елементи розглядалися три групи діодів, що випускаються серійно. Перша група – діоди з допустимою вхідною потужністю $P_M \sim 0,2$ Вт, друга – діоди з $P_M \sim 0,5$ Вт і третя – діоди з $P_M \sim 1$ Вт. Для кожної з груп були визначені за паспортними даними параметри "усередненого" діода групи і проводилися розрахунки для такого діода. Як критерій ефективності перетворення частоти НР вибрано інтегральний критерій, так званий коефіцієнт перетворення $K_n(n\omega_0)$, який визначається як відношення потужності, випромінюваної НР на частоті n -ї гармоніки $P_{\Sigma n}$ до максимальної потужності P_{in} , яку може отримати з поля збудження випромінювач НР, тобто $K_n(n\omega_0) = P_{\Sigma n} / P_{in}$. Для визначення вимог до частотної характеристики імпедансу випромінювача була вирішена числовими методами задача знаходження максимальної величини коефіцієнта перетворення в залежності від значень вхідного імпедансу випромінювача на основній частоті і частоті другої гармоніки для двох режимів роботи помножуючого діода – режиму резистивної і режиму ємнісної нелінійностей.

Показано, що для діодів Шоттки в режимі резистивної нелінійності, при зміні величини $R_A(\omega_0)$ в межах (25...800) Ом максимум коефіцієнта перетворення другої гармоніки спостерігається переважно в тому випадку, якщо відношення імпедансів $R_A(2\omega_0) / R_A(\omega_0)$ лежить в інтервалі значень 0,25 ... 0,5.

Так, рис. 11 ілюструє різку зміну часової залежності при доволі незначній зміні рівня зовнішнього впливу ($26 \text{ дБм} \leq P_{in} \leq 30 \text{ дБм}$), а на рис. 12 показано спектр коливань струму для $\xi_{ind} - \xi_H = 0,2\lambda_0$, $P_{in} = 30 \text{ дБм}$, $L_2 = 100 \text{ мкГн/А}^2$. Видно, що в спектрі присутні складові, з частотою, яка не кратна частоті зовнішнього впливу, а їх рівень майже дорівнює рівню складової основної частоти

При цьому можна досягнути $K_n(2\omega_0)$ близько 15%. Для діодів Шоттки в режимі ємнісної нелінійності активні складові опорів $R_A(2\omega_0)$, при яких досягає максимуму, мають дуже невеликі значення, причому на частоті $2\omega_0$ останні в 2 ... 4 рази менше, ніж на частоті ω_0 . В цьому режимі можна отримати величину $K_n(2\omega_0)$ близько (95...98)%. Ці дані були вихідними для пошуку конструктивних реалізацій випромінюючої структури НР. Було досліджено декілька різних випромінюючих структур і показано, що для НР з ємнісною нелінійністю на основі вібратора зі зміщеною точкою включення помножуючого діода можна отримати $K_n(2\omega_0)$ близько 85%. Використання більш складних випромінюючих структур дозволяє отримати $K_n(2\omega_0)$ близько (90...95)%. Досліджені також характеристики спрямованості НР на частотах ω_0 і $2\omega_0$. Показано, що з точки зору спрямованості для використання в складі антенних решіток перевагу мають НР на основі вібраторів зі зміщеною точкою включення помножуючого діода. Вони дозволяють, при незначному програші у величині коефіцієнта перетворення в порівнянні з НР на основі більш складних випромінювачів, забезпечити досить високі показники крупноапертурних решіток НР в широкому секторі кутів сканування. Таким чином, доказана можливість побудови як одиночних НР, так і решіток з коефіцієнтом перетворення, близьким до гранично можливого для використовуваних в них нелінійних елементів.

ВИСНОВКИ

В результаті дисертаційних досліджень вирішено актуальну науково-прикладну задачу подальшого розвитку методів моделювання нестационарних режимів тонкопровідних антен з нелінійними властивостями поверхневого імпедансу. Вона полягає в розробленні ефективної математичної моделі таких пристроїв, а також методики, алгоритму та програмних засобів її реалізації. Теоретичні дослідження і комп'ютерне моделювання дозволили створити достатньо повну фізичну картину нестационарних явищ в таких структурах і показали нові можливості управління їх характеристиками.

Основні результати роботи і висновки з них можна сформулювати наступним чином.

1. Розроблено удосконалену модель тонкопровідних антен з нелінійними властивостями поверхневого імпедансу, яка дозволяє провадити аналіз нестационарних режимів таких пристроїв з урахуванням нерівномірного розподілу нелінійного поверхневого імпедансу вздовж провідників випромінюючої структури, а також придатна для моделювання антен та розсіювачів, випромінюючі структури яких виконані з вуглецевих нанотрубок. Така модель дозволяє суттєво збільшити кількість різновидів АНПІ, для яких можливо провести аналіз.

2. В рамках запропонованої моделі отримано систему рівнянь стану відносно часових залежностей струму в довільному перерізі провідників АНПІ та системи компонентних рівнянь в просторово-часовій області.

3. Для числової реалізації запропонованої моделі розроблено програмні засоби для аналізу випромінюючих структур АНПІ у тонкопроводовому наближенні (пакет WIRE_ANSI). Цей пакет, окрім свого призначення – формування математичної моделі випромінюючої структури як компонента АНПІ, може бути використаний і самостійно, наприклад, для моделювання структур, виконаних із вуглецевих нанотрубок.

4. Вперше вивчено характеристики АНПІ з нерівномірним розподілом поверхневого імпедансу вздовж провідника. Показано, що за рахунок зміни абсолютних значень і форми розподілу нелінійності можна керувати розподілом струму на поверхні антени і, відповідно, формою діаграми спрямованості. Це стосується як основної робочої частоти антени, так і її вищих гармонік. Важливим також виявляється і тип джерела живлення АНПІ, від якого значною мірою залежать її характеристики на частотах гармонік.

5. На прикладі вібратора з нелінійними властивостями поверхневого імпедансу показано, що в нелінійних електродинамічних пристроях з індуктивним характером НПІ режими слабкої і сильної нелінійності мають суттєві відмінності. При цьому, для режиму сильної нелінійності не виконуються умови конвергентності і при певних значеннях нелінійності та рівня зовнішнього впливу спостерігаються явні ознаки режиму динамічного хаосу: безперервний спектр коливань; сильна залежність форми коливань струму від незначних змін початкових умов.

6. Показано, що зі збільшенням частоти зовнішнього впливу режим з ознаками динамічного хаосу спостерігається в значно більшому діапазоні змін величини нелінійності та рівня зовнішнього впливу. При цьому більшою мірою проявляються процеси генерації гармонік і субгармонік при різних початкових умовах, причому навіть при низьких значеннях нелінійності поверхневого імпедансу.

7. Показано, що за допомогою вибору типу випромінювача і його геометричних розмірів можливе створення як одиночних нелінійних розсіювачів, так і решіток на їх основі з коефіцієнтом перетворення, близьким до гранично можливого для використовуваних у них нелінійних елементів (в режимі подвоєння частоти для режиму ємнісної нелінійності було отримано значення коефіцієнта перетворення нелінійного розсіювача близько 90%).

8. Показано, що нелінійні розсіювачі на основі вібраторів зі зміщеною точкою живлення, при незначному програші у величині коефіцієнта перетворення у порівнянні з розсіювачами на основі більш складних випромінюючих структур, дозволяють забезпечити гарні показники решіток з таких розсіювачів в широкому секторі кутів сканування. Використання цих результатів дозволяє спростити конструкцію решіток НР, виключивши з них додаткові пристрої узгодження та фільтрації, характерні для подібних пристроїв.

9. Достовірність отриманих результатів зумовлена коректною постановкою задач на дослідження; використанням відомих і неодноразово перевірених методів, методик і алгоритмів; збігом результатів з результатами інших авторів, що одержані іншими методами; прозорою інтерпретацією отриманих результа-

тів з використанням відомих фізичних законів, зокрема законів електродинаміки, нелінійної радіофізики.

10. Результати дисертаційної роботи впроваджено в науково-дослідній роботі, а також використовуються у навчальному процесі, що засвідчується відповідними актами про впровадження.

Таким чином, можна зробити висновок, що мета роботи – розвиток методів моделювання нестационарних режимів тонкопровідових антен, що містять елементи з розподіленими і зосередженими нелінійними властивостями – досягнута, а всі поставлені задачі вирішені.

ПЕРЕЛІК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лучанинов, А.И. Использование уравнения Поклингтона для анализа антенн из углеродных нанотрубок / А.И. Лучанинов, Е.А. Медведев, С.Р. Уайд // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2013. – № 174. – С. 112–121.

2. Медведев, Е.А. Сравнительная оценка различных методов анализа электродинамических свойств нанотрубок / Е.А. Медведев, С.Р. Уайд // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2013. – № 175. – С. 97–101.

3. Luchaninov, A.I. The Pocklington equation application to analysis of antennas made of carbon nanotubes / A.I. Luchaninov, E.A. Medvedev, S.R. Owaid // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, No. 15. – PP. 1313–1325.

4. Уайд, С.Р. Хаотические процессы в тонкопроволочных излучателях с нелинейными свойствами поверхностного импеданса / С.Р. Уайд, А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва // Scientific Journal “ScienceRise”. – 2014. – Том №2 (2). – С. 90–98.

5. Уайд, С.Р. Увеличение эффективности генерации гармоник нелинейными рассеивателями / С.Р. Уайд, А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №9 (70). – С. 51–58.

6. Лучанинов, А.И. Вибраторы с неравномерным распределением нелинейности поверхностного импеданса / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва С.Р. Уайд // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 177. – С. 202–222.

7. Luchaninov, A. Peculiarities of Pocklington Equation Application to Antennas and Carbon Nanotubes Analysis / A. Luchaninov, E. Medvedev, S. R. Owaid // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XI International Conference TCSET’2012. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. – P. 491.

8. Медведев, Е.А. Результаты моделирования электродинамических характеристик наноантен с использованием интегральных уравнений Галлена и Поклингтона / Е.А.Медведев, С. Р. Уайд // II-а міжнародна науково-практична конференція "Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки". – Чернівці, 2012 р. – С. 171.

9. Медведев, Е.А. Сравнительная оценка различных методов анализа электродинамических свойств нанотрубок / Е.А. Медведев, К.О. Денисенко, С.Р. Уайд // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-

2013»: Материалы 9-й междунар. молодежной науч.–техн. конф. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2013. – С. 184.

10. Luchaninov, A.I. Carbon nanotubes interference / A.I. Luchaninov, E.A. Medvedev, S. R. Owaid // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Odessa, 2013. – P. 509–511.

АНОТАЦІЯ

Уаїд С. Р. Розвиток методів аналізу тонкопроводових антен з нелінійними властивостями поверхневого імпедансу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.07 – антени та пристрої мікрохвильової техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2015.

На основі аналізу літературних джерел зроблено висновок про необхідність розвитку методів моделювання випромінювачів та розсіювачів, до складу яких входять нелінійні елементи з розподіленими та зосередженими параметрами, які відносяться до класу антен з нелінійним поверхневим імпедансом (АНП). У дисертації наведено нове розв'язання цієї актуальної задачі, а саме – створено метод аналізу прововодових антен довільної конфігурації з нелінійними властивостями поверхневого імпедансу при нестационарному режимі їх роботи. Це розв'язання отримано на основі методу нелінійних інтегральних рівнянь, які сформульовані в просторово-часовій області для тіл з нелінійними граничними умовами.

На основі розробленої моделі тонкопроводових АНП створено алгоритм і програму аналізу нестационарних режимів досліджуваних пристроїв.

З їхньою допомогою вперше вивчено характеристики АНП з нерівномірним розподілом поверхневого імпедансу вздовж провідника. Показано, що за рахунок зміни абсолютних значень та форми розподілу нелінійності можна керувати розподілом струму на поверхні антени і, відповідно, формою діаграми спрямованості. Це стосується як основної робочої частоти антени, так і її вищих гармонік. Важливим також виявляється і тип джерела живлення антени, від якого значною мірою залежать її характеристики на частотах гармонік.

На прикладі вібратора з нелінійними властивостями поверхневого імпедансу показано, що в нелінійних електродинамічних пристроях з індуктивним характером НП режимі слабкої і сильної нелінійності мають суттєві відмінності. При цьому, в режимі сильної нелінійності не виконуються умови конвергентності і за певних значень параметрів нелінійності та рівня зовнішнього впливу спостерігаються явні ознаки режиму динамічного хаосу: безперервний спектр коливань, сильна залежність форми коливань струму від незначних змін початкових умов.

Ключові слова: тонкопроводові антени, розподілені та зосереджені нелінійні елементи, математична модель, нелінійні інтегральні рівняння, поверхневий імпеданс, нестационарний режим, динамічний хаос.

АННОТАЦИЯ

Уайд С. Р. Развитие методов анализа тонкопроволочных антенн с нелинейными свойствами поверхностного импеданса – Рукопись.

На основе анализа литературных источников сделан вывод о необходимости развития методов моделирования излучателей и рассеивателей, в состав которых входят нелинейные элементы с распределенными и сосредоточенными параметрами, которые относятся к классу антенн с нелинейным поверхностным импедансом (АНПИ). В диссертации приведено новое решение этой актуальной задачи, а именно - создан метод анализа проводных антенн произвольной конфигурации с нелинейными свойствами поверхностного импеданса при нестационарном режиме их работы. Это решение получено на основе метода нелинейных интегральных уравнений, которые сформулированы в пространственно-временной области для тел с нелинейными граничными условиями.

На основе разработанной модели тонкопроволочных АНПИ создан алгоритм и программа анализа нестационарных режимов исследуемых устройств. С их помощью впервые изучены характеристики АНПИ с неравномерным распределением поверхностного импеданса вдоль проводника. Показано, что за счет изменения абсолютных значений и формы распределения нелинейности можно управлять распределением тока на поверхности антенны и, соответственно, формой диаграммы направленности. Это касается как основной рабочей частоты антенны, так и ее высших гармоник. Важным также оказывается и тип источника питания АНПИ, от которого в значительной степени зависят ее характеристики на частотах гармоник.

На примере вибратора с нелинейными свойствами поверхностного импеданса показано, что в нелинейных электродинамических устройствах с индуктивным характером НПИ режимы слабой и сильной нелинейности имеют существенные различия. В режиме сильной нелинейности не выполняются условия конвергентности и при определенных значениях параметров нелинейности и уровня внешнего воздействия наблюдаются явные признаки режима динамического хаоса: непрерывный спектр колебаний, сильная зависимость формы колебаний тока от незначительных изменений начальных условий.

Исследованы возможности увеличения эффективности нелинейных рассеивателей (НР). Показано, что посредством выбора типа излучателя и его геометрических размеров возможно создание как одиночных НР, так и решеток на их основе с коэффициентом преобразования близким к предельно возможному для используемых в них нелинейных элементов. Показано, что НР на основе вибраторов позволяют обеспечить хорошие показатели крупноапертурных решеток антенн-умножителей в широком секторе углов сканирования. Использование данных результатов позволяет упростить конструкцию решеток НР, исключив из них дополнительные устройства согласования и фильтрации.

ABSTRACT

Owaid S.R. "The development of methods for analysis thin wires antennas with nonlinear properties of surface impedance"-Manuscript

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.12.07 - Antennas and Microwave Devices. - Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2015

Based on the analysis of the literature that the need to develop modeling techniques radiators and scatterers, which include nonlinear elements with distributed and lumped parameters that belong to a class of antenna with nonlinear surface impedance (ANSI). The dissertation presented a new solution to this actual problem – the namely method of analysis established wire antenna configuration with arbitrary nonlinear properties of surface impedance in the non-stationary mode of operation.

This solution is obtained on the basis of non-linear integral equations formulated in the space-time domain for bodies with nonlinear boundary conditions

Based on the developed model thin-wire ANSI created algorithm and program analysis non-stationary regimes studied devices.

By their uses, firstly studied the characteristics of ANSI uneven distribution of surface impedance along the wire. It is shown that by changing the absolute values and forms of distribution of non-linearity can be controlled distribution of current on the antenna surface and thus form pattern. This applies to the basic operating frequency of the antenna and its higher harmonics. An important manifested type of power source antenna, which largely depends on its characteristics at frequencies of harmonics.

For example vibrator with nonlinear properties of surface impedance shown that nonlinear electromagnetic devices with inductive nature NSI regimes of weak and strong nonlinearity are important differences. Thus, in the mode of strong nonlinearity convergence conditions are not met and in some nonlinearity parameter values and level of exposure there are clear signs of dynamical chaos mode: continuous spectrum of vibrations, oscillations form a strong dependence of the current minor changes to initial conditions.

Keywords: thin-wire antennas, distributed and lumped nonlinear elements, mathematical model, nonlinear integral equation, surface impedance, transient mode, dynamic chaos

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0,9. Тир. 100 прим. Зам. 032-15.
Підписано до друку 26.01. 15. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, корп. 1, к. 19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

