



І. Ю. Тепляков, І. В. Гадьо

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ АНАЛІЗУ РЕБРИСТО-СТЕРЖНЕВОЇ СТРУКТУРИ

Представлено вдосконалену методику для аналізу електродинамічних характеристик імпедансної ребристо-стержневої структури, яка базується на методі наведених електрорушійних сил. Під час виконання дослідження використано модель ребристо-стержневої структури, у якій циліндричні металеві радіальні неоднорідності замінено системою циліндрично розташованих елементарних випромінювачів – диполів. Розглянуто варіанти взаємного розміщення диполів у тривимірній системі ребристо-стержневої структури та відповідні варіанти математичних співвідношень для розрахунку дійсної і уявної частини взаємного імпедансу. Для автоматизації процесу розв'язання задачі аналізу ребристо-стержневої структури на підставі запропонованих рішень розроблено програмне забезпечення з використанням мови програмування *Python*. Виконано розрахунок матриці струмів і напруги тривимірної системи диполів, що моделює досліджувану ребристо-стержневу структуру. Досліджено вплив розмірності матриці струмів і напруги моделі ребристо-стержневої структури на результат розрахунку нормованої за амплітудою діаграми спрямованості у площині вектора напруженості електричного поля. Виявлено, що отримані результати розрахунку розподілу напруженості електричного поля в дальній зоні близькі до відомих, отриманих теоретичним шляхом на підставі розрахунку матриці власних і взаємних імпедансів методом наведених електрорушійних сил та підтверджених експериментально. Використання запропонованої методики дало змогу істотно зменшити тривалість розрахунку матриці власних і взаємних імпедансів. Досліджено, що у разі збільшення розмірності матриці струмів і напруги, зменшується рівень бокових пелюсток на нормованій за амплітудою діаграмі спрямованості, а рівень основної пелюстки прямує до нормалі відносно головної осі ребристо-стержневої структури. Надано практичні рекомендації щодо застосування запропонованої методики розрахунку системи рівнянь знаходження дійсних і комплексних значень власних і взаємних імпедансів тривимірної системи випромінювачів у моделі ребристо-стержневої структури, а також з урахуванням внутрішнього імпедансу джерела живлення випромінювачів.

Ключові слова: імпедансна структура; моделювання електродинамічних характеристик; взаємний імпеданс; діаграма спрямованості.

Вступ / Introduction

Застосування методу наведених електрорушійних сил (ЕРС) для знаходження власних і взаємних імпедансів випромінювачів у складних електродинамічних системах досі залишається актуальним [1, 4, 6, 10, 11]. Відомі значення власних і взаємних імпедансів випромінювачів у випромінювальних системах, таких як антени або групи антенних випромінювачів, дають змогу розраховувати їхні електродинамічні характеристики, зокрема розподіл високочастотних струмів на випромінюючих поверхнях, та визначити розподіл напруженості електричного поля в дальній зоні, що на практиці відіграє вагомий роль [9, 13]. Використання наближеного методу наведених ЕРС для задач чисельного аналізу та

синтезу високочастотних і надвисокочастотних випромінювачів має свої переваги над іншими відомими аналітичними і чисельними методами, а саме: простота алгоритму розрахунку власних і взаємних імпедансів, що спрощує розроблення програмного забезпечення для автоматизованих обчислень. При цьому результати обчислень характеристик випромінювання близькі до експериментально отриманих [8, 15, 16].

Об'єкт дослідження – випромінювання електромагнітної енергії ребристо-стержневою структурою (РСС).

Предмет дослідження – методи розрахунку власного і взаємного імпедансу випромінювачів моделі РСС, що дасть змогу знайти чисельний розв'язок задачі аналізу РСС, а саме просторовий розподіл електричного поля в дальній зоні.

Інформація про авторів:

Тепляков Іван Юрійович, канд. техн. наук, асистент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: ivan.y.teplakov@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5178-5977>

Гадьо Ірина Володимирівна, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: iryna.v.nychai@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0003-1615-6483>

Цитування за ДСТУ: Тепляков І. Ю., Гадьо І. В. Удосконалена методика розв'язання задачі аналізу ребристо-стержневої структури. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 3. С. 81–86.

Citation APA: Teplyakov, I. Yu., & Gado, I. V. (2024). Improved problem-solving technique for corrugated-rod structure analysis. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(3), 81–86. <https://doi.org/10.36930/40340310>

Мета роботи – вдосконалити алгоритм розрахунку власних і взаємних імпедансів системи випромінювачів моделі РСС, що забезпечить зменшення тривалості розрахунку матриці власних і взаємних імпедансів, і уможливить підвищення ефективності автоматизованого розв'язання задачі аналізу РСС.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- застосувати алгоритм для розрахунку матриці власних і взаємних імпедансів тривимірної системи випромінювачів у моделі РСС;
- розробити спеціалізоване програмне забезпечення (ПЗ) для автоматизованого розв'язання задачі аналізу РСС, а саме: розрахунку просторового розподілу електричного поля в дальній зоні РСС;
- оцінити отримані результати розрахунку просторового розподілу електричного поля та надати рекомендації щодо практичного застосування запропонованої методики розв'язання задачі аналізу РСС.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Імпеданси структури, виготовлені на підставі комбінації металу або плазми та діелектрика серед яких вагоме значення має РСС [15], належать до широкого класу випромінювальних систем мікрохвильового діапазону частот. Особливість такої структури полягає у її конструкції, яка складається зі стержня, призначеного для поширення поверхневої електромагнітної хвилі (ПЕХ), та плоских металевих кілець, призначених для сповільнення біжучої хвилі. В англійських джерелах можна натрапити на термін "поверхневий плазмон-поляритон", який у вітчизняній літературі означає ПЕХ, що поширюється на межі двох середовищ: металу та діелектрика [7, 17]. Замість плоских металевих кілець в конструкції РСС можна використовувати діелектрик, наприклад, фторопласт або інші діелектричні матеріали, проте використання таких матеріалів призводить до додаткових економічних витрат, пов'язаних зі складністю виготовлення деталей конструкції та вартістю матеріалів. Теоретично та експериментально доведено [7, 15, 16], що для досягнення електромагнітного випромінювання РСС, форма якого наближається до дископодібної або лійкоподібної, в її конструкції доцільно використовувати циліндричні металеві радіальні неоднорідності (МРН) у комбінації з плоскими металевими кільцями. Отже, випромінювання імпедансних структур залежать від особливостей модуляції поверхневого імпедансу. Проте актуальним залишається питання підвищення ефективності чисельного моделювання електромагнітного випромінювання РСС в дальній зоні. Детальнішу інформацію про особливості моделювання випромінювання такого класу імпедансних структур можна знайти за таким посиланням [7].

У роботі [16] запропоновано використання методу наведених ЕРС для розв'язування задач аналізу та синтезу РСС. Теоретично та експериментально доведено, що застосування методу наведених ЕРС дає змогу моделювати РСС як систему випромінювачів (диполів), завдяки чому виникає можливість обчислювати матрицю струмів і напруги [2] з урахуванням відбитої від кінця структури ПЕХ. Використовуючи отримані значення струмів, можна застосувати відомий алгоритм розрахунку розподілу електричного поля в дальній зоні РСС. Використання методу наведених ЕРС для розв'язання задачі аналізу РСС дало адекватний результат розрахунку діаграми спрямованості (ДС) в дальній зоні, а са-

мі теоретично отримані результати були підтверджені експериментально. Проте залишається актуальним питання, як саме застосувати метод наведених ЕРС для РСС, де випромінюючі компоненти представлено тривимірною системою диполів.

У роботі [8] запропоновано алгоритм розрахунку власних і взаємних імпедансів тривимірної конфігурації системи елементарних випромінювачів на підставі використання методу наведених ЕРС. Він виявився ефективним для дослідження електродинамічних характеристик масиву диполів, розташованих у кубічній або сферичній конфігураціях. Проте залишається незрозумілим, чи такий алгоритм є адекватним для моделювання електродинамічних характеристик імпедансних структур, до яких належить РСС.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

В роботі [8] запропоновано алгоритм розрахунку струму в тривимірній системі, що складається з N диполів. Розподіл струму I на кожному диполі можна розрахувати, використовуючи таке математичне співвідношення:

$$I = (Z + Z_g)^{-1} \times U. \quad (1)$$

Така математична модель, на відміну від запропонованої моделі [16] розрахунку власних і взаємних імпедансів системи випромінювачів РСС, враховує внутрішній імпеданс джерела живлення Z_g (припускається 50 Ом). У такому випадку матричний опис струмів і напруг, діючих у тривимірній системі випромінювачів РСС, матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_g \\ Z_g \\ \vdots \\ Z_g \end{bmatrix} \right)^{-1} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

На рис. 1 схематично зображено тривимірне розташування системи диполів у двох МРН, якими модулюється поверхневий імпеданс РСС [16]. З аналізу результатів, отриманих у роботі [7], відомо, що модуляція поверхневого імпедансу впливає на поширення поверхневої електромагнітної хвилі уздовж структури і, як наслідок, на просторове поширення електромагнітного випромінювання, утвореного такими імпедансними структурами. Матричне рівняння (1) будується на підставі розрахунку системи рівнянь знаходження дійсних і комплексних значень власних і взаємних імпедансів тривимірної системи диполів РСС, а також з урахуванням внутрішнього імпедансу джерела живлення випромінювачів [8]. Зауважимо, що питання необхідної кількості диполів, які інтерпретують МРН, буде розглянуто далі.

Для визначення напруги живлення системи випромінювачів у моделі РСС використано математичну модель падаючої та відбитої хвилі в довгій лінії передачі. Перевагою використання такої математичної моделі для розрахунку напруги живлення системи випромінювачів моделі РСС є простота розрахунку, а також змога врахувати відбиту від кінця структури ПЕХ, що впливає на випромінювання.

На відміну від запропонованих у роботі [16] математичних співвідношень для знаходження дійсного і комплексного значення взаємного імпедансу між диполями

моделі РСС, у роботі використано методику розрахунку взаємного імпедансу на підставі використання заданих

геометричних параметрів конструкції РСС, що визначає розташування диполів.

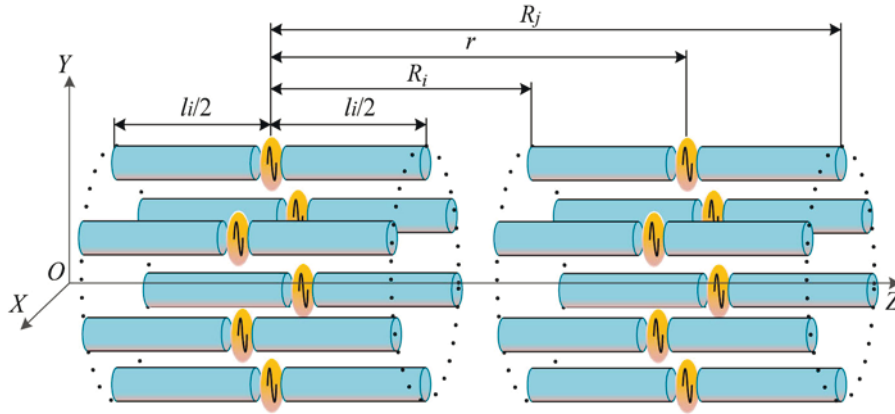


Рис. 1. Тривимірне розташування диполів у моделі ребристо-стержневої структури / Three-dimensional dipoles arrangement in the model of corrugated-rod structure [16]

На рис. 2 показано три можливих варіанти розташування диполів у моделі РСС, а саме:

- пліч-о-пліч – диполі розташовані паралельно в одній і тій самій МРН;
- колінеарне – диполі розташовані колінеарно в різних МРН;
- паралельне в ешелоні – розташування диполів є паралельним, але не колінеарним, у різних МРН.

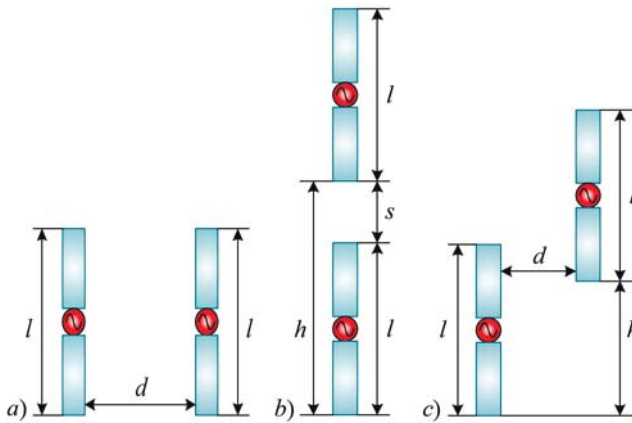


Рис. 2. Варіанти розташування диполів у моделі ребристо-стержневої структури / Dipole arrangement options in the model of corrugated-rod structure [2]: a) пліч-о-пліч / side-by-side; b) колінеарне / collinear; c) паралельне в ешелоні / parallel in echelon

Використовуючи низку математичних рівнянь [2] для знаходження взаємного імпедансу між диполями, розташованими пліч-о-пліч, як зображено на рис. 2,а, розрахунок дійсної (R_{21m}) та уявної (X_{21m}) частин взаємного імпедансу між такими диполями виконано на підставі математичних співвідношень (3-6):

$$R_{21m} = \frac{\eta}{4\pi} [2C_i(u_0) - C_i(u_1) - C_i(u_2)], \quad (3)$$

$$X_{21m} = -\frac{\eta}{4\pi} [2S_i(u_0) - S_i(u_1) - S_i(u_2)], \quad (4)$$

де параметри u_0 , u_1 та u_2 можна розрахувати за такими математичними співвідношеннями:

$$u_0 = kd, \quad (5)$$

$$u_{1,2} = k(\sqrt{d^2 + l^2} \pm l). \quad (6)$$

Зазначимо, що конфігурацію диполів "пліч-о-пліч", представлена на рис. 2,а, в цій роботі використовують для представлення одної і тієї самої МРН в моделі РСС.

Для розрахунку взаємного імпедансу диполів, що інтерпретують різні металеві радіальні неоднорідності,

доцільно використати конфігурації, зображені на рис. 2,б та 2,с. Далі наведено математичний апарат (7-11) для розрахунку дійсної та уявної частин взаємного імпедансу колінеарно розташованих диполів:

$$R_{21m} = -\frac{\eta}{8\pi} \cos(v_0) [-2C_i(2v_0) + C_i(v_2) + C_i(v_1) - \ln(v_3)] + \frac{\eta}{8\pi} \sin(v_0) [2S_i(2v_0) - S_i(v_2) - S_i(v_1)]; \quad (7)$$

$$X_{21m} = -\frac{\eta}{8\pi} \cos(v_0) [2S_i(2v_0) - S_i(v_2) - S_i(v_1)] + \frac{\eta}{8\pi} \sin(v_0) [2C_i(2v_0) - C_i(v_2) - C_i(v_1) - \ln(v_3)], \quad (8)$$

де параметри v_0 , v_1 , v_2 та v_3 можна розрахувати за такими математичними співвідношеннями:

$$v_0 = kh, \quad v_{1,2} = 2k(h \pm l), \quad (9), (10)$$

$$v_3 = (h^2 - l^2) / h^2. \quad (11)$$

Якщо розташування диполів не є колінеарним, то обчислення дійсної та уявної частин взаємного імпедансу між ними зводиться до використання математичних виразів (12-17):

$$R_{21m} = -\frac{\eta}{8\pi} \cos(w_0) [-2C_i(w_1) - 2C_i(w_{1'}) + C_i(w_2) + C_i(w_{2'}) + C_i(w_3) + C_i(w_{3'})] + \frac{\eta}{8\pi} \sin(w_0) [2S_i(w_1) - 2S_i(w_{1'}) - S_i(w_2) + S_i(w_{2'}) - S_i(w_3) + S_i(w_{3'})]; \quad (12)$$

$$X_{21m} = -\frac{\eta}{8\pi} \cos(w_0) [2S_i(w_1) + 2S_i(w_{1'}) - S_i(w_2) - S_i(w_{2'}) - S_i(w_3) - S_i(w_{3'})] + \frac{\eta}{8\pi} \sin(w_0) [2C_i(w_1) - 2C_i(w_{1'}) - C_i(w_2) + C_i(w_{2'}) - C_i(w_3) + C_i(w_{3'})], \quad (13)$$

де параметри w_0 , w_1 , $w_{1'}$, w_2 , $w_{2'}$, w_3 та $w_{3'}$ можна розрахувати за такими математичними співвідношеннями:

$$w_0 = kh, \quad w_{1,1'} = k(\sqrt{d^2 + h^2} \pm h), \quad (14), (15)$$

$$w_{2,2'} = k(\sqrt{d^2 + (h-l)^2} \pm (h-l)), \quad (16)$$

$$w_{3,3'} = k(\sqrt{d^2 + (h+l)^2} \pm (h+l)), \quad (17)$$

де: C_i та S_i – інтегральний косинус та синус відповідно, $\eta = 120\pi$ – хвильовий опір вільного середовища.

Використання запропонованої у цій роботі методики розв'язування задачі аналізу РСС методом наведених ЕРС дало змогу зменшити тривалість розрахунку взаємного імпедансу, що безпосередньо пов'язано з використанням процесорних ресурсів. Оскільки тривалість розрахунку розподілу напруженості електричного поля в дальній зоні методом наведених ЕРС залежить від розмірності матриці (2), актуальним залишається питанням знаходження оптимальної кількості диполів у моделі РСС. Для цього в роботі проведено низку розрахунків матричного рівняння (1) з використанням різної кількості диполів з метою дослідження залежності тривалості розрахунку власного і взаємного імпедансу від кількості диполів в моделі РСС.

ПЗ, використане для розрахунку власних і взаємних імпедансів диполів у тривимірній моделі РСС, а також розподілу напруженості електричного поля в дальній зоні, розроблено з використанням високорівневої відкритої інтерпретованої мови програмування *Python* версії 3.11.7. Використання зазначеного програмного середовища для розв'язування такого типу задач має свої переваги, оскільки у відкритому доступі є значна кількість бібліотек, призначених для прикладних математичних обчислень, зокрема і для розв'язання задач технічної електродинаміки. Для чисельних обчислень використано бібліотеку *NumPy*, а для візуалізації отриманих результатів – бібліотеку *Matplotlib*. Графічний інтерфейс користувача розроблено з застосуванням фреймворка *PyQt6*.

Розроблений програмний продукт для розрахунку матричного рівняння (1) та нормованої за амплітудою ДС є програмою, під час виконання якої кінцевому користувачеві необхідно ввести основні параметри для розв'язання задачі аналізу РСС, а саме: кількість, довжину та радіус циліндричних МРН, відстань між МРН, значення постійної складової напруги живлення, робочу частоту, а також кількість диполів, що інтерпретує одну МРН (див. рис. 1).

З метою підвищення ефективності взаємодії кінцевого користувача з ПЗ, розробленим у цій роботі, імплементовано графічний інтерфейс, головне вікно якого зображено на рис. 3. Зазначимо, що вкладка *Settings* на головному меню передбачена для зміни налаштувань, зокрема для введення необхідних параметрів розв'язання задачі; вкладка *View* передбачена для вибору системи координат; інструкцію користувача можна знайти у вкладці *Help*.

Шляхом проведення експерименту отримано значення тривалості розрахунку (с) матриці власних і взаємних імпедансів від кількості диполів у моделі РСС з використанням відомої [16] та запропонованої в цій роботі методики. Використання запропонованого математичного апарату спрощує чисельні розрахунки взаємного імпедансу диполів і, як наслідок, зменшує тривалість обчислень матричного рівняння (2) (таблиця). Проте використання такої методики накладає певні обмеження на конфігурацію РСС, а саме: геометричні параметри циліндричних МРН в РСС повинні бути ідентичними у всій конструкції. Це означає, що диполі, які інтерпретують МРН, в математичній моделі необхідно задавати однакової довжини. Таке обмеження стосується розрахунку взаємного імпедансу диполів, що розташовані колінеарно або паралельно в ешелоні (рис. 2, b, c).

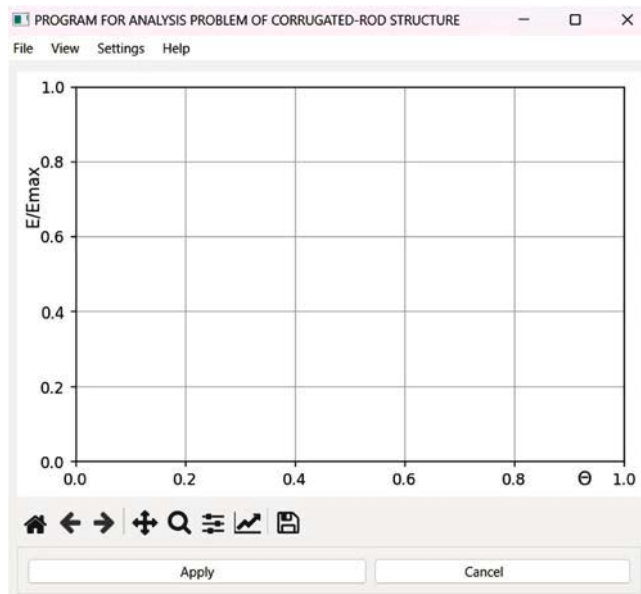


Рис. 3. Графічний інтерфейс користувача / Graphical user interface

Бачимо (див. таблицю), що у разі збільшення розмірності матриці власних і взаємних імпедансів (кількості випромінювачів в моделі РСС), спостерігається експоненціальне зростання тривалості розрахунку матричного рівняння (2). Це особливо помітно для відомої методики розрахунку.

Таблиця. Експериментально отримані значення тривалості розрахунку матриці власних і взаємних імпедансів / Experimentally obtained values of the calculation duration for the matrix of self and mutual impedances

Кількість диполів у моделі РСС	Тривалість обчислень матриці власних і взаємних імпедансів, с	
	Відома методика	Удосконалена методика
16	9.569	0.009
64	174.987	0.067
128	928.743	0.254
256	5025.490	1.038
512	56611.968	4.378
1024	–	16.767

Варто зазначити, що підвищити показники тривалості розрахунку матриці власних і взаємних імпедансів на базі відомої методики можна на підставі застосування концепції паралельних обчислень. Однак це вимагатиме додаткових апаратних ресурсів ЕОМ, оскільки ідея паралелізму полягає у розробленні спеціалізованого ПЗ, виконання якого базується на використанні багатоядерних процесорів (багатопроцесорності). Зокрема, під час вдосконалення наявного програмного забезпечення для розрахунку матриці струмів і напруги доцільно використати концепцію багатопотоковості, де кожен програмний потік буде призначений для розрахунку окремого елемента матриці власних і взаємних імпедансів у математичному співвідношенні (2). Це дасть змогу істотно скоротити тривалість обчислень на базі відомої методики [16], однак у разі паралельних обчислень зростає складність розроблення, відлагодження та тестування ПЗ, призначеного автоматизувати розв'язок задачі аналізу РСС.

Відомо, що використання різних геометричних параметрів МРН впливає на форму розподілу електричного поля в дальній зоні [7]. Така властивість є корисною у випадках, коли необхідно отримати задану форму

розподілу електричного поля, при цьому є обмеження на геометрію РСС, наприклад, її довжину.

Якщо в конструкції РСС використовують різні геометричні розміри циліндричних МРН, то доцільно застосовувати математичні вирази (18-19) для знаходження взаємного імпедансу:

$$Z_{ij} = Z_{in_{ij}} \sin\left(\frac{kl_i}{2}\right) \sin\left(\frac{kl_j}{2}\right), \quad (18)$$

де $Z_{in_{ij}}$ – вхідний опір, який визначають таким співвідношенням:

$$Z_{in_{ij}} = j \frac{30}{\sin\left(\frac{kl_i}{2}\right) \sin\left(\frac{kl_j}{2}\right)} \int_{-l_j/2}^{l_j/2} \sin\left[k\left(\frac{l_j}{2} - |z|\right)\right] \times \left[\frac{\exp(-jkR_i)}{R_i} + \frac{\exp(-jkR_j)}{R_j} - 2 \cos\left(k \frac{l_i}{2}\right) \frac{\exp(-jkr)}{r} \right] dz. \quad (19)$$

Зазначимо, що детальну інформацію про параметри математичних рівнянь (18-19) можна знайти у роботі [2].

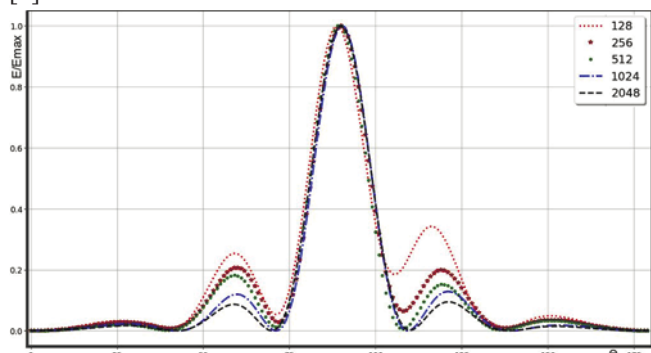


Рис. 4. Порівняння діаграм спрямованості отриманих за різної кількості диполів в моделі РСС / Radiation patterns comparison obtained with different numbers of dipoles in the corrugated-rod structure model

На рис. 4 в прямокутній системі координат показано результати обчислення нормованих за амплітудою ДС РСС у разі використання різної кількості диполів у моделі РСС. Для проведення цього дослідження вдосконалено ПЗ, розроблене в роботі [16], на підставі запропонованої в цій роботі методики розрахунку власних і взаємних імпедансів тривимірної системи випромінювачів. При цьому взято за зразок геометричні параметри РСС, яку попередньо [15] досліджували за розміром циліндричних МРН ($\Delta/\lambda_0 = 0.24$). Це зумовлено обмеженням запропонованої методики аналізу РСС.

Аналізуючи отримані результати, бачимо, що отримані нормовані за амплітудою ДС у площині вектора напруженості електричного поля є подібними, про що свідчить напрям головної пелюстки та бокових пелюсток. При цьому спостерігається незначне зменшення рівня бокових пелюсток у разі збільшенні кількості диполів у моделі РСС. Таке спостереження дає змогу зробити припущення, що для отримання адекватного результату обчислення нормованої за амплітудою ДС моделі РСС, достатньо використати незначну кількість випромінювачів. До того ж, це зменшує тривалість комп'ютерних обчислень і, як наслідок, потребує менше процесорних ресурсів. Отримані результати є близькими до результатів у роботі [16], враховуючи незначну відмінність конструкційних параметрів моделі РСС у співвідношенні з довжиною хвилі, за якої проводили низку досліджень.

Обговорення результатів дослідження. Зазначимо, що схожі дослідження особливостей випромінювання імпедансних структур з використанням методу наведених ЕРС також проводили інші науковці. Зокрема, у дослідженнях, проведених у роботі [14], розглянуто задачу імпедансного синтезу антенної решітки, представленій у вигляді планарної конструкції, що складається з 25 імпедансних симетричних напівхвильових диполів. Моделювання такої антенної решітки, підтвердило можливість сканування головної пелюстки ДС шляхом зміни комплексного опору випромінювачів. У роботі [3] висвітлено результати дослідження електродинамічних характеристик випромінювальної структури типу Уда-Ягі, у підсумку яких отримано ряд ДС в площині векторів H та E електромагнітного поля за різної кількості диполів. Встановлено, що збільшення кількості випромінювачів у такій структурі підвищує ефективність випромінювання у поперечному напрямку відносно головної осі структури, а саме: звуження головної пелюстки на ДС, підвищення коефіцієнта підсилення та збільшення коефіцієнта спрямованої дії. Водночас автори [12] розв'язали задачу аналізу та оптимізації дипольної антенної решітки з використанням методу наведених ЕРС за робочої частоти радіосигналу 2,45 ГГц. Проведено розрахунки взаємного імпедансу випромінювальної антенної решітки, що складається з чотирьох диполів, а також представлено результати обрахунку ДС та S параметрів, при цьому адекватність теоретично отриманих результатів перевірено експериментально.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – набула подальшого розвитку методика розв'язання задачі аналізу випромінювальної ребристо-стержневої структури шляхом використання запропонованого алгоритму розрахунку дійсного і комплексного значення взаємного імпедансу диполів у її моделі.

Практична значущість результатів дослідження – розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для автоматизованого розв'язання задачі аналізу випромінювальної ребристо-стержневої структури, що дало змогу зменшити тривалість чисельних розрахунків матриці власних і взаємних імпедансів, а також використання процесорних ресурсів.

Висновок / Conclusions

Вдосконалено методику розрахунку власних і взаємних імпедансів тривимірної системи випромінювачів моделі РСС, що дало змогу зменшити тривалість розрахунку матриці власних і взаємних імпедансів і уможливило підвищення ефективності автоматизованого розв'язання задачі аналізу РСС. Тому можна стверджувати, що під час вирішення поставленої мети було досягнуто таких результатів:

1. Запропоновано та розглянуто математичний апарат з використанням методу наведених ЕРС, призначений зменшити тривалість розрахунку дійсних і комплексних значень взаємних імпедансів тривимірної системи випромінювачів у моделі РСС.
2. Побудовано відповідний алгоритм на підставі запропонованого математичного апарату, який у подальшому імплементовано у спеціалізоване ПЗ для автоматизованого розв'язання задачі аналізу РСС.
3. Виконано розв'язок задачі аналізу РСС з використанням розробленого в цій роботі спеціалізованого ПЗ, що да-

ло змого отримати ряд розподілів напруженості електричного поля в дальній зоні у вигляді нормованих за амплітудою діаграм спрямованості та надати рекомендації щодо практичного використання запропонованої методики.

References

1. Akroun, M., Shyianov, V., Bellili, F., Mezghani, A., & Heath, R. W. (2022). Achievable Rate of Near-Field Communications Based on Physically Consistent Models. *International Conference on Communications*, Seoul, Korea, 938–943. <https://doi.org/10.1109/ICC45855.2022.9839044>
2. Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory, analysis and design*, third edition. Hoboken: John Wiley & Sons. 1072 p. URL: <https://ia801302.us.archive.org/34/items/Antenna.Theory.Analysis.and.Design3rd.Edition/Antenna.Theory.Analysis.and.Design%283rd.Edition%29.pdf>
3. Berdnik, S. L., Katrich, V. A., Nesterenko, M. V., Penkin, Y. M., & Dumin, O. M. (2020). Yagi-Uda Combined Radiating Structures of Centimeter and Millimeter Wave Bands. *Progress In Electromagnetics Research M*, 93, 89–97. <https://doi.org/10.2528/PIERM20041506>
4. Bird, T. (2021). *Mutual Coupling Between Antennas*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119565048>
5. Cerveny, M., & Hazdra, P. (2017). Evaluation of the Input Impedance and Impedance Quality Factor of a Dipole in Spatial and Spectral Domains. *Radioengineering*, 26(4), 968–971. <https://doi.org/10.13164/re.2017.0968>
6. Henault, S., Antar, M. M. Y., Rajan, S., Inkol, R., & Wang, S. (2009). The Multiple Antenna Induced Emf Method for the Precise Calculation of the Coupling Matrix in a Receiving Antenna Array. *Progress In Electromagnetics Research*, 8, 103–118. <https://doi.org/10.2528/PIERM09062309>
7. Hoblyk, V. (2015). Mathematical model antennas, based on modulated plazmon-polariton structures. *Problems of Atomic Science and Technology*, 98(4), 70–75. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/112231/15-Hoblyk.pdf?sequence=1>
8. Malek, N. A., & Norun, A. F. (2013). 3-D antenna array analysis using the induced EMF method. Loughborough University. Thesis. URL: <https://hdl.handle.net/2134/13385>
9. Malek, N. A., Khalifa, O. O., Abidin, Z. Z., Mohamad, S. Y., & Rahman, N. A. (2018). Beam Steering Using the Active Element Pattern of Antenna Array. *Telkomnika*, 16(4), 1542–1550. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v16i4.9040>
10. Middelstaedt, F., & Tkachenko, S. (2021). The Induced EMF Method as an Alternative to the Iterative Method for the Approximation of the Reflection Coefficient on Thin Wires. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(8), 4781–4788. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3060091>
11. Nikolopoulos, C. D., & Capsalis, C. N. (2015). Hybrid method of moments – induced EMF method for analysing multi-element planar inverted F antenna arrays. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 9(7), 657–663. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2013.0527>
12. Norun Abdul Malek, Rob D. Seager, James A. Flint, & Zuhairiah Zainal Abidin. (2022). Analysis, Optimization, and Hardware Implementation of Dipole Antenna Array for Wireless Applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1741454>
13. Odintsov, V. O. (2021). Development of optimization techniques for parabolic antenna irradiators in the 4.5–4.7 GHz range. *Management, navigation and communication systems. Collection of scientific papers*, 2(64), 157–160. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.157>
14. Penkin, Yu. M., Katrich, V. A., Nesterenko, M. V., Berdnik, S. L., & Pshenichnaya, S. V. (2020). Impedance Synthesis of Plane Diffraction Vibrator Arrays. *Progress In Electromagnetics Research M*, 89, 31–41. <https://doi.org/10.2528/PIERM19080905>
15. Teplyakov, I. Yu. (2019). Modelling of the metal corrugated-rod antenna with transverse radiation. *Herald of Khmelnytskyi national university*, 3(273), 109–115. URL: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/20-6.pdf>
16. Teplyakov, I., Hoblyk, V., Liske, O., Gado, I., Maslakov, S., & Pylypiak, I. (2018). Synthesis of Plasma Corrugated-Rod Antenna for Multi-Gigabit Wireless Technology. *Internet of Things (IoT) and Engineering Applications*, 3(1), 34–43. <https://doi.org/10.23977/iotea.2017.31004>
17. Uqaili, J. A., Limei, Q., Memon, K. A., Bilal, H. M., Memon, S., Khan, H. A., Uqaili, R. S., & Soomro, F. B. (2022). Research on Spoof Surface Plasmon Polaritons (SPPs) at Microwave Frequencies: a Bibliometric Review. *Plasmonics*, 17(3), 1203–1230. <https://doi.org/10.1007/s11468-022-01613-y>

I. Yu. Teplyakov, I. V. Gado

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

IMPROVED PROBLEM-SOLVING TECHNIQUE FOR CORRUGATED-ROD STRUCTURE ANALYSIS

The paper introduces the improved problem-solving technique for analyzing the electrodynamic characteristics of the impedance corrugated-rod structure using the method of induced electromotive forces. During the research, the model of a corrugated-rod structure has been used, where a system of cylindrically located dipoles replaces cylindrical metallic radial inhomogeneities. The authors investigated options for the mutual placement of dipoles in a three-dimensional system of a corrugated-rod structure and corresponding mathematical equations for calculating the real and imaginary parts of the mutual impedance. The software has been developed using the interpreted high-level object-oriented programming language Python to automate the solution of corrugated-rod structure analysis based on the proposed method. The current and voltage matrix of the three-dimensional dipole system, which models the investigated corrugated-rod structure in this paper, has been calculated. In addition, the influence of the current and voltage matrix dimension of the corrugated-rod structure model on the calculating results of the amplitude-normalized radiation patterns in the plane of the electric field has been investigated. The authors have revealed that the calculating results of the electric field in the far zone obtained in this paper are similar to the known ones, obtained theoretically based on the known approach of calculating the matrix of self and mutual impedances by the method of induced electromotive forces and confirmed experimentally. The proposed technique usage enabled significant reducing the duration of the self and mutual impedance matrix calculation. Moreover, increasing dimension of the current and voltage matrix is observed to lead to decreasing the side lobes level on the amplitude-normalized radiation pattern, and the level of the main lobe goes towards the normal to the main axis of the corrugated-rod structure. The paper provides practical recommendations for the application of the proposed method of calculating the system of equations for finding the real and complex values of the self and mutual impedances of the three-dimensional dipoles system in the model of the corrugated-rod structure, as well as taking into account the internal impedance of the emitters power source.

Keywords: impedance structure; modeling of electromagnetic characteristics; mutual impedance; radiation pattern.