УДК 621.396:621.314 DOI: https://doi.org/10.30837/IYF.IRTTPI.2024.37

ПЕРЕДАЧА ПОТУЖНОСТІ МІЖ ДВОМА АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ

Алєксєєв В.О.
Науковий керівник – д.т.н., проф. Грецьких Д.В.
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. КРіСТЗІ,
м. Харків, Україна
e-mail: vasyl.alieksieiev@nure.ua

In previous studies, the author developed a nonlinear mathematical model for assessing the electromagnetic aspect of wireless power transfer (WPT) systems. This model treats the WPT system, encompassing both the transmitting and receiving subsystems, as a single multi-input antenna system with nonlinear properties. The reliability of the results derived stems from numerical solutions of boundary problems in electrodynamics in a rigorous formulation and the application of widely tested known methods of antenna theory with nonlinear characteristics. This study also includes a comparative analysis with selected theoretical data from existing literature to verify the accuracy of the results obtained.

Інтерес до створення систем безпровідної передачі енергії (БПЕ) постійно зростає у зв’язку з інтенсивним розвитком різних технологій БПЕ [1]. До них відносяться БПЕ сфокусованим мікрохвильовим променем на значні відстані, БПЕ на малі відстані індукційним або резонансним способами, перетворення електромагнітних полів (ЕМП), створюваних різними радіоелектронними засобами в постійний струм за допомогою ректен. Проблему створення і розвитку єдиного строгого підходу для розв'язання завдань всебічного аналізу та оптимізації систем БПЕ, у яких використовуються різні технології передавання енергії з урахуванням нелінійних властивостей їхніх компонентів, автор обговорював у низці праць [1–3]. Під час реалізації цього підходу розроблено нелінійну математичну модель електродинамічного рівня системи БПЕ, згідно з якою вся система БПЕ, що містить у загальному випадку передавальну підсистему, приймальну підсистему і систему всіляких розсіювачів, розглядається як єдина багатовходова антенна система з нелінійними характеристиками [1]. У цій роботі доведено універсальність розробленої в [1–3] математичної моделі, показано, що відомі лінійні моделі систем БПЕ можна розглядати як окремий її випадок.

Одержані співвідношення для оцінки ефективності передачі потужності на робочій частоті ω_0 через вільний простір за допомогою двох орієнтованих одна на іншу антенних решіток (АР) у складі яких відсутні елементи з нелінійними характеристиками. Розглядалася узагальнена структурна схема системи БПЕ, яка наведена у [1] при таких припущеннях: нелінійна

підсхема відключена; багатополюсники зовнішніх пристроїв $ЗП_T$ та $ЗП_R$ які, відповідно, описуються матрицями розсіяння $\mathbf{s}_{S}(\omega_0)$ та $\mathbf{s}_{L}(\omega_0)$ [1] безпосередньо підключені до багатополюсника випромінювальної структури системи БПЕ $ВС_{TR}$ з матрицею розсіяння $\mathbf{s}_{R_T}(\omega_0)$ [1]; збудження з боку інших систем відсутнє. Виходячи з вище наведених припущень схему взаємодії двох АР можна представити як на рис. 1.

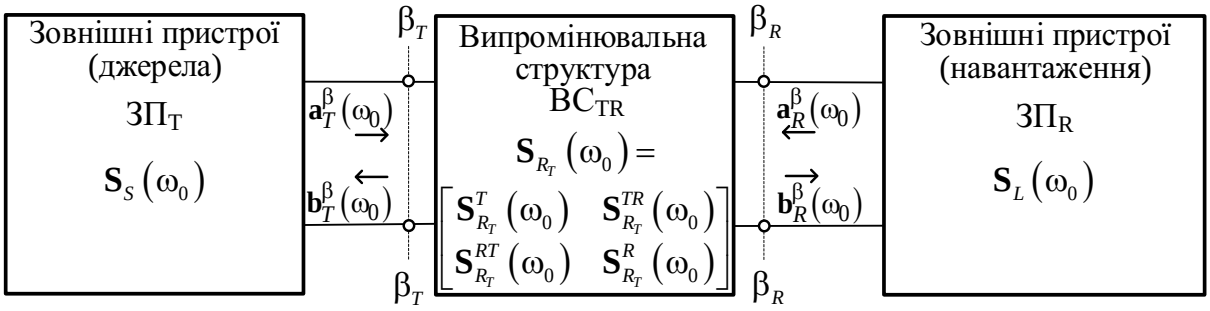

Рисунок 1 – Схема передачі потужності між антенними решітками

Вихідні рівняння такої системи БПЕ запишуться в наступному вигляді

$$\begin{aligned}\mathbf{b}_T^{\beta}(\omega_0) &= \mathbf{S}^{T}_{R_T}(\omega_0)\mathbf{a}_T^{\beta}(\omega_0) + \mathbf{S}^{TR}_{R_T}(\omega_0)\mathbf{a}_R^{\beta}(\omega_0),\\ \mathbf{b}_R^{\beta}(\omega_0) &= \mathbf{S}^{RT}_{R_T}(\omega_0)\mathbf{a}_T^{\beta}(\omega_0) + \mathbf{S}^{R}_{R_T}(\omega_0)\mathbf{a}_R^{\beta}(\omega_0).\end{aligned} \quad (1)$$

Вважалося, що вектор впливу $\mathbf{a}_T^{\beta}(\omega_0)$ заданий й в загальному випадку, приймальна АР може перебувати в довільній зоні випромінювання передавальної АР. Одержані співвідношення, що описують взаємний вплив однієї АР на іншу мають наступний вигляд:

$$\mathbf{b}_T^{\beta}(\omega_0) = \mathbf{S}_T^{\text{екв}}(\omega_0)\mathbf{a}_T^{\beta}(\omega_0),\ \ \mathbf{b}_R^{\beta}(\omega_0) = \mathbf{S}_R^{\text{екв}}(\omega_0)\mathbf{a}_R^{\beta}(\omega_0) \quad (2)$$

де

$$\mathbf{S}_T^{\text{екв}}(\omega_0) = \mathbf{S}^{T}_{R_T}(\omega_0) + \Delta\mathbf{S}^{T}_{R_T}(\omega_0), \Delta\mathbf{S}^{T}_{R_T}(\omega_0) = \mathbf{S}^{TR}_{R_T}(\omega_0)\left(\mathbf{S}_L(\omega_0) - \mathbf{S}^{R}_{R_T}(\omega_0)\right)^{-1}\mathbf{S}^{RT}_{R_T}(\omega_0),$$

$$\mathbf{S}_R^{\text{екв}}(\omega_0) = \mathbf{S}^{R}_{R_T}(\omega_0) + \Delta\mathbf{S}^{R}_{R_T}(\omega_0), \Delta\mathbf{S}^{T}_{R_T}(\omega_0) = \mathbf{S}^{TR}_{R_T}(\omega_0)\left(\mathbf{S}_L(\omega_0) - \mathbf{S}^{R}_{R_T}(\omega_0)\right)^{-1}\mathbf{S}^{RT}_{R_T}(\omega_0).$$

З (2) випливає, що при зближенні приймальної та передавальної АР відбувається зміна необхідних умов оптимального узгодження елементів кожної із АР. При цьому умови оптимального узгодження передавальних АР виявляються залежними від вибору навантажувального багатополюсника приймальної АР (його матриця розсіювання $\mathbf{s}_L(\omega_0)$). У свою чергу, умови оптимального узгодження елементів приймальних АР залежать від матриці розсіювання джерел $\mathbf{s}_S(\omega_0)$. Слід помітити, що елементи коригуючих матриць $\Delta\mathbf{s}^{T}_{R_T}(\omega_0)$ і $\Delta\mathbf{s}^{R}_{R_T}(\omega_0)$ пропорційні добуткам двох блоків $\mathbf{s}^{TR}_{R_T}(\omega_0)$, який описує передачу перевипроміненої потужності від приймальної АР до передавальної АР та блоку $\mathbf{s}^{RT}_{R_T}(\omega_0)$, який описує передачу по-

тужності від передавальної до приймальної АР. Тому елементи коригуючих матриць розсіювання порівняно швидко зменшуються при збільшенні відстані між решітками.

Одержані розрахункові співвідношення для розрахунку коефіцієнта передачі потужності між решітками, який визначається відношенням прийнятої потужності до потужності випромінювання:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}(\omega_0)}{P_{\text{вх}}(\omega_0)} = \frac{\mathbf{a}_T^{\beta *T}(\omega_0)\mathbf{S}_{RT}^{\text{екв}*T}(\omega_0)\left(\mathbf{E} - \mathbf{S}_R^{\text{екв}*T}(\omega_0)\mathbf{S}_{\text{R}}^{\text{екв}}(\omega_0)\right)\mathbf{S}_{RT}^{\text{екв}}(\omega_0)\mathbf{a}_T^{\beta}(\omega_0)}{\mathbf{a}_T^{\beta *T}(\omega_0)\left(\mathbf{E} - \mathbf{S}_T^{\text{екв}*T}(\omega_0)\mathbf{S}_T^{\text{екв}}(\omega_0)\right)\mathbf{a}_T^{\beta}(\omega_0)}. \quad (3)$$

Використовуючи зв'язок матриці розсіювання з матрицею опорів

$$\mathbf{Z}(\omega_0) = \left(\mathbf{E} - \mathbf{S}(\omega_0)\right)^{-1}\left(\mathbf{Z}(\omega_0) + \mathbf{E}\right),$$

було показано, що (3) збігається зі співвідношенням отриманим у роботі [4]. Висновки щодо отриманих результатів наступні:

- коефіцієнт передачі потужності представлений у вигляді пучка двох квадратичні ермітових форм, що дозволяє використовувати стандартні чисельні методи для знаходження умов оптимального узгодження елементів АР, оптимального АФР збудження передавальних АР і відповідних характеристик спрямованості;
- зміни геометричних і електричних параметрів АР, їх елементів, а також зміни параметрів навантажувального багатополюсника та багатополюсника джерел призводять до змін елементів матриць квадратичних форм;
- проведення серій оптимізаційних розрахунків при цілеспрямованому переборі параметрів АР і приєднаних до них багатополюсників дає можливість знайти верхню межу коефіцієнта передачі;
- робоча частота, габарити решіток і відстані між ними можуть розглядатися як заздалегідь задані обмеження;
- порівняно легко може бути чисельно промодельований вплив статистичного розкиду різних параметрів, а також відмов елементів АР.

Список використаних джерел:

1. Алєксєєв В. О, Грецьких Д. В, Гавва Д. С, Лихограй В. Г. Технології безпровідної передачі енергії // Радіотехніка. 2022. № 211. С. 114–132.

2. Applying the Electrodynamic Approach to Modeling Wireless Power Transmission Systems / Alieksieiev V. et al. // 26th International Seminar/ Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory. 2021. P.111-115.

3. Математична модель антени з нелінійними характеристиками для розрахунку електромагнітного поля у зоні Френеля / Грецьких Д. В. та ін. // Radioelectronic and Computer Systems. 2021. № 4 (100). С. 46–58.

4. Сазонов Д. М. Многоэлементные антенные системы. Матричный подход // Радиотехника. 2015. 144 с.