

УДК 621.317

АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ В МЕТОДІ НІКОЛСОНА-РОСА-ВЕЙРА З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАНЦЮГОВОГО ПРАВИЛА ДЛЯ НЕЯВНИХ ПОХІДНИХ

Гапон Н.Я.

e-mail: nataliia.zaichenko@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., доц., Зайченко О.Б.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ПЕЕА
м. Харків, Україна

This work is devoted to uncertainty analysis in the Nicolson-Ross-Weir method using implicit derivatives. The report presents a set of mathematical formulas for calculating uncertainty according to the chain rule, which describe: partial derivatives of parameters, expressions for the auxiliary parameter (2), dependences of the sensitivities of quantities on derivatives and variables, related to the analysis of errors and uncertainties during the measurement of dielectric permittivity by the Nicholson-Ross-Weir method.

Фахівці різних галузей промисловості, зокрема у сфері неруйнівного контролю та дефектоскопії, зацікавлені у глибшому дослідженні властивостей матеріалів, з якими вони працюють. Це дає можливість скоротити тривалість етапів проєктування, підвищити ефективність вхідного контролю, забезпечити кращий моніторинг технологічних процесів і покращити систему контролю якості продукції.

Кожен матеріал характеризується власним набором електричних параметрів, що визначаються його діелектричними властивостями. Вимірювання характеристик діелектричних матеріалів може надати важливу інформацію для багатьох галузей науки і техніки. Зокрема, такі дослідження використовуються для виявлення та оцінювання дефектів у виробках, наприклад для визначення параметрів дефектів філамента під час 3D-друку.

Для визначення комплексної діелектричної та магнітної проникностей матеріалів за вимірними S-параметрами широко використовується метод Ніколсона-Роса-Вейра. Оскільки метод Ніколсона-Роса-Вейра базується на непрямих розрахунках, будь-які похибки вимірювання коефіцієнтів відбиття та проходження, нестабільність вимірювальної апаратури, неточності калібрування або геометричних параметрів зразка можуть суттєво впливати на кінцеві значення електромагнітних параметрів. Оцінювання невизначеності дозволяє проаналізувати чутливість алгоритму до похибок вхідних даних та підвищити надійність інтерпретації вимірювань. Це особливо важливо при дослідженні матеріалів у НВЧ-діапазоні, де навіть незначні похибки можуть призводити до значних відхилень у розрахованих значеннях параметрів.

Набір математичних формул для обчислення невизначеності за ланцюговим правилом, що описують: часткові похідні параметрів, вирази для допоміжного параметра (2), залежності чутливостей величин від похідних та змінних, стосуються аналізу похибок і невизначеностей під час вимірювання діелектричної проникності методом Ніколсона-Роса-Вейра наведено нижче.

Термін похідна за ланцюговим правилом відноситься до правила диференціювання складної функції у математичному аналізі. Це правило дозволяє знаходити похідну функції, яка складається з інших функцій. Похідна, обчислена за ланцюговим правилом, дає змогу подати диференціювання складної функції як послідовність диференціювань її внутрішньої та зовнішньої функцій.

$$\frac{\partial \varepsilon_r}{\partial |S_{21}|} = \frac{e^{i\theta_{21}}}{\Lambda}, \quad \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial \theta_{21}} = i \frac{S_{21}}{\Lambda}, \quad (1)$$

де $|S_{11}|$ та $|S_{21}|$, θ_{11} та θ_{21} – величини та фази коефіцієнтів розсіювання S_{11} та S_{21} відповідно; Γ – коефіцієнт відбиття; P – коефіцієнт розповсюдження; ε_r – діелектрична проникність, Λ – допоміжний параметр

$$\Lambda = \frac{\partial S_{21}}{\partial \Gamma} \frac{\partial \Gamma}{\partial \varepsilon_r} + \frac{\partial S_{21}}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial \varepsilon_r}. \quad (2)$$

Часткові похідні у виразі (2) для Λ можуть бути записані як

$$\frac{\partial S_{21}}{\partial \Gamma} = -\frac{2\Gamma(1-P^2)P}{(1-\Gamma^2P^2)^2}, \quad \frac{\partial S_{21}}{\partial P} = -\frac{(1-P^2)(1+\Gamma^2P^2)P}{(1-\Gamma^2P^2)^2}, \quad (3)$$

де k_0 – хвильове число; d – товщина зразка,

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial \varepsilon_r} = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}(1+\sqrt{\varepsilon_r})^2}, \quad \frac{\partial P}{\partial \varepsilon_r} = -\frac{ik_0d}{2\sqrt{\varepsilon_r}}P. \quad (4)$$

Частотна залежність невизначеності вимірювання діелектричної проникності показана на рис.1.

На графіку зображено залежність невизначеності діелектричної проникності від частоти. По осі абсцис відкладено частоту в діапазоні приблизно 50 ГГц – 150 ГГц, а по осі ординат – невизначеність діелектричної проникності. Крива має коливальний характер із поступовим зменшенням середнього рівня невизначеності.

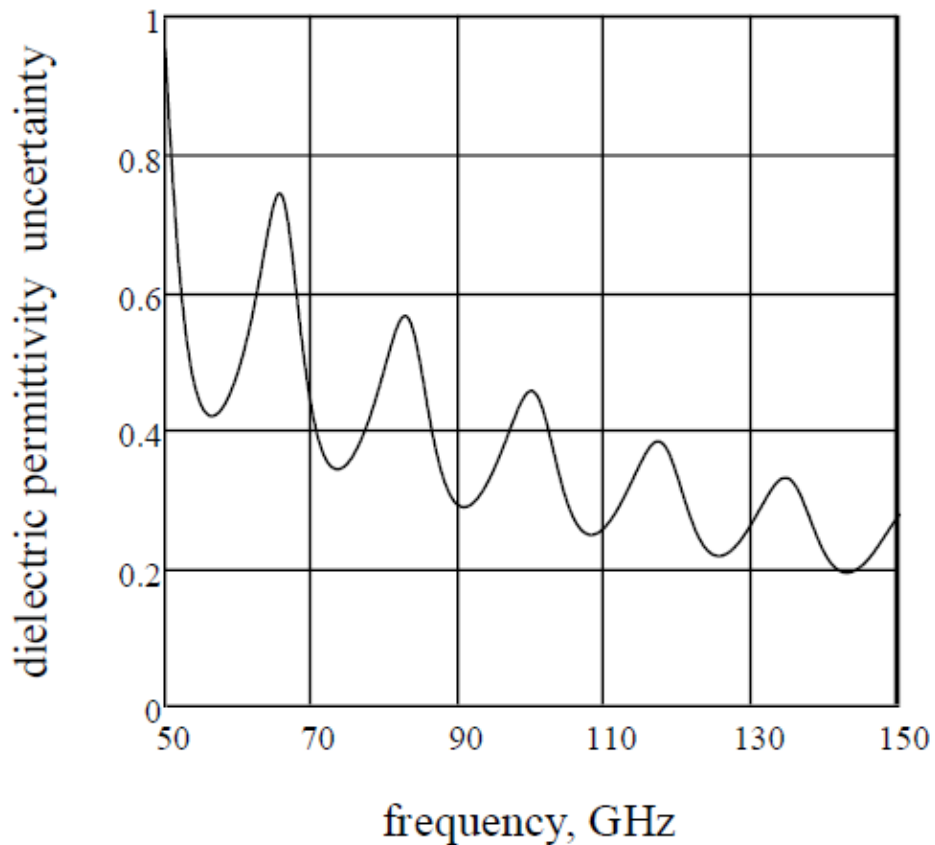


Рис.1 Частотна залежність невизначеності вимірювання діелектричної проникності

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості використання розробленого підходу в системах контролю якості матеріалів, неруйнівного тестування, а також у приладах реального часу, де необхідна висока точність при наявності шумів вимірювання.

Список використаних джерел:

- 1.Hasar U. C., Ozbek Y., Ozturk H., Korkmaz H., Hudlička, M. Application of the Kalman Filter/Smoother for accurate material characterization of planar dielectric samples by using free-space measurements at sub-THz frequencies. // Measurement. – 2023. – 211, 112577. – P. 1-12.
- 2.Filbert J. T., Dvorsky M. R., Al Qaseer M. T., Zoughi R. Unambiguous Determination of Complex Dielectric and Magnetic Materials Properties Using Multi-Length Nicolson-Ross-Weir Approach // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2025. – Vol.74. – P.1-12.