https://doi.org/10.33136/stma2026.01.049
УДК 537.226:629.7
ISSN 2617-5525 (Print)
ISSN 2617-5533 (Online)
Creative Commons Attribution 4.0

Канд. фіз.-мат. наук В. В. Хардіков, https://orcid.org/0000-0003-0339-7616,
д-р філософії Г. Г. Осіновий, https://orcid.org/0000-0002-6305-7835,
канд. техн. наук К. В. Козіс, https://orcid.org/0000-0002-3739-9559,
канд. техн. наук І. І. Деревянко, https://orcid.org/0000-0001-8642-2826,
д-р філософії Д. С. Калиниченко, https://orcid.org/0000-0002-8687-0255,
С. О. Вінніченко, https://orcid.org/0009-0006-0977-4717

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РОЗРАХУНКОВА МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВИРОБІВ У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Розглянуто експериментально-розрахунковий підхід до визначення та прогнозування електродинамічних характеристик діелектричних виробів у міліметровому діапазоні довжин хвиль. Актуальність дослідження зумовлена широким застосуванням діелектричних матеріалів у радіотехнічних, телекомунікаційних, вимірювальних і сенсорних системах, а також підвищенням вимог до точності визначення їхніх електрофізичних параметрів зі зростанням робочої частоти. Основну увагу приділено визначенню комплексної діелектричної проникності за результатами двоантенних вимірювань у вільному просторі з подальшим чисельним опрацюванням і електродинамічним моделюванням. Проаналізовано особливості застосування контактних, коаксіальних, хвилевідних, резонансних і вільнопросторових методів визначення параметрів діелектриків. Установлено, що для дослідження готових виробів складної геометрії методи у вільному просторі мають переваги, оскільки не потребують розміщення об'єкта всередині хвилевідної або резонансної структури та дають змогу досліджувати зразки значних розмірів. Запропонований підхід передбачає вимірювання комплексних характеристик сигналу за допомогою векторного аналізатора кіл, нормування результатів відносно опорного вимірювання та врахування впливу антен, геометрії експериментальної системи, паразитних відбиттів, утрат у тракті та точності позиціонування об'єкта. Розглянуто можливість визначення електрофізичних параметрів шляхом розв'язання оберненої електродинамічної задачі із залученням чисельного моделювання. Поєднання експериментальних даних, геометричних параметрів виробу та його електродинамічної моделі дає змогу підвищити достовірність оцінювання параметрів і прогнозувати характеристики виробів у заданому частотному діапазоні. Достовірність отриманих результатів передбачено оцінювати шляхом незалежної експериментальної перевірки. Запропонована методика може бути використана для дослідження діелектричних матеріалів і виробів, для яких виготовлення спеціалізованих зразків або застосування стандартних хвилевідних і резонансних методів є обмеженим.

Ключові слова: ракетно-космічна й авіаційна техніка, діелектричні матеріали, комплексна діелектрична проникність, міліметровий діапазон, вільнопросторові вимірювання, векторний аналізатор кіл, електродинамічне моделювання.

The paper investigates an experimental and computational approach to the determination and prediction of the electrodynamic characteristics of dielectric products in the millimeter wave band. The relevance of the study is associated with the widespread use of dielectric materials in various radio engineering, telecommunication, measurement, and sensor systems, as well as with more and more demanding requirements for the accuracy in determining the electromagnetic parameters of these products at higher operating frequencies. Particular attention is paid to the determination of complex permittivity based on the results of free-space measurements using two antennas, followed by numerical data processing and electromagnetic simulation. The paper analyzes the specific features of the contact, coaxial, waveguide, resonant, and free-space methods for determining dielectric properties. It demonstrates that free-space techniques are advantageous for investigating complex-geometry finished products because they do not require the placement of the object inside a waveguide or a resonant structure and allow examination of relatively large-sized samples. The proposed approach involves measuring signal characteristics with a vector network analyzer, normalizing the results to the reference measurement, and accounting for the influence of antenna parameters, measurement system geometry, parasitic reflections, transmission-path losses, and object placement accuracy. The paper discusses the feasibility of determining electromagnetic parameters by solving an inverse electromagnetic problem and conducting a numerical simulation. Combining experimental data with the geometric parameters

of a product and its electromagnetic model enables the improvement of parameter estimation accuracy and the prediction of product characteristics over a specified frequency range. Independent experimental verification is considered a technique to assess the reliability of the results. The proposed approach can be practical for investigating dielectric materials and products for which the fabrication of specialized test specimens or the use of conventional waveguide and resonant measurement techniques is technically difficult or limited.

Keywords: rocket, space and aircraft technologies, dielectric materials, complex permittivity, millimeter wave band, free-space measurements, vector network analyzer, electromagnetic simulation.

Вступ

Діелектричні матеріали та вироби з них широко застосовують у радіотехнічних, телекомунікаційних, вимірювальних і сенсорних системах. Зі зростанням робочих частот особливого значення набуває достовірне визначення їхніх електродинамічних характеристик у міліметровому діапазоні. Йдеться зокрема про комплексну діелектричну проникність. Ці параметри безпосередньо впливають на характеристики радіотехнічних виробів [1].

Визначення електрофізичних параметрів діелектриків у міліметровому діапазоні має ряд специфічних особливостей. Зменшення довжини хвилі підвищує чутливість результатів до геометричних розмірів зразка, його положення у вимірювальній системі, неоднорідності матеріалу та стану поверхні. Додатковими джерелами похибок можуть бути дифракційні ефекти, паразитні відбиття й особливості просторового розподілу електромагнітного поля. Тому вибір методу вимірювання, конфігурації експериментальної системи та процедури оброблення даних є важливою складовою достовірного визначення параметрів матеріалу [1, 2].

Для визначення комплексної діелектричної проникності використовують контактні та коаксіальні методи, хвилевідні методи, резонансні методи, а також методи вимірювання у вільному просторі [1–3]. Вибір конкретного підходу визначають робочим частотним діапазоном, електрофізичними властивостями матеріалу, геометрією зразка та вимогами до точності. Контактні методи, зокрема метод відкритого кінця коаксіальної лінії, забезпечують широкосмугові вимірювання та потребують відносно невеликої області досліджуваного матеріалу. Водночас результат вимірювань істотно залежить від геометрії зонда, його контакту зі зразком і потребує окремої процедури калібрування [3, 4]. Хвилевідні методи дають змогу визначати комплексні параметри матеріалу за вимірюваннями коефіцієнтів проходження та відбиття, проте в міліметровому діапазоні підвищують вимоги до геометрії зразка, його встановлення та мінімізації повітряних зазорів [1, 5].

Резонансні методи забезпечують високу чутливість, їх широко використовують для дослідження матеріалів з низьким рівнем утрат, зокрема за дискретними резонансними частотами. Для міліметрового діапазону застосовують, зокрема, циліндричні та дискові резонатори, резонатори типу whispering-gallery та резонатори Фабрі–Перо [2, 6]. Водночас використання резонансних і хвилевідних структур зазвичай передбачає підготовку зразка певної форми та розмірів з високими вимогами до його розмірів і геометричної точності. Останнє може бути незручним або неможливим для готових виробів складної геометрії.

Альтернативою є методи вимірювання у вільному просторі, у яких досліджуваний об’єкт розміщують між передавальною та приймальною антенами. Такі системи дають змогу працювати зі зразками значних розмірів і досліджувати матеріали без їх розміщення всередині хвилеводу або резонатора. Особливо придатними вони є для міліметрового діапазону, у якому виготовлення та використання малорозмірних хвилевідних і резонансних структур стає технологічно складнішим [1]. При використанні векторного аналізатора кіл результати можуть бути отримані в комплексній формі, що дозволяє використовувати одночасно амплітудну та фазову інформацію про сигнал, який пройшов через досліджуваний об’єкт. На основі таких даних комплексну діелектричну проникність можна визначати шляхом розв’язання відповідної оберненої електродинамічної задачі [1, 7].

Водночас практична реалізація вимірювань у вільному просторі для випадку

міліметрового діапазону вимагає врахування характеристик антен, геометрії вимірювальної системи, умов формування електромагнітного поля, паразитних відбиттів, утрат у тракті передачі сигналу та точності позиціонування об'єкта. Тому виміряний сигнал не можна розглядати як характеристику лише досліджуваного матеріалу або виробу. Для отримання фізично змістовних результатів необхідні калібрування вимірювальної системи та нормування результатів відносно відповідного опорного вимірювання [1].

Таким чином, визначення характеристик діелектричних виробів у міліметровому діапазоні доцільно розглядати як комплексну експериментально-розрахункову задачу, в якій результати вимірювання електромагнітних характеристик поєднуються з геометричними параметрами об'єкта та його електродинамічною моделлю. Особливо актуальним такий підхід є у випадках, коли повна інформація про матеріал, конструкцію виробу або умови його подальшого застосування є недоступною, а можливості виготовлення спеціалізованих зразків і проведення повного комплексу вимірювань обмежені.

Метою роботи є обґрунтування експериментально-розрахункової методики визначення та прогнозування електродинамічних характеристик діелектричних виробів у міліметровому діапазоні на основі двоантенних вимірювань у вільному просторі, чисельного моделювання та незалежної експериментальної перевірки отриманих результатів.

Аналіз методів визначення електродинамічних характеристик діелектричних матеріалів і виробів

Для визначення електродинамічних характеристик діелектричних матеріалів у міліметровому діапазоні використовують контактні, хвилевідні, резонансні та вільнопросторові методи [1, 3–7]. Вибір конкретного методу залежить від властивостей матеріалу, робочого частотного діапазону, геометрії зразка та вимог до точності.

Контактні методи, зокрема метод відкритого кінця коаксіальної лінії, дозволяють проводити широкосмугові вимірювання без виготовлення зразка спеціальної форми. При цьому результат залежить від умов контакту з поверхнею та процедури калібрування вимірювальної системи [4]. Хвилевідні методи ґрунтуються на вимірюванні проходження та відбиття електромагнітної хвилі при розміщенні зразка у хвилевідному тракті. Вони можуть забезпечувати визначення комплексної діелектричної проникності в широкому частотному діапазоні, однак вимагають відповідності геометрії зразка параметрам хвилеводу та достатньої точності його встановлення [3, 5].

Резонансні методи використовують зміну резонансної частоти та добротності резонансної структури під впливом досліджуваного матеріалу. Їхньою перевагою є висока чутливість, зокрема під час дослідження малих діелектричних утрат [2, 3]. Водночас такі методи також передбачають визначену геометрію зразка та його положення відносно резонансної структури. Тому хвилевідні та резонансні методи найприродніше застосовувати для спеціально підготовлених зразків з контрольованими геометричними параметрами.

Для готових виробів складної форми можливість їх адаптації до умов хвилевідного або резонансного вимірювання може бути обмеженою. У такому випадку доцільним є застосування вільнопросторових методів, які дозволяють досліджувати об'єкт без його розміщення всередині хвилевідної чи резонансної структури [1, 6, 7]. Вони можуть бути реалізовані для вимірювання проходження або відбиття електромагнітної хвилі залежно від поставленого завдання.

Для дослідження діелектричних матеріалів і виробів у цій роботі обрано двоантенну схему вимірювання комплексного коефіцієнта передачі. Випромінювальну та приймальну антени розміщують по різні боки від досліджуваного об'єкта, а сигнал, що проходить крізь вимірювальний стенд, реєструє векторний аналізатор кіл. Таку схему використовують, зокрема, для вільнопросторового характеризування діелектриків у міліметровому діапазоні [1, 6, 7].

Основною безпосередньо вимірюваною величиною є комплексний параметр $S_{21}(f)$. Тут ураховано, що комплексний коефіцієнт передачі є функцією частоти випромінювання f. Для зменшення впливу антенно-фідерного тракту та частотної нерівномірності системи передбачено опорне вимірювання без досліджуваного об'єкта. За незмінної

геометрії вимірювальної системи відносну характеристику визначають як

$$T_{rel} = \frac{S_{21}^{obj}(f)}{S_{21}^{ref}(f)}, \quad (1)$$

де $S_{21}^{obj}(f)$ – комплексний коефіцієнт передачі вимірювального тракту, коли є досліджуваний об'єкт; $S_{21}^{ref}(f)$ – коефіцієнт передачі у відповідному опорному вимірювальному тракті, коли немає зразка.

Використання комплексного коефіцієнта передачі дозволяє одночасно враховувати амплітудну та фазову складові сигналу. Отримані дані можуть бути використані як для визначення електродинамічних параметрів плоского зразка, так і для подальшої перевірки розрахункової моделі готового виробу. При цьому опорне вимірювання зменшує вплив характеристик вимірювального тракту, але не усуває повністю систематичні похибки, пов'язані з геометрією та просторовими умовами експерименту [1].

Таким чином, для подальшого розроблення методики обрано двоантенну вільнопросторову схему вимірювання комплексного коефіцієнта передачі з опорним вимірюванням за незмінної геометрії системи. Її принциповою перевагою для поставленого завдання є можливість досліджувати як плоскі зразки матеріалу, так і готові вироби без зміни основного принципу вимірювання. Це створює основу для послідовного визначення параметрів матеріалу та їх подальшого використання під час електродинамічного моделювання виробу.

Подальший розгляд зосереджено на побудові експериментально-розрахункової послідовності, у якій результати вимірювання плоского зразка використовують для визначення параметрів матеріалу, а отримані параметри – для розрахунку та незалежної експериментальної перевірки характеристик готового виробу.

Експериментально-розрахунковий підхід

Запропонований підхід ґрунтується на послідовному поєднанні експериментального визначення електродинамічних параметрів матеріалу та чисельного моделювання виробу, виготовленого з цього матеріалу. Така послідовність дозволяє поділити визначення властивостей матеріалу та прогнозування електромагнітних характеристик виробу заданої геометрії.

На першому етапі досліджують плоский зразок матеріалу з відомою геометрією. За результатами вимірювання його комплексного коефіцієнта передачі визначають комплексну діелектричну проникність $\varepsilon^*(f) = \varepsilon'(f) - j\varepsilon''(f)$ (j – тут і далі уявна одиниця), яка забезпечує відповідність розрахункової та експериментальної характеристик зразка.

При цьому результат вимірювання у вільному просторі визначають не лише властивості матеріалу, а й реальна конфігурація електромагнітного поля в області зразка. Зокрема, просторовий розподіл поля може відрізнятися від ідеалізованого припущення про однорідну плоску хвилю. Для оцінювання впливу таких особливостей доцільними є використання зразків матеріалів з відомими електродинамічними параметрами та порівняння експериментальних і розрахункових характеристик.

На другому етапі визначену для матеріалу $\varepsilon^*(f)$ використовуватимуть без додаткового підбору як параметр електродинамічної моделі реального виробу. У модель вводять його фактичні геометричні характеристики, після чого розраховують відповідну електромагнітну характеристику. Для найпростішого випадку нею є комплексний коефіцієнт передачі $S_{21}^{calc}(f)$, який порівнюють з незалежно отриманою експериментальною характеристикою $S_{21}^{\exp}(f)$. Відзначимо, що залежно від складності моделювання остання характеристика може вимагати додаткового оброблення з урахуванням формули (1).

Порівняння розрахункових і експериментальних даних за амплітудою та фазою дозволяє оцінити, наскільки визначені параметри матеріалу та побудована модель відтворюють електромагнітну поведінку реального виробу.

Таким чином, методика реалізує послідовність, у якій на першому етапі оцінюємо комплексну діелектричну проникність за результатами вимірювання комплексного коефіцієнта передачі плоского зразка, на другому – з використанням отриманого значення визначаємо комплексний коефіцієнт проходження виробу методом математичного моде-

лювання, а на останньому етапі порівнюємо отримане теоретичне прогнозування з тим, що спостерігається в експерименті.

Причому принциповою умовою є відсутність додаткового підбору $\varepsilon^*(f)$ за результатами вимірювання готового виробу. Це забезпечує незалежність експериментальної перевірки та дозволяє розглядати визначені параметри як характеристики матеріалу, придатні для подальшого прогнозування електромагнітних характеристик виробів заданої геометрії.

Визначення електродинамічних параметрів матеріалу за плоским зразком

Визначають комплексну діелектричну проникність матеріалу на плоскому зразку з відомими геометричними характеристиками. Така форма зразка дозволяє відокремити завдання визначення властивостей матеріалу від впливу складної геометрії готового виробу.

Для зразка виконують опорне вимірювання без діелектрика та вимірювання, якщо він є. На їх основі формують нормовану комплексну характеристику проходження за формулою (1). Використання цієї комплексної характеристики дозволяє одночасно враховувати зміни амплітуди та фази електромагнітного сигналу при проходженні через зразок. Це дає змогу використовувати інформацію про амплітудні та фазові зміни електромагнітного поля під час взаємодії з матеріалом при визначенні його параметрів.

Визначають параметри матеріалу шляхом порівняння експериментальної характеристики з результатами електродинамічного розрахунку для плоского шару з відповідною геометрією. Матеріал у розрахунковій моделі описують комплексною діелектричною проникністю $\varepsilon^*(f) = \varepsilon'(f) - j\varepsilon''(f)$. Параметри моделі визначають таким чином, щоб розрахована комплексна характеристика проходження відповідала експериментальній.

При цьому конкретний спосіб визначення параметрів і реалізації електродинамічного розрахунку може залежати від досліджуваного матеріалу, частотного діапазону та доступних обчислювальних засобів. У межах запропонованої методики принциповим є встановлення відповідності між виміряною характеристикою плоского зразка та параметрами його електродинамічної моделі, тоді як конкретний алгоритм розв'язання оберненої задачі може бути обраний відповідно до поставленої задачі.

Окремо передбачено дослідження зразків з відомими або незалежно визначеними електродинамічними характеристиками. Порівняння для таких зразків експериментальних даних з результатами розрахунку дозволяє оцінити не лише процедуру визначення параметрів матеріалу, а й вплив особливостей реальної вимірювальної конфігурації, зокрема просторового розподілу електромагнітного поля в області зразка. Отримана таким чином інформація може бути використана для врахування систематичних відмінностей між експериментальною системою та її ідеалізованою електродинамічною моделлю.

Отримані для плоского зразка параметри надалі використовують без додаткової адаптації для моделювання реального виробу з цього матеріалу. Таким чином, визначення властивостей матеріалу та прогнозування характеристик виробу залишаються розділеними, що забезпечує незалежність подальшої експериментальної перевірки моделі.

Прогнозування електродинамічних характеристик виробу заданої геометрії

На другому етапі визначені за плоским зразком електродинамічні параметри матеріалу використовують для моделювання реального виробу. На відміну від першого етапу, на якому розглядають зразок простої та контрольованої геометрії, у розрахункову модель уводять фактичну форму, розміри й інші геометричні особливості виробу, що можуть впливати на його взаємодію з електромагнітним випромінюванням.

Електродинамічний розрахунок виконують для тієї самої конфігурації взаємодії з випромінюванням, у якій передбачено експериментальне дослідження виробу. Результатом є прогнозована характеристика проходження $S_{21}^{calc}(f)$ або інша характеристика, що відповідає безпосередньо вимірюваній величині.

Принциповою умовою є використання визначеної на попередньому етапі діелектричної проникності без додаткового підбору за результатами вимірювання самого виробу. Таким чином, зміну електромагнітної

характеристики порівняно з плоским зразком визначають параметри матеріалу та геометрія виробу, а не повторна ідентифікація матеріалу.

Для експериментальної перевірки реальний виріб досліджують у відповідній просторовій конфігурації, після чого отриману характеристику порівнюють з розрахунковою $S_{21}^{calc}(f) \to S_{21}^{\exp}(f)$.

Порівнювати можна за амплітудою, фазою або їхньою сукупністю. Виявлені розбіжності можуть бути зумовлені невизначеністю вимірюваних параметрів матеріалу, неточністю геометричної моделі, позиціонуванням виробу, неоднорідністю матеріалу, відмінностями між реальною та ідеалізованою конфігурацією електромагнітного поля й іншими факторами. Тому порівняння розрахункової та експериментальної характеристик є одночасно перевіркою адекватності моделі виробу та перенесення визначених параметрів матеріалу на його реальну геометрію.

Таким чином, зміна геометрії виробу не вимагає повторного визначення електродинамічних параметрів матеріалу: для нового об'єкта змінюють розрахункову модель, тоді як визначені характеристики матеріалу залишаються вихідними параметрами розрахунку. Це створює можливість використовувати методику як для аналізу готових виробів, так і для прогнозування їхніх електромагнітних характеристик на етапі проєктування.

Експериментальна перевірка й оцінювання адекватності моделі

Завершальним етапом запропонованого підходу є експериментальна перевірка результатів електродинамічного моделювання реального виробу. Її принципова відмінність від процедури визначення параметрів матеріалу полягає в тому, що під час такої перевірки матеріальні параметри не коригують за результатами вимірювання виробу.

Для заданої геометрії виробу та визначених на попередньому етапі параметрів комплексної діелектричної проникності розраховують характеристику його взаємодії з електромагнітним випромінюванням. Отриманий результат порівнюють з експериментально виміряною характеристикою за однакових частотних і геометричних умов.

Основним об’єктом порівняння є комплексна характеристика проходження. Залежно від особливостей досліджуваного виробу та якості експериментальних даних можна аналізувати як амплітудну, так і фазову складові:

$$\begin{gathered} \left|S_{21}^{calc}(f)\right| \to \left|S_{21}^{\exp}(f)\right|; \\ \arg\left(S_{21}^{calc}(f)\right) \to \arg\left(S_{21}^{\exp}(f)\right). \end{gathered} \quad (2)$$

При цьому оцінювання відповідності не зводять до порівняння окремого значення на одній частоті. Характерною ознакою адекватності моделі є відтворення основних особливостей частотної залежності, зокрема рівня сигналу, фазового зсуву, положення характерних максимумів і мінімумів і їхньої зміни в межах досліджуваного частотного діапазону.

У випадку виявлення розбіжностей між розрахунковими й експериментальними результатами їх аналіз необхідно виконувати з урахуванням усіх елементів експериментально-розрахункового ланцюжка. Причинами розбіжностей можуть бути неточність визначення матеріальних параметрів, відмінність реальної геометрії від розрахункової, неоднорідність матеріалу, похибка позиціонування, невраховані елементи конструкції, а також особливості формування електромагнітного поля у вимірювальній системі.

Таким чином, порівняння розрахункової й експериментальної характеристик використовують не лише для оцінювання точності чисельної моделі, а і як комплексну перевірку запропонованої експериментально-розрахункової методики. Особливо важливим є випадок, коли розрахункова характеристика реального виробу отримана на основі параметрів матеріалу, визначених незалежно на плоскому зразку. Відповідність розрахунку й експерименту в такому випадку підтверджує можливість перенесення визначених електродинамічних параметрів на виріб іншої геометрії та використання їх для прогнозування його характеристик.

Кількісні критерії оцінювання відповідності можна визначати залежно від конкретного матеріалу, частотного діапазону, геометрії виробу та характеристик вимірювальної

системи. Тому в межах загальної методики доцільно використовувати сукупність амплітудних, фазових і інших доступних експериментальних характеристик, а конкретні критерії відповідності визначати відповідно до поставленого завдання.

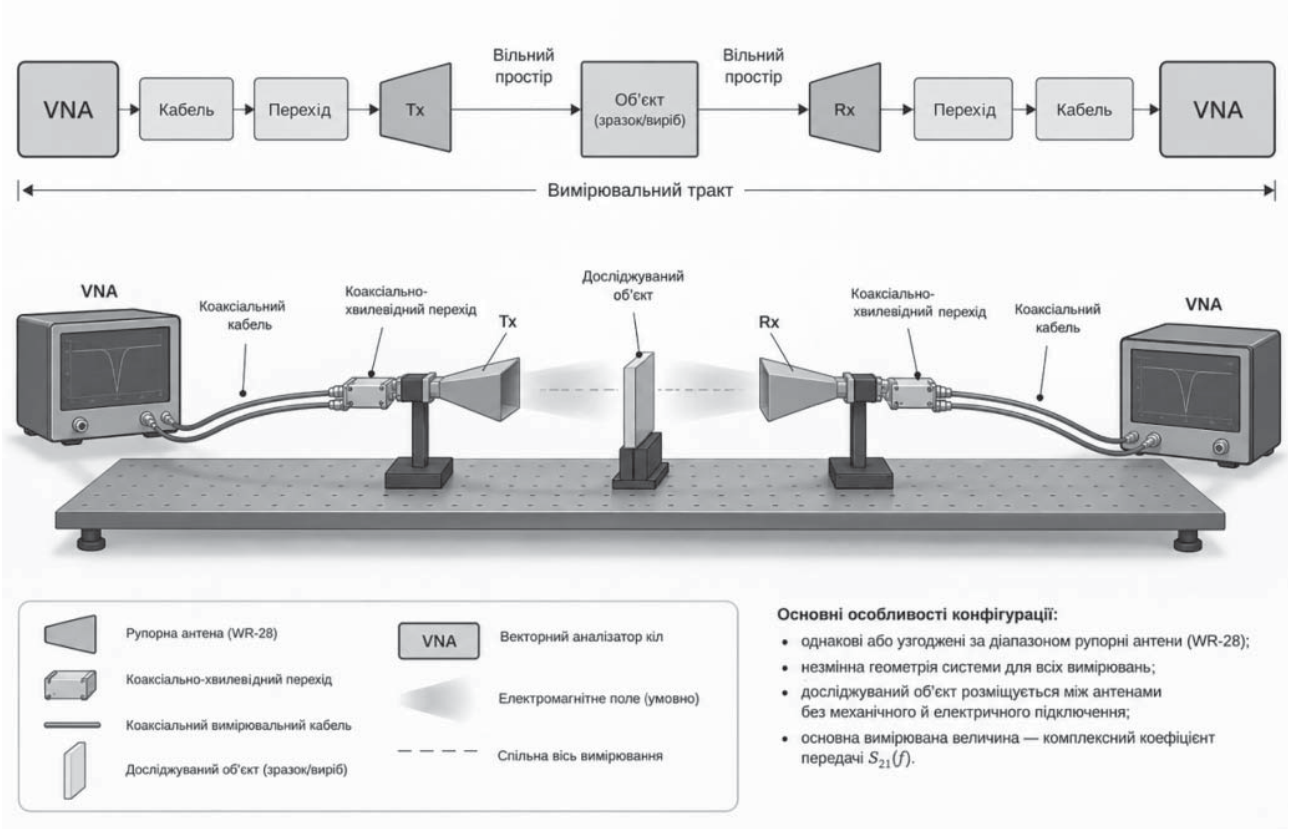
Експериментальна схема та процедура вимірювань

Вимірювальна система та розміщення її елементів

Експериментальна реалізація запропонованого підходу передбачає вимірювання характеристик проходження електромагнітного випромінювання через досліджуваний об'єкт у вільному просторі. Загальну схему вимірювальної системи наведено на рисунку.

Система містить векторний аналізатор кіл, два узгоджені за робочим діапазоном рупорні випромінювачі, коаксіальні вимірювальні кабелі та відповідні коаксіально-хвилевідні переходи. Для роботи в міліметровому діапазоні передбачено використання рупорних антен на основі хвилеводу WR-28. Одну антену використовують як випромінювальну (Tx), другу – як приймальну (Rx), а досліджуваний зразок або виріб розміщують між ними без електричного підключення до вимірювального тракту.

Антени та досліджуваний об'єкт розміщують уздовж спільної осі вимірювання. Їхня взаємна орієнтація, поляризація, відстані та положення об'єкта визначають просторові умови взаємодії електромагнітного поля з досліджуваним матеріалом або виробом. Тому для опорного й основного вимірювань геометрія системи повинна залишатися незмінною та бути відтворюваною.



Вимірювальна схема

Основною безпосередньо вимірюваною величиною є комплексний коефіцієнт передачі $S_{21}(f)$. Опорне вимірювання без досліджуваного об'єкта та вимірювання з ним виконують за однакової конфігурації системи та надалі використовують для формування нормованої характеристики відповідно до формули (1).

Конкретне розміщення антен і об'єкта визначають робочим частотним діапазоном, характеристиками антен і геометрією досліджуваного об'єкта. При цьому просторовий

розподіл поля в області вимірювання не вважається апріорі ідеальною плоскою хвилею; фактичну конфігурацію системи враховують під час побудови відповідної електродинамічної моделі.

Опорне й основне вимірювання

Для зменшення впливу вимірювального тракту та конкретної просторової конфігурації системи перед дослідженням об'єкта виконують опорне вимірювання. Воно полягає у визначенні комплексного коефіцієнта передачі між передавальною та приймальною антенами за відсутності досліджуваного об'єкта в робочій області $S_{21}^{ref}(f)$, коефіцієнт входить до знаменника (1).

Після цього за незмінного положення антен і інших елементів вимірювальної системи в робочу область установлюють досліджуваний об'єкт і виконують основне вимірювання $S_{21}^{obj}(f)$.

Нормовану комплексну характеристику $T_{\text{exp}}(f)$ визначають за формулою (1). Для плоского зразка отриману характеристику використовують на етапі визначення електродинамічних параметрів матеріалу, тоді як для готового виробу вона є експериментальною характеристикою, з якою порівнюють результат електродинамічного моделювання.

Принциповою умовою коректності такого нормування є відтворюваність вимірювальної конфігурації між опорним і основним вимірюваннями. Положення та орієнтація антен, вимірювального тракту й інших елементів, що можуть впливати на електромагнітне поле в робочій області, повинні залишатися незмінними. Якщо використовують тримач зразка або виробу, його вплив також повинен бути врахований у відповідній опорній конфігурації.

Опорне вимірювання не слід ототожнювати з калібруванням векторного аналізатора. Калібрування призначене для зменшення систематичних похибок вимірювального тракту, тоді як опорне вимірювання характеризує конкретну вільнопросторову конфігурацію системи. Якщо є потреба, повторне опорне вимірювання після серії експериментів або зміни конфігурації дозволяє контролювати стабільність і відтворюваність вимірювань.

Вимірювання плоского зразка та готового виробу

Експериментальне дослідження в межах запропонованої методики виконують послідовно для плоского зразка матеріалу та готового виробу. При цьому призначення вимірювань на цих двох етапах є принципово різним.

На першому етапі досліджують плоский зразок з відомою геометрією, насамперед товщиною d. Зразок розміщують у вимірювальній області між передавальною та приймальною антенами, після чого визначають його комплексну характеристику проходження. Геометричні параметри зразка повинні відповідати параметрам, заданим у розрахунковій моделі. Отриману експериментальну характеристику використовують для визначення комплексної діелектричної проникності матеріалу.

Для контролю процедури доцільним є попереднє дослідження зразка матеріалу з відомими або незалежно визначеними електродинамічними параметрами. Порівняння його експериментальної характеристики з розрахунковою дозволяє оцінити відповідність експериментальної та електродинамічної моделей, зокрема вплив особливостей реальної просторової конфігурації вимірювання.

На другому етапі досліджують готовий виріб. Його фактичну геометрію та просторову орієнтацію відтворено в електродинамічній моделі, а матеріал задають параметрами, визначеними на попередньому етапі. Додаткове коригування комплексної діелектричної проникності за результатами вимірювання самого виробу не виконують.

Для виробу експериментально визначають комплексну характеристику проходження, яку порівнюють з відповідною розрахунковою характеристикою за однакових частотних і просторових умов. При цьому аналізують як амплітудну, так і фазову складові та характер їхньої частотної залежності за формулою (2).

Таким чином, експериментальні дані на двох етапах виконують різні функції: для плоского зразка їх використовують для визначення параметрів матеріалу, а для готового виробу – для незалежної перевірки розрахункового прогнозу.

Відповідність експериментальної та розрахункової характеристик виробу дозволяє оцінити можливість перенесення визначених на плоскому зразку параметрів матеріалу на об'єкт складнішої геометрії. Виявлені розбіжності можуть бути використані для аналізу впливу невизначеності матеріальних параметрів, геометрії, позиціонування та інших особливостей експериментально-розрахункової конфігурації.

Можливості й обмеження методики

Запропонований експериментально-розрахунковий підхід поєднує можливості безпосереднього електромагнітного вимірювання та чисельного моделювання та дозволяє досліджувати електродинамічні характеристики діелектричних виробів без необхідності повного попереднього визначення їхніх властивостей виробником. Ключовою особливістю підходу є поділ на завдання визначення параметрів матеріалу та завдання аналізу готового виробу.

Цей підхід може бути застосований у ситуаціях, коли інформація про електродинамічні властивості матеріалу є неповною або недоступною, а спеціалізовані вимірювання готового виробу традиційними методами є ускладненими. Поєднання експериментального визначення параметрів матеріалу з подальшим моделюванням дозволяє сформувати узгоджений опис системи «матеріал–геометрія–електромагнітне поле» та використовувати його для подальшого аналізу характеристик виробу.

Водночас такий підхід передбачає наявність ряду факторів, які можуть впливати на відповідність між розрахунковими й експериментальними характеристиками. Їх необхідно враховувати під час інтерпретації результатів, оскільки виявлена розбіжність не завжди є наслідком некоректного визначення електродинамічних параметрів матеріалу.

Одним з основних джерел невизначеності є вимірювання комплексної діелектричної проникності за плоским зразком. На отримане значення можуть впливати точність вимірювання комплексного коефіцієнта передачі, геометричні параметри зразка, його товщина, а також особливості електродинамічної моделі, використаної для розв'язання оберненої задачі. Додаткові труднощі можуть виникати в разі істотної частотної залежності параметрів або значних діелектричних втрат.

Окрему групу факторів становлять геометричні невизначеності. Для міліметрового діапазону навіть відносно невеликі відмінності між реальною геометрією виробу та геометрією, заданою в розрахунковій моделі, можуть призводити до помітної зміни амплітуди та фази переданого сигналу. Це стосується як розмірів самого виробу, так і його просторового положення, орієнтації та взаємного розміщення з антенами.

На результати також можуть впливати неоднорідність матеріалу та відмінність його локальних властивостей від параметрів, визначених за окремим плоским зразком. У такому випадку використання єдиного значення $\varepsilon^*(f)$ для всього виробу може бути наближенням, адекватність якого необхідно перевіряти за результатами незалежного експерименту.

Ще одним обмеженням є відповідність прийнятої електродинамічної моделі реальним умовам формування поля. Залежно від геометрії вимірювальної системи та досліджуваного об'єкта можуть мати значення просторовий розподіл поля, дифракційні й інтерференційні ефекти, багаторазові відбиття та інші явища, які не завжди доцільно або можливо повністю врахувати в спрощеній моделі.

Таким чином, запропонований підхід не передбачає автоматичного усунення всіх джерел невизначеності, а забезпечує послідовну схему їх виявлення та оцінювання через порівняння незалежних експериментальних і розрахункових даних. Узгодження характеристик готового виробу при цьому є важливим показником практичної адекватності прийнятої моделі, тоді як характер і значення розбіжностей можуть бути використані для визначення факторів, які потребують уточнення на наступних етапах дослідження.

Ключовою передумовою запропонованого експериментально-розрахункового підходу є можливість використання електродинамічних параметрів, визначених за плоским зразком, для моделювання готового виробу. Таке перенесення ґрунтується

на припущенні, що визначена комплексна діелектрична проникність є репрезентативною для матеріалу, з якого виготовлено досліджуваний виріб, у відповідному частотному діапазоні.

Коректність цього припущення залежить від однорідності матеріалу, стабільності його електродинамічних властивостей і відповідності матеріалу плоского зразка матеріалу реального виробу. У разі однорідного матеріалу його комплексну діелектричну проникність можна розглядати як матеріальну характеристику, не залежну від форми конкретного об'єкта. Тоді зміну електродинамічних характеристик при переході від плоского зразка до готового виробу визначають переважно зміною геометрії й умов взаємодії з електромагнітним полем.

Для складних або неоднорідних виробів така передумова може вимагати додаткового обґрунтування. Якщо матеріал має просторово змінні властивості, багатошарову структуру, технологічні неоднорідності або інші особливості, використання єдиного значення $\varepsilon^*(f)$ може бути недостатнім для адекватного опису всієї конструкції. У такому випадку методика зберігає свою загальну структуру, але модель матеріалу повинна бути розширена відповідно до фізичної будови об'єкта.

Додатковою умовою перевірки перенесення параметрів матеріалу є використання декількох екземплярів виробу, виготовлених за однаковою технологією та з використанням відповідного матеріалу. Перевірка лише одного виробу не дозволяє повністю уникнути випадкового збігу розрахункової та експериментальної характеристик. Порівняння результатів для декількох екземплярів дозволяє оцінити відтворюваність отриманого опису та встановити, наскільки виявлена відповідність є характерною для виробів певного технологічного походження. При цьому припущення про однаковість технології виготовлення та матеріалу таких екземплярів повинне бути незалежно обґрунтованим.

Окремим фактором є відмінність реальних умов опромінення від ідеалізованих умов, прийнятих у розрахунковій моделі. Зокрема, реальне електромагнітне поле в області досліджуваного виробу може відрізнятися від ідеальної плоскої хвилі за амплітудним і фазовим розподілом, напрямком поширення та просторовою структурою. Тому повного чисельного збігу розрахункових і експериментальних характеристик не слід очікувати. Завдання методики полягає не в досягненні формальної ідеальної відповідності, а в оцінюванні величини та характеру розбіжностей і встановленні того, чи можуть вони бути пояснені відмінністю реальних і модельних умов.

Важливо, що саму можливість перенесення параметрів не вважають як апріорі доведений факт. Її перевіряють на етапі порівняння розрахункових і експериментальних характеристик готових виробів. Якщо модель, побудована на основі незалежно визначених параметрів матеріалу та фактичної геометрії, відтворює основні особливості експериментальних характеристик декількох екземплярів, це є підставою для висновку про застосовність прийнятого опису матеріалу до відповідного класу електродинамічних задач.

Таким чином, перенесення параметрів матеріалу з плоского зразка на готовий виріб є не окремою процедурою калібрування, а однією з основних перевірних передумов запропонованої методики. Перевірка на декількох технологічно узгоджених екземплярах і аналіз розбіжностей між розрахунком і експериментом дозволяють оцінити не лише адекватність визначених параметрів матеріалу, а й відтворюваність запропонованого підходу.

Запропонований експериментально-розрахунковий підхід створює основу для подальшого розвитку методики в напрямі розширення класу досліджуваних матеріалів і виробів, удосконалення електродинамічних моделей і підвищення достовірності прогнозування їхніх характеристик. Подальше вдосконалення може передбачати врахування складніших моделей матеріалів, просторової неоднорідності їхніх властивостей, багатошарової структури й особливостей реального розподілу електромагнітного поля.

Окремим напрямом розвитку є нагромадження експериментальних даних для декількох екземплярів виробів, виготовлених за однаковою технологією. Це дозволяє перейти від перевірки окремої розрахункової моделі до дослідження відтворюваності електродинамічних характеристик виробів

і встановлення характерного діапазону їхніх варіацій.

Якщо є перевірені моделі матеріалу та виробу, може бути розширено коло задач, які розв'язують без проведення повного експерименту для кожної нової конфігурації. Зокрема, модель можна використовувати для оцінювання впливу геометричних параметрів, властивостей матеріалу й умов електромагнітного опромінення на характеристики виробу.

Далі таку можливість можна буде використати для розроблення підходів до контролю електродинамічних параметрів і відтворюваності характеристик готових виробів. Водночас розроблення конкретних процедур контролю, допустимих відхилень і критеріїв прийняття потребує окремого дослідження і не є предметом запропонованої методики.

Таким чином, запропонований підхід можна розглядати не лише як спосіб визначення параметрів матеріалу та прогнозування характеристик окремого виробу, а і як основу для подальшого формування експериментально підтверджених розрахункових моделей, придатних для ширшого аналізу та практичного застосування.

Висновки

У роботі запропоновано експериментально-розрахунковий підхід до прогнозування електродинамічних характеристик діелектричних виробів у міліметровому діапазоні, що поєднує експериментальне визначення електродинамічних параметрів матеріалу за плоским зразком з подальшим чисельним моделюванням виробу заданої геометрії й експериментальною перевіркою отриманих результатів.

Основною особливістю запропонованого підходу є поділ етапів визначення параметрів матеріалу та перевірки характеристик готового виробу. На першому етапі за результатами вимірювання комплексного коефіцієнта передачі плоского зразка визначають комплексну діелектричну проникність матеріалу. На другому етапі отримані параметри без додаткового коригування використовують для розрахунку електромагнітних характеристик виробу з урахуванням його реальної геометрії. Результати розрахунку порівнюють з незалежними експериментальними даними, отриманими для готового виробу.

Показано, що така послідовність дозволяє оцінювати не лише відповідність моделі експериментальним даним, а й можливість перенесення визначених за плоским зразком параметрів матеріалу на вироби складнішої форми. При цьому узгодженість розрахункових і експериментальних характеристик виробу розглядають як критерій адекватності сформованої моделі «матеріал–геометрія–електромагнітне поле».

Установлено, що на результат прогнозування можуть істотно впливати похибки визначення електродинамічних параметрів матеріалу, геометричні та технологічні особливості виробу, його просторова неоднорідність, точність позиціонування під час вимірювання, а також відмінність реального електромагнітного поля від його ідеалізованого подання в чисельній моделі. Тому оцінювання методики доцільно проводити не за вимогою повного збігу розрахункових і експериментальних даних, а за характером і значенням їхньої розбіжності в межах поставленого завдання.

Застосування декількох зразків виробів, виготовлених за однаковою технологією та з узгоджених матеріалів, дозволяє додатково оцінити відтворюваність отриманих результатів і перевірити стійкість установленого зв'язку між параметрами матеріалу й електродинамічними характеристиками виробу.

Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальшого дослідження різних типів діелектричних матеріалів і виробів у міліметровому діапазоні, для удосконалення чисельних моделей і розроблення методів оцінювання електродинамічних параметрів і відтворюваності характеристик виробів.

Список використаної літератури

1. Liu X., Gan L., Yang B. Millimeter-wave free-space dielectric characterization. *Measurement*. 2021. Vol. 179. Art. 109472. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109472

2. Anferov A., Harvey S. P., Wan F., Lee K. H., Simon J. Schuster D. I. Low-loss millimeter-wave resonators with an improved coupling structure. *Superconductor Science and*

Technology. 2024. Vol. 37, Iss. 3. Art. 035013. https://doi.org/10.1088/1361-6668/ad22ff

3. Zwick T., Chandrasekhar A., Baks C. W., Pfeiffer U. R., Brebels S., Gaucher B. Determination of the complex permittivity of packaging materials at millimeter-wave frequencies. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2006. Vol. 54, Iss. 3. P. 1001–1010. https://doi.org/10.1109/tmtt.2005.864140

4. Mirbeik-Sabzevari A., Tavassolian N. Characterization and Validation of the Slim-Form Open-Ended Coaxial Probe for the Dielectric Characterization of Biological Tissues at Millimeter-Wave Frequencies. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2018. Vol. 28, Iss. 1. P. 85–87. https://doi.org/10.1109/lmwc.2017.2772187

5. Dudeck K. E., Buckley L. J. Dielectric Material Measurement of Thin Samples at Millimeter Wavelengths. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 1992. Vol. 41, Iss. 5. P. 723–725. https://doi.org/10.1109/19.177352

6. Kim S., Novotny D., Gordon J. A., Guerrieri J. R. A Free-Space Measurement Method for the Low-Loss Dielectric Characterization Without Prior Need for Sample Thickness Data. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2016. Vol. 64, Iss. 9. P. 3869–3879. https://doi.org/10.1109/tap.2016.2587745

7. Hehenberger S. P., Caizzone S., Thurner S., Yarovoy A. G. Broadband Effective Permittivity Simulation and Measurement Techniques for 3-D-Printed Dielectric Crystals. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2023. Vol. 71, Iss. 10. P. 4161–4172. https://doi.org/10.1109/tmtt.2023.3259479.

Стаття надійшла 05.09.2026

Дата прийняття статті до друку
після рецензування 15.10.2026

Дата публікації 02.11.2026