

Н. Б. Бурдейна¹, Л. А. Зозуля², Т. Б. Петруньок¹

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

² Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО ЗАЛІЗОВМІСНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ УЛЬТРАВИСОКИХ І ВИЩИХ ЧАСТОТ

Анотація. Досліджено зміни коефіцієнтів проходження, відбиття та поглинання електромагнітних випромінювань композиційними матеріалами із масовим вмістом карбонільного заліза 40 % та 60 % у діелектричній матриці. Встановлено, що коефіцієнти проходження електромагнітного випромінювання у частотному діапазоні 2–12 ГГц знижуються з 0,80–0,85 до 0,10–0,30. Відповідно коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль підвищуються від 0,05–0,08 до 0,22–0,28. При цьому на частотах 8–10 ГГц спостерігаються вищі коефіцієнти відбиття для зразків з меншим вмістом карбонільного заліза. У подальшому цей показник збільшується і стабілізується. Зниження коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль при вмісті провідної субстанції у діелектричному матеріалі можна пояснити досягненням перколяційного ефекту – підвищенням провідності матеріалу. Це відбувається при утворенні у матеріалі кіл провідностей через значні значення електромагнітних констант частинок наповнювача. Тому при проектуванні композиційних матеріалів слід керуватися об'ємним вмістом наповнювача у діелектричній матриці. Отримані дані дозволяють розрахувати комплексні діелектричні та магнітні проникності матеріалів. Це у подальшому спростить проектування композиційних матеріалів з потрібними захисними властивостями. У процесі проектування захисних матеріалів і конструкцій слід враховувати різні залежності тангенса кута втрат для діелектричних і провідних матеріалів. Дана межа для композицій дещо умовна, тому попередньою умовою для розроблення захисних матеріалів є визначення амплітудно-частотних характеристик полів, які потребують екранування.

Ключові слова: композиційний матеріал, екранування електромагнітного випромінювання, коефіцієнт відбиття, електрофізичні властивості.

Вступ

Основними напрямками розроблення і впровадження композиційних матеріалів у галузях електромагнітної безпеки та електромагнітної екології є забезпечення високих коефіцієнтів екранування за рахунок поглинання енергії електромагнітних хвиль. Тобто, за високої ефективності коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль повинні бути мінімальними. Це є складною задачею, оскільки базується на фундаментальних положеннях електродинаміки суцільних середовищ. На сьогодні більшість таких досліджень стосується нанокомпозитів, але такі матеріали мають високу вартість, що обумовлює обмеженість сфери їх застосування. Багатошарові структури з мінімальною відбивальною здатністю не завжди прийнятні через складність технологій їх використання. Тому доцільно провести комплекс експериментальних досліджень з пошуку компромісного рішення щодо забезпечення достатнього коефіцієнта загального екранування з прийнятним значенням коефіцієнта відбиття.

Стан питання

Складність проблематики екранування електромагнітних полів обумовлена значними розбіжностями амплітудно-частотних характеристик електромагнітної обстановки на окремих територіях, в будівлях та визначених виробничих умов. Допустимі рівні полів регламентуються міжнародним нормативом [1] та національними нормативами [2, 3]. Особливістю застосування екранування електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот є одночасний захист людей від електромагнітних впливів та забезпечення стабільної роботи усіх засобів бездротового

зв'язку. Крім того, такі екрани повинні мати малі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль для уникнення непередбачуваних просторових перерозподілів потоків випромінювань. Найвищі ефективності мають матеріали на основі наночастинок [4, 5]. Але їх вартість як при отриманні наноструктур, так і при виготовленні матеріалів дуже висока. Тому їх застосування є доцільним тільки для забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання – захист від сторонніх електромагнітних впливів. Дослідження щодо розроблення й випробування захисних властивостей композицій на основі мікроструктур стосуються екранування електромагнітних полів частотами до 3 ГГц. У роботі [6] визначено зміни коефіцієнтів екранування електромагнітного поля частотою 1,8 ГГц у залежності від вмісту та дисперсності магнетиту. Показано, що при досягненні прийнятних загальних коефіцієнтів екранування коефіцієнт відбиття набуває високих значень. У дослідженні [7] для підвищення коефіцієнта екранування матеріалами малих товщин у вихідну суміш додається графітизована сажа. Вона має високу вартість, а технологія виготовлення композиції ускладнюється. У роботі [8] показано застосування двокомпонентних матеріалів на основі залізорудного концентрату для створення градієнту електрофізичних властивостей по глибині матеріалу. При цьому зовнішній шар має відносно малий коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль, а внутрішні – високі поглинальні властивості. Нанесення на поверхню кількох шарів захисного матеріалу також збільшує час створення захисного покриття і знижує його стійкість до механічних та інших впливів. Дослідження [9] стосуються застосування карбонільного заліза у якості наповнювача матриці.

Показано, що на такому матеріалі можна отримати малі коефіцієнти відбиття і високі загальні коефіцієнти екранування. Товщини досліджуваних зразків великі – 5 мм, що не завжди зручно. Матеріал матриці модельний і потребує багатоступінчастого виготовлення, застосування кількох шарів лаку. Але висока відносна магнітна проникність заліза, прийнятна електропровідність та хімічна стійкість частинок, захищених шаром вуглецю робить цей матеріал дуже перспективним. Доцільним є дослідити застосування дрібнодисперсного заліза у якості наповнювача полімерної матриці з точки зору ефективності екранування електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот.

Мета дослідження – визначення коефіцієнтів поглинання й відбиття електромагнітних полів ультрависоких і надвисоких частот та створення засад застосування таких матеріалів для захисту людей від електромагнітних впливів.

Викладення основного матеріалу

Для проведення досліджень було виготовлено зразки захисних матеріалів на основі латексу

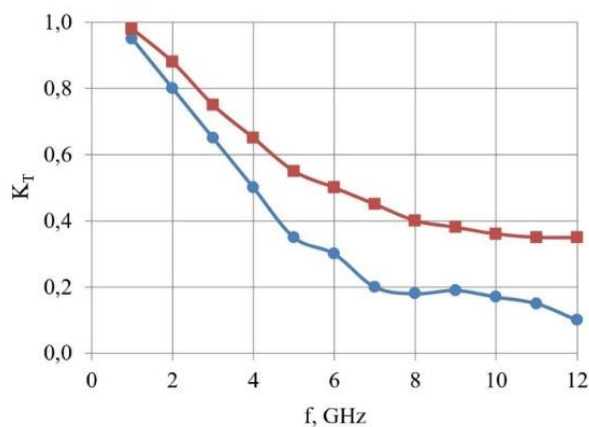


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів проходження електромагнітного випромінювання K_T від частоти,
 — для кількості наповнювача 40 % за масою;
 — для кількості наповнювача 60 % за масою

Одержаний результат свідчить, що відбиття електромагнітних хвиль має більш складну частотну залежність. На частотах, близьких до 6 ГГц зразок з вмістом 60 % заліза має чіткий максимум відбиття, а на частотах 8–10 ГГц цей показник має мінімальні значення. При цьому для частот, більших за 7 ГГц коефіцієнти відбиття більші для матеріалів з меншим вмістом металевої субстанції 40 %. Цей результат неочікуваний й потребує з'ясування.

На рис. 3 наведені результати вимірювань коефіцієнта поглинання отриманих матеріалів.

Як видно з рис. 3, на частотах 8–10 ГГц спостерігається певний максимум поглинання, що відповідає частотам зниження коефіцієнта відбиття K_A . Також деякі відхилення від монотонності спостерігаються на кривій проходження електромагнітних хвиль. Це можна пояснити явищами резонансу при певних

(матриця) та карбонільного заліза (наповнювач). Кількість наповнювача складала 40 % та 60 % за масою. Дисперсність карбонільного заліза – 6–8 мкм. Товщина зразків складала приблизно 2 мм. Для випробувань захисних властивостей використовувався хвильовий метод.

Вимірювання здійснювалися у діапазоні частот 1–12 ГГц, що відповідає робочим частотам більшості високочастотних джерел електромагнітного випромінювання, які використовуються у виробничих та інших процесах. Здійснювалося вимірювання коефіцієнтів проходження електромагнітного випромінювання K_T , коефіцієнта відбиття K_R та коефіцієнта поглинання K_A . В усіх випадках ефективність екранування оцінювалася за зміною потужності випромінювання.

На рис. 1, 2 наведено частотну залежність коефіцієнта проходження електромагнітного випромінювання.

Як видно з рис. 1 для обох зразків коефіцієнт проходження практично монотонно знижується зі збільшенням частоти випромінювання. Деякі відхилення спостерігаються у смузі частот 8–10 ГГц.

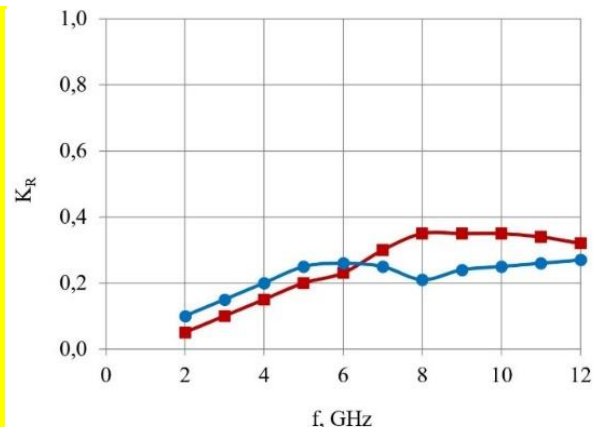


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів відбиття електромагнітного випромінювання K_R від частоти,
 — для кількості наповнювача 40 % за масою;
 — для кількості наповнювача 60 % за масою

умовах вимірювань та властивостями феромагнітного резонансу. Але загальна тенденція підвищення ефективності екранування зі зростанням частоти випромінювання відповідає положенням електродинаміки суцільних середовищ. При розробленні захисних матеріалів слід враховувати, що коефіцієнти відбиття мають тенденцію до зростання, що може бути неприйнятним для вирішення деяких прикладних задач.

Якщо узагальнити отримані дані, то має виконуватися співвідношення:

$$K_T + K_R + K_A = 1,$$

Але у результатах є деякі відхилення. Це є результатом певної похибки вимірювань. Але загальні тенденції зміни трьох показників свідчать про коректність даних.

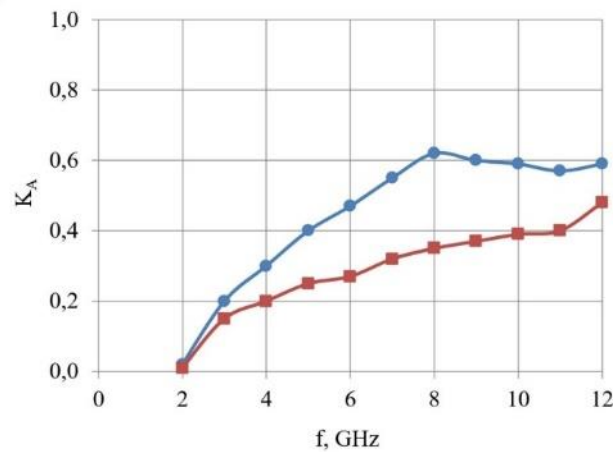


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів поглинання електромагнітного випромінювання крізь матеріал від частоти,

— для кількості наповнювача 40 % за масою;
 — для кількості наповнювача 60 % за масою

На основі отриманих даних застосування методики Беккера-Джарвіса можна розрахувати значення комплексних діелектричної та магнітної проникнос-тей матеріалів.

Зокрема, дійсні складові діелектричної проникності матеріалу з вмістом карбонільного заліза 80 % має значення 9,0–8,5 в усьому діапазоні, а з вмістом 40 % – 6,2–6,0. При цьому уявна складова має невеликі значення, якими можна нехтувати. Магнітна проникність за дійсною складовою знижується з 2,5 та 2,0 до 1,5–1,6 на частотах 8–10 ГГц. При цьому уявні складові також незначні. Така стабілізація й обумовлює вихід коефіцієнта відбиття на практично сталі значення.

Коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від поверхні матеріалу визначається співвідношенням:

$$K_R = \frac{Z_M - 1}{Z_M + 1},$$

де Z_M – поверхневий імпеданс матеріалу.

$$Z_M = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0(1 - itg\delta)}},$$

де $tg\delta$ – тангенс кута втрат.

Для провідних матеріалів:

$$tg\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon\varepsilon_0},$$

де σ – питома електрична провідність матеріалу.

Для діелектриків:

$$tg\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}.$$

Слід враховувати, що тангенс кута магнітних втрат складається з кількох компонентів – втрат на гістерезис, вихрові струми та залишкову намагніченість.

Межа між провідними та непровідними матеріалами дуже умовна. Це ілюструє зміни коефіцієнтів відбиття для різних вмістів карбонільного заліза

(рис. 2). На певній частоті коефіцієнт відбиття матеріалу з більшим вмістом заліза стає нижчим за коефіцієнт матеріалу з меншим вмістом заліза. Це може відбуватися на межі перколяційного ефекту – зростання провідності матеріалу. Тобто, частина ефектів, суттєвих з точки зору захисту від електромагнітних впливів, пов'язаних саме з цим показником. Слід враховувати, що визначення вмісту провідного наповнювача за масою не дає уявлення про межу провідності. Різке підвищення провідності забезпечується утворенням кіл провідності у діелектричній матриці за наявності контакту між частинками наповнювача. Тому у процесі проектування композиційного матеріалу слід керуватися об'ємним вмістом провідного наповнювача у матриці. Складність забезпечення поверхневих імпедансів захисних матеріалів близьких до хвильового опору повітря обумовлена проблематичністю врахування розподілу екрануючих домішок у тілі діелектричної матриці. У процесі збільшення магнітної проникності невідворотно змінюється діелектрична проникність. Застосування відомих емпіричних співвідношень (Оделевського, Максвелла-Гарнетта, Бруггемана) для оцінювання електрофізичних властивостей спроектованої композиції не дає бажаного ефекту. Тому доцільно провести серію експериментальних досліджень для композицій з різним вмістом магнітної та провідної речовини для отримання графічних залежностей змін поверхневих імпедансів за різних умов. Доцільно розглянути можливості отримання на основі експериментальних даних емпіричних співвідношень, які описують зміни електрофізичних та магнітних властивостей композицій за великого об'ємного вмісту (більше 30 %) екрануючої субстанцією у діелектричній матриці. Такі співвідношення повинні враховувати й морфологію екрануючих включень – відхилення від сферичної форми співвідношення довжини й ширини тощо.

Висновки

1. Досліджено зміни коефіцієнтів проходження, відбиття та поглинання електромагнітних

випромінювань у композиційних матеріалах з різним вмістом карбонільного заліза великої дисперсності.

Встановлено частотну залежність цих показників у діапазонах ультрависоких та надвисоких частот.

Показано, що ці залежності мають немонотонний характер у певних смугах частот, що обумовлено резонансними явищами.

2. Показано можливість визначення за результатами експерименту комплексних діелектричної та магнітної проникностей композиційних матеріалів. Це спрощує процеси проектування матеріалів

з потрібними захисними властивостями. Слід враховувати відмінності показників втрат для діелектричних та провідних матеріалів.

3. Показано, що найбільші зміни у відбивальних властивостях композиційних матеріалів відбуваються при концентраціях екрануючого наповнювача у діелектричній матриці, які відповідають межі різкого зростання провідності матеріалу.

Для коректного визначення межі провідності у процесі проектування матеріалів слід керуватися об'ємним вмістом екрануючого наповнювача у діелектричній матриці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Глива В. А., Халмурадов Б. Д., Занько С. М., Подолюб І. М. Дослідження електромагнітного навантаження на виробничі середовища аеропортів та головні напрями його зниження. Проблеми охорони праці в Україні. 2013. Вип. 27. С. 44–48.
2. Про затвердження Змін до Державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань [Чинний від 2017-05-23]: наказ М-ва охорони здоров'я України від 13.03.2017 № 266
3. ДСНП 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів [Чинний від 2003-03-13]: затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 18.12.2002 р. № 476. Київ, 2003. 16 с. (Державні санітарні норми України).
4. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P.14–18. <https://doi.org/10.15407/tech-ned2018.04.014>.
5. Tudose I.V., Mouratis K., Ionescu O.N., Romanitan C., Pachiou C., Popescu M., Khomenko V., Butenko O., Chernysh O., Kenanakis G., Barsukov V.Z., Sucheа M.P., Koudoumas E. Novel Water-Based Paints for Composite Materials Used in Electromagnetic Shielding Applications. *Nanomaterials*. 2022, 12(3). P. 487. <https://doi.org/10.3390/nano12030487>
6. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>
7. 198. Senyk I., Kuryptia Y., Barsukov V., Butenko O., Khomenko V. Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21(4). Pp. 771–778
8. Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Ніколаєв К.Д. (2023). Розроблення матеріалів багатошарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій для екранування електромагнітних полів. Екологічна безпека та природокористування. 45 (1). С. 68–75. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.68-75>.
9. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskyi, S., Biruk, Y., Dovhanovskiy, M., Zozulya, S., Klymchuk, A., Nikolaiev, K., & Osadchyi, D. (2024). Applying heterogeneous building materials for the protection of people against electromagnetic radiation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10 (131), 45–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313629>

Received (Надійшла) 28.11.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.02.2025

Application of composite iron-containing material for shielding electromagnetic fields of ultra-high and higher frequency

N. Burdeina, L. Zozulya, T. Petrunok

Abstract. Changes in the transmission, reflection and absorption coefficients of electromagnetic radiation by composite materials with a mass content of carbonyl iron of 40% and 60% in the dielectric matrix were investigated. It was found that the transmission coefficients of electromagnetic radiation in the frequency range of 2–12 GHz decrease from 0.80–0.85 to 0.10–0.30. Accordingly, the reflection coefficients of electromagnetic waves increase from 0.05–0.08 to 0.22–0.28. At the same time, higher reflection coefficients are observed at frequencies of 8–10 GHz for samples with a lower content of carbonyl iron. In the future, this indicator increases and stabilizes. The decrease in the reflection coefficient of electromagnetic waves with the content of a conductive substance in the dielectric material can be explained by the achievement of the percolation effect – an increase in the conductivity of the material. This occurs when conductivity circles are formed in the material due to significant values of the electromagnetic constants of the filler particles. Therefore, when designing composite materials, one should be guided by the volumetric content of the filler in the dielectric matrix. The obtained data allow one to calculate the complex dielectric and magnetic permeability of materials. This will further simplify the design of composite materials with the required protective properties. In the process of designing protective materials and structures, one should take into account the different dependences of the loss tangent angle for dielectric and conductive materials. This limit for compositions is somewhat conditional, therefore, a prerequisite for the development of protective materials is the determination of the amplitude-frequency characteristics of the fields that require shielding.

Keywords: composite material, electromagnetic radiation shielding, reflection coefficient, electrophysical properties.