

К. Д. Ніколаєв^{1,2}, А. С. Білик^{1,3}, К. М. Сапожников¹

¹ Науково-дослідний інститут військової розвідки, Київ, Україна

² Міжрегіональна академія управління персоналом, Київ, Україна

³ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ЗАСАДИ РОЗРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ З МАЛИМИ МАСОГАБАРИТНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Анотація. Проаналізовано можливості розроблення матеріалу малої товщини для екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот. Показано, що покриття завтовшки меншої за чверть довжини падаючої електромагнітної хвилі – 400–500 мкм не забезпечують малих коефіцієнтів відбиття при нанесенні на металеву поверхню. Зниження коефіцієнтів відбиття до 0,7–0,6 відбувається випадковим чином на різних частотах. Це пов'язане з резонансними явищами у покритті. Частотна смуга мінімального відбиття вузька й не має практичного значення. Показано, що забезпечити прийнятний баланс магнітних та електрофізичних властивостей тонкого покриття для мінімізації коефіцієнтів відбиття складно. Це обумовлено залежністю показників кінцевого продукту не тільки від магнітних та діелектричних властивостей компонентів та їх концентрацій, а й від морфології частинок, їх розподілу у тілі матриці, режиму полімеризації. Крім того магнітні й електрофізичні властивості мають амплітудно-частотну залежність. Обґрунтовано, що для забезпечення малих коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль й високого поглинання електромагнітної енергії доцільно застосовувати багатошарову структуру. Шари повинні мати різні магнітні й електрофізичні властивості. При цьому найменші концентрації наповнювача – у верхньому шарі. Ці концентрації повинні мати значення на межі перколяційного ефекту – різкого підвищення електропровідності композиції. Ці концентрації можна оцінювати визначити із застосуванням теорії протікання електродинаміки суцільних середовищ. За можливості між шарами доцільно передбачити діелектричний прошарок. Наявність границь розділу підвищує загальну ефективність захисного покриття.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, електромагнітний екран, коефіцієнт відбиття.

Вступ

Зниження рівнів електромагнітних випромінювань відповідними матеріалами і конструкціями поступово стає багатовекторною задачею. Це обумовлене як загальним підвищенням електромагнітного фону, у навколишньому середовищі, так і насиченістю побутових та виробничих приміщень електронною технікою, яка генерує електромагнітне випромінювання широкого частотного діапазону. При цьому спостерігається стійка тенденція до підвищення робочих частот усіх типів бездротового зв'язку, радіолокаційного обладнання тощо. Така ситуація вимагає наявності ефективних матеріалів для зниження рівнів електромагнітних випромінювань у будь-яких умовах. При цьому для випромінювань ультрависоких і вищих частот критичним є коефіцієнт відбиття, який впливає на перерозподіл потоків випромінювання у просторі. Складність розробки відповідних матеріалів полягає у тому, що значна частина таких досліджень має закритий характер через застосування у військовій сфері – забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання та електромагнітного камуфляжу. Технічно та економічно доцільно забезпечувати захист окремих об'єктів та технічних засобів. Такі об'єкти та пристрої зазвичай мають складну конфігурацію поверхні, тому масогабаритні параметри засобів захисту є критичними. Зазвичай дослідження у цьому напрямі стосуються конкретної вузької задачі. Тому не сформований системний підхід до розроблення й впровадження електромагнітних екранів потрібної ефективності у залежності від умов їх використання. Це обумовлює актуальність визначення базових засад проектування та виготовлення електромагнітних екранів малих масогабаритних параметрів.

Огляд досліджень і розробок

Металеві й металізовані поверхні мають високі загальні коефіцієнти екранування електромагнітних випромінювань [1, 2]. Але для частот випромінювання дуже високих, ультрависоких і вищих – така ефективність досягається, в основному, за рахунок відбиття електромагнітних хвиль. Уникнення такого явища можливо за рахунок чвертьхвильового захисту, виходячи з фундаментальних фізичних принципів [3]. Такі конструкції передбачають наявність діелектричного зазору між шарами конструкції, кратного чверті довжини падаючої електромагнітної хвилі. Це збільшує габаритні розміри конструкцій і робить її практично монохромною (розрахованою на екранування випромінювання однієї частоти). Для вирішення задач високої ефективності екранування за рахунок поглинання електромагнітної енергії розроблено багато композиційних матеріалів [4, 5]. У частини цих матеріалів співвідношення коефіцієнтів поглинання та відбиття електромагнітних хвиль прийнятне, але товщина матеріалів 5 мм і більше. Крім того більшість таких матеріалів низькотехнологічні у практичному використанні й схильні до деградації під впливом фізико-хімічних чинників. Найбільш зручними для використання є рідкі композиції, які можна наносити на будь-які поверхні. У роботі [6] запропоновано використання стандартних геополімерних фарб (матриця) й магнетиту (наповнювач). Але за малих концентрацій наповнювача недостатня загальна ефективність екранування з низьким коефіцієнтом відбиття. За великих концентрацій, 40 % за масою і більше, різко зростає коефіцієнт відбиття, що у більшості випадків є небажаним. Більш ефективні й збалансовані рідкі суміші, описані у [7, 8]. Але вони не враховують зміни коефіцієнтів відбиття зі

змінюю електрофізичних характеристик компонентів композиції. Крім того, ці матеріали мають складні технології виготовлення, наприклад перетворення полівінілбутералю, і високі вартості. Найбільш раціональним шляхом підвищення загальної ефективності захисного матеріалу разом з малим коефіцієнтом відбиття електромагнітних хвиль є створення у товщі матеріалу градієнту електрофізичних властивостей. У роботі [9] це реалізовано послідовним нанесенням шарів з різною концентрацією наповнювача. Дана робота повністю експериментальна й не дає можливість раціоналізувати показники кожного шару й знизити загальну товщину захисного покриття. Тому доцільно проаналізувати показники складу й ефективності усіх доступних матеріалів і визначити загальні засади проектування та виготовлення тонких матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань.

Викладення основного матеріалу

Мінімізація товщини електромагнітного екрана у загальному випадку є задачею оптимізації кількох показників захисного матеріалу або конструкції. Така оптимізація виконується експериментально або теоретично у залежності від умов і цілей застосування екранування. Головними показниками екрана є загальний коефіцієнт екранування, внесок у нього екранування за рахунок відбиття електромагнітних хвиль та поглинання електромагнітної енергії. Усі ці показники залежать від магнітних та електрофізичних характеристик матеріалу. При цьому поглинання визначається показниками усього матеріалу, а відбиття – властивостями поверхневого шару – поверхневим імпедансом.

На сьогодні багато уваги приділяється захисту від електромагнітних випромінювань ультрависоких та вищих частот. Більшість матеріалів мають достатньо високі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль малої довжини, а у конструкційних сплавів він має значення до 0,9. Це призводить до перерозподілу випромінювання у просторі, підвищуючи ступені впливу випромінювання на людей, погіршуючи умови експлуатації електронного обладнання та підвищуючи електромагнітну помітність рухомих об'єктів.

Найбільш надійним способом мінімізації коефіцієнта відбиття є створення покриття, товщина якого дорівнює чверті довжини падаючої електромагнітної хвилі. Хвилі, які відбиваються від зовнішньої та внутрішньої поверхонь матеріалів взаємно гасяться внаслідок інтерференційних явищ. Але, наприклад, для електромагнітного випромінювання частотою 10 ГГц ($\lambda = 30$ мм) захисний шар повинен мати товщину 7,5 мм. Це не завжди прийнятно. Товщину покриття можна зменшити за певного співвідношення магнітних та діелектричних характеристик шару:

$$d = c / (4f \sqrt{\epsilon \mu}),$$

де d – товщина покриття, c – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль, f – частота електромагнітного випромінювання, ϵ , μ – відносні діелектрична та магнітна проникності матеріалу. Наприклад, якщо забезпечити $\epsilon = 6$, $\mu = 1,2$, то товщина захисного шару може складати 3 мм. Очевидно, що потрібні співвідношення діелектричних та магнітних властивостей

можна отримати тільки у композиційних матеріалах. Але їх проектування складне через низку чинників. Визначення прогнозованої діелектричної проникності із застосуванням співвідношення Максвелла-Гарнета дає значні похибки й розбіжності з експериментом:

$$\frac{\epsilon - \epsilon_d}{\epsilon + 2\epsilon_d} = v_m \frac{\epsilon_m - \epsilon_d}{\epsilon_m + 2\epsilon_d},$$

де ϵ_d , ϵ_m – діелектричні проникності матриці та наповнювача, v_m – об'ємна доля наповнювача у діелектричній матриці. Це ж стосується формули Оделевського для визначення магнітної проникності композиції.

$$\epsilon = \epsilon_d \left[1 + \frac{v_m (\epsilon_m - \epsilon_d)}{(1 - v_m / v_k) F (\epsilon_m - \epsilon_d) + \epsilon_d} \right],$$

де ϵ_d , ϵ_m – діелектричні проникності матриці та наповнювача, v_m – об'ємний вміст наповнювача, v_k – критичний об'ємний вміст наповнювача, за якого екрануючі частинки контактують між собою, F – коефіцієнт деполіризації.

Навіть введення у формулу показника деполіризації F (врахування морфології частинок наповнювача у діелектричній матриці) не вирішує проблеми. Крім того, значний вплив на електрофізичні та магнітні властивості композиції має рівномірність розподілу частинок у матриці. Це вимагає застосування при виготовленні вихідної суміші швидкісних змішувачів – дисольверів. Підвищити точність розрахунків можна застосуванням співвідношень електродинаміки суцільних середовищ [10]. Але це вимагає великих обсягів обчислень й наявності експериментальних даних щодо питомої провідності (питомого опору) композиції з відомим об'ємним вмістом екрануючого матеріалу у діелектричній матриці. Наявність діелектричних та магнітних властивостей у композиції з відчутною електропровідністю матеріалу забезпечують ферити на основі заліза та нікелю. Було досліджено можливості мінімізації коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль покриттям з товщинами, меншими за чверть довжини падаючої хвилі. Покриття товщиною 400–500 мкм наносилося на металеву поверхню й досліджувався коефіцієнт відбиття (рис. 1). Як видно з рис. 1, різке зниження коефіцієнтів відбиття має випадковий характер (у залежності від концентрацій наповнювача) й пов'язане з резонансними явищами. Смуги малого коефіцієнта відбиття надзвичайно вузькі на значеннях, які мають практичне значення.

Це значення, нижчі за 0,7. Усі джерела електромагнітних випромінювань, які формально працюють на фіксованій частоті, мають дещо відмінні робочі частоти. Тому у більшості випадків зниження коефіцієнтів відбиття за рахунок резонансних явищ не ефективно. Спроби підібрати потрібне співвідношення компонентів для мінімізації коефіцієнтів відбиття зазвичай виявляються невдалим. Відомо, що ефективність відбиття залежить від поверхневого імпедансу матеріалу. Його наближення до імпедансу середовища розповсюдження електромагнітних хвиль 377 Ом. У загальному випадку коефіцієнт відбиття визначається значенням $\sqrt{\mu/\epsilon}$, де μ , ϵ – абсолютні магнітна та діелектрична проникності матеріалу.

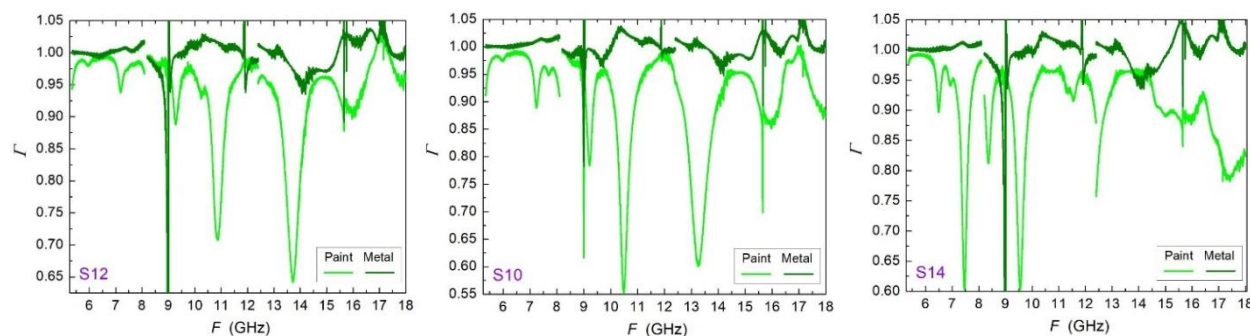


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів відбиття від довжини падаючої електромагнітної хвилі:

— зразок без покриття, — зразок з покриттям

Практично він розраховується порівнянням поверхневого імпедансу матеріалу з показником повітря: $K_e = (Z_m - Z_n) / (Z_m + Z_n)$, де Z_n , Z_m – імпеданси повітря та матеріалу, а $Z_m = \sqrt{2f\mu/\sigma}$, де σ – питома електропровідність матеріалу.

Фактично питома електропровідність визначає ступінь діелектричності матеріалу.

Для отримання прийнятної коефіцієнта відбиття необхідно наблизити значення діелектричних та магнітних проникностей. На практиці, навіть за різних вмістів магнітних та діелектричних домішок вони сильно відрізняються. На рис. 2 наведено виміряні співвідношення цих показників.

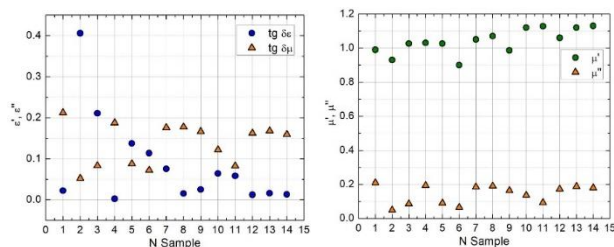


Рис. 2. Значення діелектричної та магнітної проникностей композиційних матеріалів з різним вмістом магнітного наповнювача

При цьому $Z_m = \sqrt{(\mu' - j\mu'') / (\epsilon' - j\epsilon'')}$, де μ' , ϵ' – дійсні складові магнітної та діелектричної проникності, μ'' , ϵ'' – уявні складові.

Зі змінюю частоти електромагнітного випромінювання змінюється і його магнітні та електричні властивості. При цьому при зниженні коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль знижується й коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії. За умови нанесення захисного покриття на неметалеву поверхню це є небажаним. Тому найбільш ефективним покриттям є покриття з градієнтом магнітних та електричних властивостей по глибині захисного шару. Реалізувати це для тонкого композиційного матеріалу практично неможливо. Тому для досягнення прийнятного ефекту доцільно робити покриття принаймні двошаровим. Для мінімізації коефіцієнта відбиття верхній шар покриття повинен мати концентрацію провідної субстанції, яка може мати й магнітні властивості, на межі перколяційного ефекту – різкого зростання електропровідності з певної концентрації наповнювача у діелектричній матриці. Цей ефект настає на певній частоті електро-

магнітного випромінювання. Концентрація наповнювача у наступному шарі збільшується, що повинне відповідати нижчій частоті випромінювання. Такий підхід збільшує частотну смугу ефективності електромагнітного екрана. Слід враховувати, що поріг протікання електричного струму у кожному окремому випадку слід визначати експериментально. Цей показник залежить не тільки від електрофізичних показників компонентів і матеріалу в цілому, а й від дисперсності наповнювача, форми частинок та характеру їх розподілу у діелектрику. Орієнтовні концентрації наповнювача за об'ємом можливо оцінити з використанням співвідношень теорії протікання [10], але лабораторні дослідження є обов'язковими. За можливості (певних максимальних товщин матеріалів) між захисними шарами доцільно передбачити узгоджувальний діелектричний шар. Наявність границь розділу підвищує загальну ефективність захисного шару.

Висновки

1. Встановлено, що захисні покриття товщиною, меншою за чверть довжини падаючої електромагнітної хвилі при нанесенні на металеві поверхні можуть знижувати коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль до 0,7–0,6 випадковим чином, що пов'язане з резонансними явищами. Частотні смуги зниження коефіцієнтів відбиття вузькі й непередбачувані. Значного зниження коефіцієнтів відбиття за різних концентрацій провідної та магнітної субстанції у композиції не спостерігається.

2. Визначено, що досягти балансу співвідношень магнітних та електрофізичних показників кінцевого продукту розрахунковими та експериментальними методами складно через залежність цих параметрів не тільки від значень окремих компонентів композицій, а й морфології магнітних та провідних частинок, їх розподілів у тілі діелектричної матриці, режиму полімеризації тощо.

3. Для зниження коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль й підвищення поглинання електромагнітної енергії запропоновано застосування багатшарового тонкого покриття. Концентрація магнітної та провідної субстанції у зовнішньому шарі найнижча й зростає у внутрішніх шарах. Умовою ефективності покриття є концентрація провідних частинок у кожному шарі на межі перколяційного ефекту. Оцінка необхідної концентрації наповнювача можлива із застосуванням теорії протікання, виходячи зі співвідношень електродинаміки суцільних середовищ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Панова О.В., Тихенко О.М., Ніколаєв К.Д., Ходаковський О.В., Сапельнікова О.Ю. Дослідження захисних властивостей металевих електромагнітних екранів та визначення умов їх максимальної ефективності. Системи управління, навігації та зв'язку. 2019. Вип. 5(57). С. 103–107.
2. Глива В.А., Панова О.В., Тихенко О.М., Левченко Л.О., Колумбет В.П. Дослідження амплітудно-частотних залежностей захисних властивостей магнітних екранів на основі аморфних сплавів. Системи управління, навігації та зв'язку. 2019. Вип. 6(58). С. 102–107.
3. Glyva V., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Radomska M. The composite facing material for electromagnetic fields shielding. Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 907. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012043/meta>
4. Tudose I.V., Mouratis K., Ionescu O.N., Romanitan C., Pachi C., Popescu M., Khomenko V., Butenko O., Chernysh O., Kenanakis G., Barsukov V.Z., Suchea 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>
5. Alina Ruxandra Caramitu, Ioana Ion, Adriana Mariana Bors, Violeta Tsakiris, Jana Pintea, Ana-Maria Daniela Caramitu. Preparation and Spectroscopic Characterization of Some Hybrid Composites with Electromagnetic Shielding Properties Exposed to Different Degradation Factors. MATERIALE PLASTICE. 2023. 59. 82-94 <https://doi.org/10.37358/MP.22.4.5627>
6. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, 3(6-111), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>
7. 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. Butenko O., Boychuk V., Savchenko B., Kotsyubynsky V., Khomenko V., Barsukov V. Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. Materials Today: Proceedings. 2019. V. 6, pp. 270–278
9. 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>.
10. G. Krasnianskyi, V. Glyva, N. Burdeina, Y. Biruk, L. Levchenko, O. Tykhenko. 2024. Methodology For Designing Facing Building Materials with Electromagnetic Radiation Shielding Functions. INTERNATIONAL JOURNAL OF CONSERVATION SCIENCE. Volume 15, Special Issue 1, 2024: 53-62. DOI: 10.36868/IJCS.2024.SI.05

Received (Надійшла) 25.07.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Ніколаєв Кирило Дмитрович – доктор наук з державного управління, кандидат сільськогосподарських наук, професор кафедри публічного адміністрування, Міжрегіональна академія управління персоналом, старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту розвідки, Київ, Україна;

Kyrylo Nikolaiev – Doctor of Science in Public Administration, PhD (Agrarian Sciences), Professor of the Department of Public Administration, Interregional Academy of Personnel Management, Senior Researcher at the Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: nikolaevkirill@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0404-6113>,

Scopus ID <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=42762116000#>.

Білик Артем Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва та архітектури, Начальник науково-дослідної лабораторії Науково-дослідного інституту воєнної розвідки, Київ, Україна;

Artem Bilyk – Candidate of Technical Sciences, PhD, Associate Professor, Kyiv National University of construction and architecture, Head of the Scientific Research Laboratory in the Defence Intelligence Research Institute, Kyiv, Ukraine;

e-mail: artem.bilyk@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9219-920X>.

Сапожников Костянтин Миколайович – начальник відділу, Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, Київ, Україна;

Kostiantyn Sapozhnykov – Head of Department, Defence Intelligence Research Institute;

e-mail: sapozhnykov_kos@meta.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0259-3690>.

Principles of development of electromagnetic screens with small dimensions and weight

Kyrylo Nikolaiev, Artem Bilyk, Kostiantyn Sapozhnykov

Abstract. The possibilities of developing thin-film materials for shielding ultra-high and higher frequency electromagnetic radiation are analysed. It is shown that coatings with a thickness less than a quarter of the wavelength of the incident electromagnetic wave (400–500 μm) do not provide low reflection coefficients when applied to a metal surface. The reduction of reflection coefficients to 0.7–0.6 occurs randomly at different frequencies. This is due to resonance phenomena in the coating. The frequency band of minimum reflection is narrow and has no practical significance. It has been shown that it is difficult to achieve an acceptable balance of magnetic and electrophysical properties of a thin coating to minimise reflection coefficients. This is due to the dependence of the final product's performance not only on the magnetic and dielectric properties of the components and their concentrations, but also on the morphology of the particles, their distribution in the matrix body, and the polymerisation mode. In addition, magnetic and electrophysical properties have an amplitude-frequency dependence. It has been proven that in order to ensure low electromagnetic wave reflection coefficients and high electromagnetic energy absorption, it is advisable to use a multilayer structure. The layers must have different magnetic and electrophysical properties. At the same time, the lowest filler concentrations are in the upper layer. These concentrations should be at the limit of the percolation effect – a sharp increase in the electrical conductivity of the composition. These concentrations can be estimated using the theory of electrodynamics of continuous media. If possible, it is advisable to provide a dielectric layer between the layers. The presence of boundaries increases the overall effectiveness of the protective coating.

Keywords: electromagnetic radiation, electromagnetic screen, reflection coefficient.