

DOI: 10.32347/2786-7269.2023.5.192-200

УДК 538.69.331.45

д.т.н., професор Сукач С.В.,
sergvs69@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6834-0197,к.т.н., доцент Рєзнік Д.В.,
2411dimareznik@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1258-6136,
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Розглянуто основні засади підвищення коефіцієнтів екранування електромагнітних полів композиційними матеріалами. Показано, що захисні властивості у низькочастотній та високочастотній областях електромагнітного спектра забезпечуються різними фізичними механізмами. Тому, для забезпечення прийнятних захисних властивостей необхідно узгодити співвідношення електрофізичних і магнітних властивостей матеріалів на основі компромісних рішень. Головною умовою у процесі проектування матеріалів є врахування сильної частотної залежності діелектричної та магнітної проникностей частинок наповнювачів. Для прогнозування необхідного об'ємного вмісту екрануючого наповнювача у діелектричній матриці можливо застосовувати формули Максвелла-Гарнета, Оделевського, Лорентца. При цьому слід враховувати, що розбіжності між розрахунковими і експериментальними результатами складають не менше 20 %. Для одночасного ефективного екранування електромагнітних полів наднизької частоти та ультрависоких частот матеріал повинен мати як достатні магнітні властивості, так і прийнятну електропровідність. Це можливо досягти за рахунок оброблення вихідної суміші із вмістом феромагнітних частинок постійним магнітним полем напруженостями 200–300 А/м. За упорядкування розташування екрануючих частинок у тілі композиту утворюються кола провідності. За вмісту екрануючого матеріалу 12–16 % за об'ємом досягається перколяційний ефект – різке підвищення електропровідності матеріалу і підвищення захисних властивостей. Кількість наповнювача залежить не тільки загального об'єму, а й від розмірів окремих частинок. Таким чином досягається одночасне екранування як магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти, так і електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. Показано, що доцільно дослідити можливість упорядкування у тілі композиту немагнітних частинок за рахунок оброблення вихідної суміші електричним полем.

Ключові слова: композиційний матеріал; електромагнітна безпека; екранування; електрофізичні властивості.

Вступ. Розроблення і впровадження сучасних засобів екранування електромагнітних полів широкого спектра є одним з пріоритетних напрямів робіт з електромагнітної безпеки. Це пояснюється тим, що екрануючі матеріали застосовуються не тільки для захисту людей у виробничих та побутових умовах, а і для забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання і технічного захисту інформації. Найбільш прийнятними екрануючими матеріалами є композиційні матеріали. Їх перевагами є регульованість ефективності (коефіцієнтів екранування) та можливість зниження внеску у загальний коефіцієнт екранування за рахунок відбиття електромагнітних хвиль. Але розроблення і впровадження таких матеріалів зустрічається з низкою проблем: недостатня ефективність у певних діапазонах частот, значні товщини за великих коефіцієнтів екранування та висока вартість. Ці проблеми взаємно пов'язані: забезпечення широкосмуговості матеріалу призводить до необхідності збільшення кількості екрануючих компонентів, що ускладнює технології виготовлення і підвищує вартість кінцевого продукту. Зменшення товщини автоматично знижує коефіцієнти екранування за рахунок поглинання електромагнітної енергії, а підвищення електропровідності матеріалу збільшує коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. Очевидно, що у таких умовах для підвищення ефективності матеріалів існують два шляхи: розроблення матеріалів для конкретної електромагнітної обстановки з урахуванням переважних частот електромагнітних полів, які потребують екранування, або пошук компромісу, тобто раціоналізація критичних параметрів композиції, що забезпечить прийнятну ефективність матеріалу у широкому частотному діапазоні. З огляду на складність електромагнітної обстановки у сучасних будівлях і спорудах, принаймні промислових, актуальною задачею є визначення засобів підвищення ефективності композицій без суттєвого збільшення масогабаритних параметрів і вартості технології виготовлення та застосування композиційних матеріалів для покриття великих площ зі складним рельєфом.

Сучасний стан питання. В останні десятиріччя розроблено та досліджено захисні властивості багатьох типів композицій для екранування електромагнітних полів із застосуванням різних матриць та типів екрануючих наповнювачів. Враховуючи резонансність у суспільстві проблем впливу на здоров'я людей високочастотних випромінювань (мобільного зв'язку) більшість досліджень у цій галузі стосуються матеріалів для захисту від електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. Так, у роботах [1, 2] наведено результати

випробувань композиції на основі полімерів із застосуванням наповнювачі з алюмінію та феритів. Але у першому випадку різко зростає коефіцієнт відбиття, у другому спостерігається зниження коефіцієнта екранування через малу електропровідність матеріалу. Останнім часом багато уваги приділяється рідким композиціям [3–5]. Вони дуже ефективні у високочастотній частині електромагнітного спектра (ультрависокі і вищі частоти), але мають високу вартість через застосування розширеного графіту та графітизованої сажі. Такі матеріали можна застосовувати для підвищення стійкості електронного обладнання до електромагнітних завад, але для облицювання поверхонь великих площ вони неприйнятні. До того ж багатокомпонентні композиції мають схильність до деградації у процесі експлуатації [6]. Для підвищення ефективності із збереженням малої товщини матеріалу використовують нанотехнології [7, 8]. Але перша робота має складну технологію виготовлення – наноструктури утворюються у процесі виготовлення матеріалу, а друга використовує магнітну рідину з нанозалізом для просочування тканини у неоднорідному магнітному полі. Магнітна рідина має дуже високу вартість, що обумовлює високу вартість кінцевого продукту. Останнім часом виконано низку досліджень і розробок щодо рідких захисних композицій відносно простої технології виготовлення [9, 10]. Перевагами таких матеріалів є застосування матриць зі стандартних лакофарбових матеріалів та наявність одного екрануючого матеріалу. Але результати досліджень свідчать, що коефіцієнти екранування в усіх смугах частот відносно невеликі, а зростання поглинання електромагнітної енергії призводить до підвищення відбиття електромагнітних хвиль. Таким чином існує потреба розроблення методологічних та технологічних засад підвищення ефективності захисних композицій з прийнятним зростанням складності технології виготовлення та вартості кінцевого матеріалу.

Мета роботи – визначення засобів підвищення захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Викладення основного матеріалу. У загальному випадку раціоналізація, або навіть оптимізація параметрів захисної структури, базується на варіаціях SE_r (ефективність за рахунок відбиття електромагнітних хвиль), SE_a (ефективність екранування за рахунок поглинання електромагнітної енергії) та SE_{mr} (екранування за рахунок багаторазового відбиття електромагнітних хвиль у товщині захисного матеріалу. Тобто загальна ефективність екранування визначається як:

$$SE = SE_r + SE_a + SE_{mr} ,$$

Для матеріалів малої товщини та ізотропного складу остання складова не є суттєвою. У реальних умовах критичними є перші два члени співвідношення.

У логарифмічних одиницях відбиття та поглинання електромагнітних хвиль визначаються як:

$$SE = 20 \lg \frac{Z}{Z_0} + 20 \lg \exp \frac{d}{\delta},$$

де Z – хвильовий опір (імпеданс) матеріалу екрана,

Z_0 – опір середовища розповсюдження електромагнітних хвиль повітря (377 Ом),

d – товщина екрана,

δ – товщина скін шару (глибина на якій інтенсивність поля знижується у e разів – 2,7).

Але наведені параметри також мають складні залежності. Хвильовий опір залежить від електрофізичних та магнітних властивостей матеріалу (ϵ , μ – електрична та магнітна проникності, σ – питома електропровідність). Глибина проникнення поля у тіло матеріалу функціонально залежить від частоти екранованого поля f , магнітної проникності μ та провідності σ .

$$\delta = \sqrt{\pi f \mu \sigma}.$$

Якщо $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$, де μ_0 та ϵ_0 – магнітна та електрична сталі, то $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$, де μ

та ϵ – проникності матеріалу.

Простота застосування цих співвідношень для проектування захисних матеріалів уявна. Це пояснюється значними частотними залежностями електричних та магнітних властивостей наповнювача.

Наприклад, навіть у одному частотному діапазоні надзвичайно високих частот за однакового вмісту нікелю у матриці за зміни частоти поля від 30 до 120 ГГц коефіцієнт ослаблення електромагнітної хвилі змінюється від -12 дБ до -40 дБ. При цьому коефіцієнт відбиття практично не змінюється.

Розглядаючи комплексні магнітні та діелектричні проникності матеріалів $\mu = \mu' + j\mu''$ та $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$, де μ' , ϵ' – дійсні частини комплексних проникностей, μ'' , ϵ'' – уявні частини комплексних проникностей, то коефіцієнт втрат електромагнітної енергії визначається, в основному уявними складовими проникностей та їх відношеннями до дійсних складових (тангенс кутів діелектричних та магнітних втрат).

Визначити реальні електрофізичні властивості композицій можливо експериментально, але для цього потрібне виготовлення великої кількості дослідних зразків. Оціночне визначення (прогнозування) таких властивостей можливе застосуванням емпіричних співвідношень. Це можливо, якщо відомі електрофізичні властивості матеріалів матриці та екрануючих наповнювачів.

Для визначення діелектричної проникності композиції можливо застосовувати співвідношення Максвелла-Гарнета та формулу Оделевського. Остання дає можливість врахування морфології (форми) екрануючих частинок. Але спектр розмірів (довжини та середніх діаметрів) зазвичай широкий, тому для практичних розрахунків необхідно обрати якісь переважні параметри, визначені візуально, наприклад, за допомогою вимірювального мікроскопу. Для визначення магнітної проникності композиту можливо використати формулу Лорентца. Слід враховувати, що за вмісту наповнювача більше 1/3 співвідношення надають великі похибки. Також, у процесі проєктування матеріалів слід враховувати частотні залежності магнітної проникності. Наприклад, зі збільшенням частоти електромагнітного поля від 10^2 до 10^5 МГц відносна проникність заліза змінюється зі 100 до 10, а нікелю з 22 до 2. Порівняння експериментальних даних з розрахунковими свідчить, що відмінності складають 20–25 %. При цьому розрахункові дані можуть бути як кращими, так і гіршими за експериментальні.

Надійність експериментальних даних також може бути неоднозначною. Випробування зразків у хвилеводах свідчить, що параметри захисних властивостей мають чітку частотну періодичну залежність, тобто коливання ефективності екранування імовірно обумовлені резонансними явищами у хвилеводі.

Тому, принаймні на заключному етапі розроблення матеріалу, доцільно провести випробування на зразках реальних розмірів з унеможливлення впливу дифракційних явищ. З технологічних та економічних міркувань доцільно розробляти матеріали достатньої ефективності як і у низькочастотній області електромагнітного спектра (в основному – промислової частоти), так і у високочастотній – частоти мобільного зв'язку, інші частоти бездротової передачі інформації. Враховуючи, що головною проблемою у низькочастотній області є екранування магнітної складової електромагнітного поля, наповнювач повинен мати магнітні властивості. Це залізовмісні сполуки, нікель, кобальт тощо. При цьому для високочастотних випромінювань найбільш критичною є достатня електропровідність матеріалу. Для композитів забезпечення цього параметру можливе за рахунок формування кіл провідності, за рахунок упорядкованості провідних частинок. За їх численних контактах досягається перколяційний ефект – різке зростання провідності і захисних властивостей.

Досвід експериментальних досліджень свідчить, що таке явище настає за вмісту екрануючої субстанції у полімерній матриці 12–16 % за об'ємом. З точки зору технологічності кінцевого матеріалу бажано мінімізувати його товщину. Тому екрануючі частинки необхідно упорядкувати. Це можливо реалізувати за рахунок оброблення металополімерної суміші постійним магнітним полем. При цьому ферромагнітні частинки орієнтуються за напрямком магнітного поля і фіксуються під час висихання або полімеризації суміші. Досвід показує, що для такої обробки, принаймні для рідких полімерів типу латекс достатньою є напруженість магнітного поля 200 – 300 А/м, що досягається звичайними постійними або електромагнітами. Перспективним напрямом підвищення ефективності захисних матеріалів є впорядкування провідних немагнітних частинок, наприклад графіту. Доцільно виконати серію експериментальних робіт щодо підвищення електропровідності таких композицій за рахунок оброблення вихідної суміші електричним полем за рахунок поляризації частинок наповнювача.

ВИСНОВКИ

1. Наведено основні принципи проєктування композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Показано, що для отримання матеріалів прийнятної ефективності у широкому частотному діапазоні необхідно раціоналізувати співвідношення електрофізичних та магнітних властивостей матеріалів.

2. Проєктування матеріалів доцільно здійснювати на основі попереднього розрахункового оцінювання діелектричної та магнітної проникностей кінцевого матеріалу. При цьому слід враховувати частотну залежність магнітної та діелектричної проникностей матеріалів наповнювачів. Встановлено, що розбіжності між розрахунковими і фактичними значеннями проникностей композицій складають не менше 20 %.

3. Для мінімізації товщин кінцевих матеріалів доцільне впорядкування розташування частинок наповнювача у матриці. Для ферромагнітних частинок це можливо за рахунок оброблення суміші у рідкому стані магнітним полем напруженістю 200–300 А/м. Перспективним напрямом досліджень є впорядкування немагнітного наповнювача за рахунок оброблення електричним полем.

Список літератури

1. Patil N., Velhal N.V., Pawar R., Puri V. Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate. *Microelectronics International*. 2015. Vol. 32 (1). P. 25–31.

2. Sedlacik M., Mrlik M., Babayan V., Pavlinek V. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures*. 2016. Vol. 135. P. 199–204.
3. Viacheslav Barsukov, Ilona Senyk, Olena Kryukova, Oksana Butenko. *Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. Materials Today: Proceedings*, 2018, V. 5, No 8, Part 1, pp. 15909-15914.
4. 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.
5. 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.
6. Alina Ruxandra Caramitu, Ioana Ion, Adriana Mariana Bors, Violeta Tsakiris, Jana Pinteа, 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>
7. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В., Насонова Н.В., Белоусова Е.С., Бойправ О.В. Новые технологии создания экранов электромагнитного излучения на основе модифицированных порошковых, наноструктурированных и пленочных материалов. Доклады БГУИР. 2019. № 2 (120). С. 85–99.
8. Багрій М.М., Левченко Л.О., Тихенко О.М., Колумбет В.П., Резнік Д.В. Розроблення та дослідження властивостей текстильного матеріалу від впливу електромагнітних полів. Вісник національного університету водного господарства та природокористування. 2019. Вип. 1(85). С. 237-244.
9. Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І. Засоби підвищення ефективності рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава. 2022. Т. 4 (70). С. 138-141. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.138>.
10. Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Ніколаєв К.Д.. 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>.

Doctor of Science, Professor **Sukach Serhii**,
PhD, Associate Professor **Rieznik Dmytro**,
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

METHODS AND MEANS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF COMPOSITE MATERIALS FOR SHIELDING ELECTROMAGNETIC FIELDS

The main principles of increasing the shielding coefficients of electromagnetic fields by composite materials are considered. It is shown that the protective properties in the low-frequency and high-frequency regions of the electromagnetic spectrum are provided by different physical mechanisms. Therefore, to ensure acceptable protective properties, it is necessary to coordinate the ratio of electrophysical and magnetic properties of materials based on compromise solutions. The main condition

in the process of designing materials is to take into account the strong frequency dependence of the dielectric and magnetic permeability of filler particles. To predict the required volume content of the shielding filler in the dielectric matrix, it is possible to use the Maxwell-Garnett, Odelevsky, and Lorentz formulas. At the same time, it should be taken into account that the differences between calculated and experimental results are at least 20 %. For simultaneous effective shielding of ultra-low-frequency and ultra-high-frequency electromagnetic fields, the material must have both sufficient magnetic properties and acceptable electrical conductivity. This can be achieved by treating the original mixture containing ferromagnetic particles with a constant magnetic field of 200–300 A/m. By arranging the arrangement of shielding particles in the body of the composite, conduction circles are formed. With a shielding material content of 12–16 % by volume, a percolation effect is achieved - a sharp increase in the electrical conductivity of the material and an increase in protective properties. The amount of filler depends not only on the total volume, but also on the size of individual particles. In this way, simultaneous shielding of both the magnetic component of the industrial frequency electromagnetic field and ultrahigh and higher frequency electromagnetic fields is achieved. It is shown that it is expedient to investigate the possibility of arranging non-magnetic particles in the body of the composite by treating the initial mixture with an electric field.

Keywords: composite material; electromagnetic safety; shielding; electrophysical properties.

REFERENCES

1. Patil N., Velkhal N.V., Pavar R., Puri V. Elektrychni, mahnitni ta vysokochastotni vlastyvoli ferytno-sehnetoelektrychnykh kompozytnykh tovstykh plivok trafaretneho duku na pidkladtsi z oksydu aliuminiuu. *Microelectronics International*. 2015. Vyp. 32 (1). S. 25–31. {in English}
2. Sedlacik M., Mrlik M., Babaian V., Pavlinek V. Mahnitoreolohichni elastomery z efektyvnym elektromahnitnym ekranuvanniam. *Kompozytni konstruktsii*. 2016. Vyp. 135. S. 199–204. {in English}
3. Viacheslav Barsukov, Ilona Senyk, Olena Kryukova, Oksana Butenko. *Kompozytni vuhletsevo-polimerni materialy dlia zakhystu vid elektromahnitnoho vyprominiuvannia. Materialy s'ohodni: Zbirnyk naukovykh prats'*, 2018, T. 5, № 8, Ch. 1, S. 15909-15914. {in English}
4. Butenko O., Boychuk V., Savchenko B., Kotsyubynsky V., Khomenko V., Barsukov V. Chystyj naddispersnyj mahnetyt z vidkhodiv vuhletsevoi stali. *Materialy s'ohodni: Materialy*. 2019. T. 6, S. 270–278. {in English}
5. Senyk I., Kuryptia Y., Barsukov V., Butenko O., Khomenko V. Rozrobka ta zastosuvannia tonkykh shyrokosmuhovykh ekranuiuchykh

kompozytsijnykh materialiv. *Fizyka i khimiiia tverdoho tila*. 2020. 21(4). Stor. 771–778. {in English}

6. Alina Ruxandra Caramitu, Ioana Ion, Adriana Mariana Bors, Violeta Tsakiris, Jana Pinte, Ana-Maria Daniela Caramitu. Pryhotuvannia ta spektroskopichna kharakterystyka deiakykh hibrydnykh kompozytiv iz vlastyvyostiamy elektromahnitnoho ekranuvannia, iaki pidaiut'sia vplyvu riznykh faktoriv dehradatsii. *MATERIAL PLASTYKU*. 2023. 59. 82-94 <https://doi.org/10.37358/MP.22.4.5627> {in English}

7. Lyn'kov L.M., Bohush V.A., Borbot'ko T.V., Nasonova N.V., Belousova E.S., Bojprav O.V. Novi tekhnologii stvorennia ekraniv elektromahnitnoho vyluchennia na osnovi modyfikovanykh poroshkovykh, nanostrukturovanykh i plenochnykh materialiv. *Doklady BHUYR*. 2019. № 2 (120). S. 85–99. {in Russian}

8. Bahrij M.M., Levchenko L.O., Tykhenko O.M., Kolumbet V.P., Rieznik D.V. Rozroblennia ta doslidzhennia vlastyvyostej tekstyl'noho materialu vid vplyvu elektromahnitnykh poliv. *Visnyk natsional'noho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*. 2019. Vyp. 1(85). S. 237-244. {in Ukrainian}

9. Burdejna N.B., Biruk Ya.I. Zasoby pidvyschennia efektyvnosti ridynnykh materialiv dlia ekranuvannia elektromahnitnykh poliv shyrokooho chastotnoho diapazonu. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku. Zbirnyk naukovykh prats'*. Poltava. 2022. T. 4 (70). S. 138-141. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.138>. {in Ukrainian}

10. Burdejna N.B., Biruk Ya.I., Nikolaiev K.D.. Rozroblennia materialiv bahatosharovoi struktury hradiientnoho typu na osnovi ridkykh kompozytsij dlia ekranuvannia elektromahnitnykh poliv. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*. 45 (1). S. 68–75. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.68-75>. {in Ukrainian}