

ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РІДИННИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

Анотація. Нормативно-правові європейські та національні вимоги формують низку питань, пов'язаних із одночасним забезпеченням електромагнітної безпеки людей у виробничих і побутових умовах, а також електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання. Проведено дослідження з розроблення і впровадження ефективних захисних матеріалів від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Запропоновано методологічний підхід для виготовлення рідких композицій для екранування електромагнітних полів промислової частоти, дуже високих та ультрависоких частот. Для проведення досліджень матрицею як носієм наповнювача обрано водно-дисперсійну фарбу. У якості наповнювачів застосовувалися концентрат залізної руди з переважним (до 75–80 %) вмістом магнетиту та ливарний лускатий графіт. Визначення захисних властивостей експериментальних зразків здійснювалися через встановлення залежності коефіцієнтів екранування електричного поля промислової частоти, магнітного поля промислової частоти та електромагнітного поля ультрависокої частоти від вагового вмісту наповнювача. Вимірювання напруженостей електричного та магнітного поля виконувалися каліброваним приладом ПЗ-50. Вимірювання щільності потоку енергії електромагнітного поля ультрависокої частоти здійснювалися каліброваним приладом ПЗ-31. Вимірювання коефіцієнтів екранування здійснювалися з використанням замкнених екранів, усередину яких крізь технологічний отвір вміщувалася вимірювальна антена. Знаходження прийнятних співвідношень електрофізичних та магнітних властивостей складових композиту обумовлює необхідність попереднього розрахункового оцінювання властивостей для отримання потрібних коефіцієнтів екранування. Найбільш придатними для частинок магнетиту у залізородному концентраті є співвідношення Лорентца та співвідношення Максвелла-Гарнета. Для графіту доцільно скористатися формулою Оделевського. Показано, що дані композити на рідинній основі мають ряд переваг через їх відносну простоту виготовлення та зручність нанесення на поверхні великих площ та складних конфігурацій, а також регульованість коефіцієнтів поглинання та відбиття за рахунок фізико-хімічного складу та технологій виготовлення. Застосування композиційних рідинних матеріалів дозволяє вирішувати задачі забезпечення електромагнітної безпеки, електромагнітної сумісності і є доцільним з технічних та економічних міркувань.

Ключові слова: композиційні рідинні матеріали, екранування, електромагнітні поля.

Вступ

Імплементация вимог європейської директиви з електромагнітної безпеки [1] до нормативно-правової бази України породжує низку проблем, пов'язаних із забезпеченням електромагнітної безпеки людей у виробничих та побутових умовах. Значна частина вимог загальноєвропейських стандартів і санітарних норм жорсткіша за національні, тому національні норми засобів і заходів захисту від електромагнітних впливів потребують перегляду. Крім захисту людей актуальною задачею є одночасне забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання. Європейські нормативи щодо електромагнітної сумісності, наприклад, [2] вже прийняті в Україні методом підтвердження. Одночасно мають вирішуватися задачі підвищення електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності, тому потребує розроблення і впровадження комплекс заходів зі зниження рівнів електромагнітних полів у приміщеннях та будівлях в цілому. Вагомою складовою такого комплексу є розроблення ефективних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Традиційні металеві екрануючі конструкції не відповідають вимогам сьогодення, тому головним їх недоліком є великі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. Це є небажаним в умовах високої

інтенсивності електромагнітних випромінювань дуже високих та ультрависоких частот, гранично допустимий рівень яких становить 100 мкВт/см^2 . Найбільш прийнятними є композиційні захисні матеріали, для яких коефіцієнти поглинання та відбиття можуть бути регульованими за рахунок фізико-хімічного складу та технологій виготовлення. Переважна більшість існуючих композитів призначена для захисту від впливу електромагнітних полів одного частотного діапазону або певної частотної смуги. В той же час у сучасних будівлях і спорудах спостерігається підвищений електромагнітний фон як електромагнітних полів наднизьких частот (в основному промислової частоти та її гармонік і інтергармонік), так і електромагнітних полів надвисоких та вищих частот. Отже, актуальною задачею є розроблення і впровадження ефективних захисних матеріалів від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Перевагами захисних композитів на рідинній основі є відносна простота виготовлення та зручність нанесення на поверхні великих площ та складних конфігурацій. Тому підвищення ефективності рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону є перспективним напрямом забезпечення електромагнітної безпеки, електромагнітної сумісності і є доцільним з технічних та економічних міркувань.

Огляд літературних джерел. На сьогоднішній день питанням розроблення композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів приділяється багато уваги. У роботі [3] показано результати розроблення і дослідження захисних властивостей металополімерних матеріалів на основі феритів з додаванням дрібнодисперсного алюмінію. Ці матеріали мають достатню загальну ефективність через значні коефіцієнти відбиття, зумовлені великим вмістом алюмінію. Нанокompозитні матеріали мають значно нижчі коефіцієнти відбиття [4], але використання наповнювача нанорозмірів, з достатніми концентраціями, збільшує вартість кінцевого продукту і робить його непридатним для покриття поверхонь великих площ, таких як стелі, стіни тощо.

Матеріали з прийнятною вартістю у більшості мають ефективність в одному частотному діапазоні, в основному – мікрохвильовому [5]. Загальним недоліком більшості металополімерних композицій є велика товщина і жорсткість, що знижує технологічність їх застосування для покриття конструкцій складних конфігурацій і обумовлює велику кількість відходів.

Найбільш прийнятними, щодо практичного застосування, є рідкі композиційні захисні матеріали [6, 7]. Але у роботі [6] обґрунтовано застосування поряд із графітом, графітизованої сажі, яка не зважаючи на велику вартість, робить матеріал придатним для екранування електромагнітного поля локальних джерел. Ефективність матеріалу у широкому діапазоні частот для дуже високих і вищих частот відносна [7], оскільки значний внесок у електромагнітну обстановку дають електричні та магнітні поля наднизьких та низьких частот.

У роботі [8] показано, що матеріали на основі певних серійних лакофарбових матеріалів мають прийнятні адгезію і когезію навіть за значного вагового вмісту (до 40–50 %) металеві субстанції.

У дослідженні [9] наведено результати випробувань матеріалів на основі поширених фарб з наповнювачем із магнетиту. За достатньої ефективності екранування магнітної та електричної складових електромагнітного поля промислової частоти та її гармонік, коефіцієнти екранування електромагнітних полів ультрависоких частот недостатні. Це обумовлене постійним підвищенням робочих частот усіх засобів бездротового зв'язку. Тому доцільно розробити і дослідити захисні властивості рідких екрануючих сумішей з прийнятними коефіцієнтами екранування в усіх діапазонах частот та критичних частотних смугах.

Метою роботи є розроблення концептуальних засад підвищення ефективності та регульованості властивостей композиційних рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Викладення основного матеріалу

Для проведення досліджень матрицею як носієм наповнювача обрано водно-дисперсійну фарбу. У попередній роботі [9] застосування було отримано найгірший результат, але такі фарби дуже поширені, зручні у використанні та мають низьку вартість. У якості

наповнювачів застосовувалися концентрат залізної руди з переважним (до 75–80 %) вмістом магнетиту та ливарний лускатий графіт, який у достатніх кількостях виробляється в Україні. Визначення захисних властивостей матеріалів у діапазоні наднизьких частот здійснювалися за електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц.

Вимірювання виконувалися каліброваним вимірювачем напруженостей електричного та магнітного поля ПЗ-50. Основна похибка вимірювань не перевищувала 1 дБ. Вимірювання щільності потоку енергії електромагнітного поля ультрависокої частоти здійснювалися на частоті 2,45 ГГц з використанням каліброваного приладу ПЗ-31. Максимальна основна похибка вимірювань не перевищувала 2,7 дБ.

Вимірювання коефіцієнтів екранування здійснювалося з використанням замкнених екранів розмірами (0,2×0,2×0,2) м, усередину яких крізь технологічний отвір вміщувалася вимірювальна антена. Товщина захисного шару складала 60–70 мкм.

Коефіцієнтом екранування вважається відношення напруженості поля (або щільності потоку енергії) перед екраном до напруженості поля у захищеній зоні.

Було послідовно виміряно зміну напруженостей електричної, магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти та щільності потоку енергії внаслідок її екранування.

Результати екранування електричної складової електромагнітного поля промислової частоти від вагового вмісту наповнювача наведено на рис. 1.

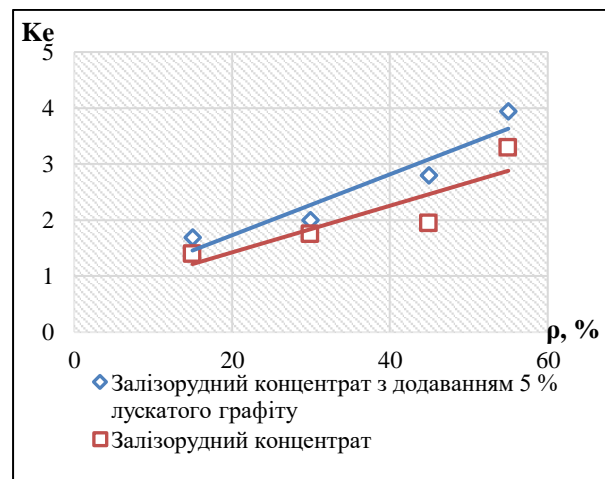


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів екранування електричного поля промислової частоти (K_e) від вагового вмісту наповнювача (ρ , %)

Аналогічні вимірювання було проведено щодо магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти, рис. 2.

Результати екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц наведено на рис. 3.

Аналіз результатів, представлених на рис. 1–3, свідчить, що додавання навіть невеликої кількості лускатого графіту значно підвищує коефіцієнти екранування низькочастотного електричного та високо-частотного електромагнітного полів.

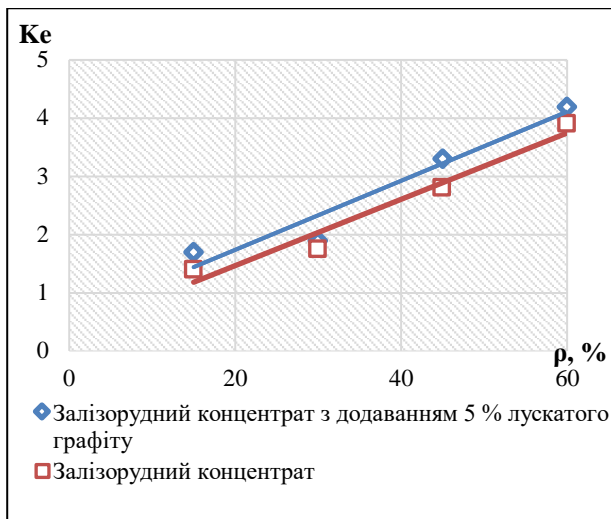


Рис. 2. Залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти (K_e) від вагового вмісту наповнювача (ρ , %)

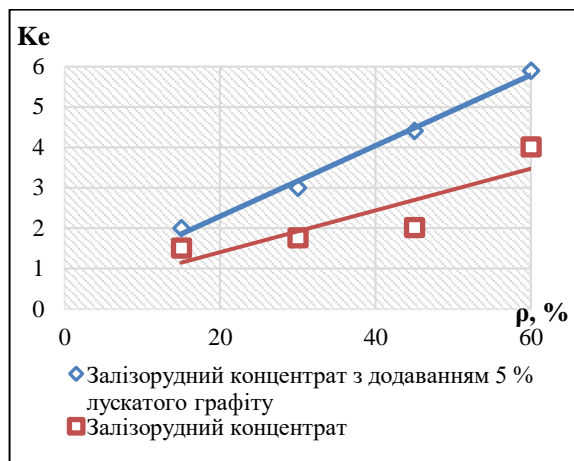


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти (K_e) від вагового вмісту наповнювача (ρ , %)

Вочевидь, це пов'язано з підвищенням провідності матеріалу (питома провідність даного графіту – $1,0 \cdot 10^{-2} - 2,0 \cdot 10^{-2}$ См/м), а основного наповнювача – магнетиту – порядку 10^{-4} См/м. При цьому вплив графіту на напруженості магнітного поля практично відсутній, оскільки цей параметр обумовлений виключно магнітними властивостями компонентів матеріалу. В цілому отримані результати можна пояснити з точки зору фундаментальних положень електродинаміки суцільних середовищ.

Необхідність пошуку балансу електрофізичних та магнітних властивостей складових композиту для раціоналізації коефіцієнтів екранування полів найбільш критичних частот та частотних смуг обумовлює необхідність попереднього розрахункового оцінювання властивостей для отримання потрібних коефіцієнтів екранування. Найбільш придатними для цього є співвідношення Лоренца:

$$\mu = 1 + \frac{\nu_m(\mu_m - 1)}{1 + \frac{1 - \nu_m}{3}(\mu_m - 1)},$$

де μ – ефективна магнітна проникність магнітодіелектрика, μ_m – магнітна проникність наповнювача, ν_m – об'ємний вміст наповнювача у матеріалі. Та співвідношення Максвелла-Гарнета:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon + 2\varepsilon_d} = \nu_m \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_d},$$

ε_d , ε_m – діелектричні проникності матриці та наповнювача, ν_m – об'ємна доля наповнювача у діелектричній матриці. Але у цих співвідношеннях частинки наповнювача вважаються умовно сферичними.

Якщо для частинок магнетиту у залізорудному концентраті сферичне наближення прийнятне, то для графіту виникають труднощі через видовжену форму окремих частинок. У цьому випадку доцільно скористатися формулою Оделевського:

$$\varepsilon = \varepsilon_d \left[1 + \frac{\nu_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)}{(1 - \nu_m/\nu_k) \cdot F \cdot (\varepsilon_m - \varepsilon_d) + \varepsilon_d} \right],$$

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

$$F = \ln(2l/d) / (l/d)^2,$$

де l , d – середні довжина частинки та діаметр.

$$\nu_k = \frac{[3F(1-F)]^{0,6}}{[4F\sqrt{l/d} + (1+F)/\sqrt{l/d}]^{0,6}}.$$

Застосування таких розрахунків свідчить, що вони дають прийнятні орієнтири щодо складу композиційних матеріалів для отримання потрібних кінцевих параметрів.

Наведені експериментальні дані щодо коефіцієнтів екранування значно нижчі порівняно з розробками [6, 7], де отримані коефіцієнти екранування до 20 дБ і вище ($K_e - 100$). Але досвід інструментального моніторингу електромагнітної обстановки свідчить, що перевищення гранично допустимих рівнів практично ніколи не буває більшим за 2–3 рази. Тобто, забезпечення коефіцієнтів екранування на рівні 10–12 враховує навіть вимоги принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable), тобто зниження рівнів полів до розумно досяжних. В той же час використані матеріали на порядок дешевші за аналоги, а кінцевий продукт має прийнятні властивості.

Описаний підхід, випробований на модельних матеріалах, може бути використаний для розроблення промислових технологій вироблення рідких захисних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону у виробничих та побутових умовах.

Висновки

1. Запропоновано методологічний підхід для виготовлення рідких композицій для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Він полягає у додаванні до металополімеру з

магнітним наповнювачем (магнетиту) лускатого графіту у малих концентраціях.

2. Додавання до суміші лускатого графіту з ваговим вмістом залізородного концентрату 15–60 % у кількості 5 % підвищує коефіцієнти екранування електричного поля промислової частоти на 0,5–1,0, а електромагнітного поля ультрависокої частоти на 1,0–2,0.

3. Для прогнозування складу композиційних рідинних матеріалів і отримання потрібних коефіцієнтів екранування доцільно застосовувати співвідно-

шення Лорентца, Максвелла-Гарнета та Оделевського. Обов'язковим є обрахування коефіцієнтів деполаризації частинок наповнювача, що підвищує точність кінцевих даних.

4. Отримані результати потребують подальшого уточнення з метою розроблення промислових технологій вироблення рідких захисних композицій з матеріалів низької вартості і кінцевого продукту, призначеного для нанесення на поверхні великих площ та складних конфігурацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents. Official Journal of the European Union, 2013. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj> (дата звернення: 30.08.2019).
2. ETSI EN 300 220-2 V2.4.1 (2012-01). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 2: Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE. Directive. European Telecommunications Standards Institute. 2012. 20 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/02.04.01_40/en_30022002v020401o.pdf (дата звернення: 30.08.2019).
3. Patil, N., Velhal, N. B., Pawar, R., Puri, V. (2015). Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate. *Microelectronics International*, 32 (1), 25–31. doi: <https://doi.org/10.1108/mi-12-2013-0080>
4. Mondal, S., Ganguly, S., Das, P., Khastgir, D., Das, N. C. (2017). Low percolation threshold and electromagnetic shielding effectiveness of nano-structured carbon based ethylene methyl acrylate nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 119, 41–56. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.022>
5. Беляев, А. А., Беспалова, Е. Е., Лепешкин, В. В. (2015). Радиопо-глощающие материалы на основе отделочных строительных материалов для защиты от СВЧ излучения базовых станций сотовой связи. *Труды ВИАМ*, 6, 80–88.
6. Barsukov, V., Senyk, I., Kryukova, O., Butenko, O. (2018). Composite Carbon-Polymer Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Materials Today: Proceedings*, 5 (8), 15909–15914. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.063>
7. Senyk, I. V., Kuryptya, Y. A., Barsukov, V. Z., Butenko, O. O., Khomenko, V. G. (2020). Development and Application of Thin Wide-Band Screen-ing Composite Materials. *Physics and Chemistry of Solid State*, 21 (4), 771–778. doi: <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.771-778>
8. Guzii, S., Kryvenko, P., Guzii, O., Yushkevich, S. (2019). Determining the effect of the composition of an aluminosilicate binder on the rheotechnological properties of adhesives for wood. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (6 (102)), 30–38. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.185728>
9. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., & Biruk, Y. (2021). Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(6 (111)), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>

Received (Надійшла) 18.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.11.2022

Means of increasing the efficiency of liquid materials for shielding electromagnetic fields of a wide frequency range

N. Burdeina, Y. Biruk

Abstract. Regulatory and legal European and national requirements form a number of issues related to the simultaneous provision of electromagnetic safety of people in industrial and domestic conditions, as well as electromagnetic compatibility of electrical and electronic equipment. A study was conducted on the development and implementation of effective protective materials against the influence of electromagnetic fields of a wide frequency range. A methodological approach is proposed for the production of liquid compositions for shielding electromagnetic fields of industrial frequency, very high and ultrahigh frequencies. A water-dispersion paint was chosen for conducting research with a matrix as a filler carrier. Iron ore concentrate with a predominant (up to 75–80%) content of magnetite and foundry flake graphite were used as fillers. Determination of the protective properties of the experimental samples was carried out by establishing the dependence of the shielding coefficients of the industrial frequency electric field, industrial frequency magnetic field and ultra-high frequency electromagnetic field on the weight content of the filler. Measurements of electric and magnetic field strengths were performed with a calibrated PZ-50 device. The energy flow density of the ultra-high frequency electromagnetic field was measured using a calibrated PZ-31 device. Measurement of shielding coefficients was carried out using closed screens, inside which a measuring antenna was placed through a technological hole. Finding acceptable ratios of electrophysical and magnetic properties of the components of the composite determines the need for a preliminary calculated assessment of the properties to obtain the required shielding coefficients. The most suitable for magnetite particles in iron ore concentrate are Lorentz and Maxwell-Garnett relations. For graphite, it is advisable to use Odelevsky's formula. It is shown that these liquid-based composites have a number of advantages due to their relative ease of manufacture and convenience of application on the surface of large areas and complex configurations, as well as the adjustability of absorption and reflection coefficients due to the physicochemical composition and manufacturing technologies. The use of composite liquid materials allows solving the problems of ensuring electromagnetic safety, electromagnetic compatibility and is expedient for technical and economic reasons.

Keywords: composite liquid materials, shielding, electromagnetic fields.