

УДК 537.87:669.162.12 (045)

Nataliia Burdeina¹, PhD, Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387> **e-mail:** burdeina.nb@knuba.edu.ua

Yana Biruk¹, Assistant

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744> **e-mail:** biruk.iai@knuba.edu.ua

Kyrylo Nikolaiev², PhD, Associate Professor

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

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

²National Aviation University, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF MATERIALS WITH A MULTILAYER STRUCTURE OF THE GRADIENT TYPE BASED ON LIQUID COMPOSITIONS FOR THE SHIELDING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

Abstract. Nowadays, for shielding and absorption of electromagnetic fields of a wide frequency range, composite materials or solid metal structures are offered and widely used. The article deals with research and development of multilayer protective liquid materials for shielding electric, magnetic and electromagnetic fields of a wide frequency range. A series of liquid shielding mixtures based on standard certified paints and finely dispersed magnetite was produced. Testing of the protective properties of these mixtures was carried out by sequentially applying 2–3 layers of mixtures to the surface, each of which had a certain concentration of the shielding substance. The shielding and reflection coefficients for these multilayer structures are given. It is shown that the advantage of the developed multilayer protective liquid materials lies in obtaining a gradient of electrophysical and magnetic properties of the protective structure with the possibility of calculating dielectric and magnetic permeabilities, taking into account the morphology of the shielding particles. A method of obtaining protective materials of the gradient type, which reduce the influence of electromagnetic fields, is proposed, which is possible for the treatment of surfaces of large areas and complex configurations.

Keywords: electromagnetic field; shielding; liquid compositions.

Н.Б. Бурдейна¹, Я.І. Бірук¹, К.Д. Ніколаєв²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

²Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ БАГАТОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ ГРАДІЄНТНОГО ТИПУ НА ОСНОВІ РІДКИХ КОМПОЗИЦІЙ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

Анотація. На сьогодні для екранування і поглинання електромагнітних полів широкого частотного діапазону пропонують і широко застосовують композитні матеріали або суцільні металеві конструкції. У статті розглянуто дослідження і розроблення багатошарових захисних рідких матеріалів для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Виготовлено серію рідких екрануючих сумішей на основі стандартних сертифікованих фарб та дрібнодисперсного

магнетиту. Випробування захисних властивостей даних сумішей відбувалося послідовним нанесенням на поверхню 2–3 шарів сумішей, кожна з яких мала певну концентрацію екрануючої субстанції. Наведено коефіцієнти екранування та відбиття для даних багатошарових структур. Показано, що перевага розроблених багатошарових захисних рідинних матеріалів полягає в отриманні градієнта електрофізичних та магнітних властивостей захисної конструкції з можливістю розрахункового прогнозування діелектричних та магнітних проникностей з урахуванням морфології екрануючих частинок. Запропоновано спосіб отримання захисних матеріалів градієнтного типу, які зменшують вплив електромагнітних полів, що є можливим для обробки поверхонь великих площ і складних конфігурацій.

Ключові слова: електромагнітне поле; екранування; рідкі композиції.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.68-75>

Вступ

Питання екранування працюючих та населення, комп'ютерної техніки, електронних приладів та пристроїв від електромагнітних полів, незважаючи на велику кількість теоретичних ідей та практичних розробок, залишається актуальним. Ці об'єкти є вразливими до дії зовнішніх електромагнітних полів. Окрім природного магнітного поля, на працюючих і населення, комп'ютерну техніку, електронні прилади та пристрої діють електромагнітні поля, що генеруються системами забезпечення і функціонування засобів бездротового зв'язку, лініями електропередачі, відкритими розподільними пристроями, до складу яких входять комутаційні апарати, пристрої захисту й автоматики, вимірювальні прилади, а також радіотехнічні об'єкти, телевізійні та радіолокаційні станції, термічні цехи, телевізори, дисплеї, мікрохвильові (надвисокочастотні) печі, холодильники, кабіни автомашин, станції радіолокації і радіопеленгації, персональні комп'ютери, радарні установки тощо. У побуті джерелами електромагнітного поля і випромінювання є телевізори, дисплеї, мікрохвильові печі та інші пристрої, а також синтетичні килими, інші полімерні покриття в умовах зниженої вологості – менше ніж 70%.

Більшість матеріалів, пропонованих для екранування електромагнітних полів, мають значні коефіцієнти відбиття. Суперпозиція великої кількості електромагнітних полів, які поширюються від техногенних джерел та відбитих полів від екрануючих поверхонь призводить до посилення або послаблення природного магнітного поля Землі. Відхилення від нормальних значень природного магнітного поля як у бік посилення, так і у бік послаблення негативно впливає на стан працюючих та населення. Тому актуальним завданням є розроблення таких матеріалів, які екранують і поглинають електромагнітні поля, не відбиваючи їх.

Оскільки в останні роки спостерігається стале підвищення електромагнітного навантаження на людей, докільля та виробниче середовище, що обумовлюється підвищенням кількості і щільності розташування вищеприписаного електричного та електронного обладнання, систем забезпечення і функціонування засобів бездротового зв'язку, збільшенням навантаження на силові електричні мережі тощо, тому виникає потреба в проектуванні та розробленні захисних матеріалів, які екранують і поглинають електромагнітні поля широкого частотного діапазону.

Для екранування і поглинання електромагнітних полів широкого частотного діапазону пропонують і застосовують суцільні металеві конструкції або композитні матеріали. Дані конструкції і матеріали не в повній мірі відповідають цим вимогам, оскільки тверді кристалічні і аморфні матеріали мають великий коефіцієнт відбиття електромагнітних полів та випромінювання. Для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону доцільним є розроблення матеріалів, що мають багат шарову структуру градієнтного типу електрофізичних та магнітних властивостей на основі рідких композицій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Електромагнітне екранування актуальне для захисту людини та електронних пристроїв від небезпечного впливу електромагнітного випромінювання. На даний час проблемі розроблення та дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів приділяється багато уваги [1]. У статті [2] досліджено захисні властивості металополімерних електромагнітних екранів. Експериментально показано можливість отримання електромагнітного екрана градієнтного типу в одношаровому матеріалі. У дослідженні [3] наведено розроблені засади проектування та дослідження захисних властивостей рідинних матеріалів для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів широкого частотного діапазону. В публікації [4] проведено експериментальні дослідження екрануючих та електромагнітних властивостей тонкого електромагнітного екрана, який має композитну структуру і виготовлений способом нанесення магнітної рідини на діелектричну підкладку. У роботі [5] розроблено спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей, який полягає у поступовому підвищенні концентрації дрібнодисперсних феромагнітних частинок наповнювача у діелектричні матриці від лицевого до тильного боку листового матеріалу. У [6, 7] розроблено методологічні засади оптимізації параметрів екранування електромагнітних полів різного походження у будівлях та спорудах. Запропоновано рідкий матеріал на основі серійних фарб та дрібнодисперсного концентрату залізної руди. Показано, що зниження захисних властивостей на водно-дисперсійному носії відбувається за рахунок окислення наповнювача. У роботі [8] розглянуто основні принципи проектування та вироблення матеріалів для екранування електромагнітних полів широко частотного діапазону включно з промисловою частотою та різноманітним діапазоном її гармонік та інтергармонік, які генеруються при виробництві та передачі електроенергії. У дослідженні [9] визначено основні засади розроблення та прогнозування захисних властивостей металополімерних електромагнітних екранів.

Метою дослідження є розроблення матеріалів багат шарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій для екранування електромагнітних полів широко частотного діапазону.

Виклад основного матеріалу

Сучасні облицювальні матеріали повинні відповідати багатьом загальним і спеціальним вимогам. Загальні вимоги до механічних властивостей

включають міцність, питому вагу, надійність, надійне кріплення до робочих поверхонь, а також високу вогнестійкість і мінімальне виділення шкідливих речовин. До спеціальних вимог облицювальних матеріалів відносять високі коефіцієнти екранування в широкому діапазоні частот та мінімальні коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. Забезпечення усіх наведених вимог в одному матеріалі на оптимальному рівні практично не є можливим. Найпростішою задачею є зниження рівнів електромагнітних полів дуже високих, ультрависоких та надзвичайно високих частот. Будівлю або окремі приміщення можна заекранувати металевим або композиційним пласким матеріалом, враховуючи малу довжину електромагнітної хвилі і незначні дифракційні явища на кромках захисних конструкцій. Проте, великий внесок у захист від високочастотних випромінювань припадає на відбиття електромагнітних хвиль, що є небажаним. Уникнення такого ефекту можливе за рахунок застосування градієнтних екрануючих матеріалів, які не відбивають, а поглинають електромагнітні поля.

Відомо, що ефективність екранування збільшується, якщо у товщі композиційного захисного матеріалу є градієнт електрофізичних або магнітних властивостей [8]. Тобто діелектрична і магнітна проникність зростають від зовнішньої поверхні матеріалу до внутрішньої. При цьому, якщо вміст провідної та магнітної субстанції у верхніх шарах мінімальний та значення цих параметрів близькі до одиниці, то хвильовий опір поверхневого шару буде близький до опору середовища розповсюдження електромагнітних хвиль, для повітря він складає 377 Ом. За таких умов коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль близький до нуля. Таке явище зменшує поширення поля у небажаних напрямках, а екранування зони або об'єкта забезпечується за рахунок поглинання електромагнітної енергії шаром захисного матеріалу. У розробці [8] це реалізується обробкою рідкої металополімерної суміші неоднорідним магнітним полем, у результаті якої у нижньому шарі суміші збільшується концентрація феромагнітних екрануючих частинок. Але така технологія потребує багато витрат через необхідність здійснення обробки великої площі матеріалу у процесі полімеризації. При цьому для досягнення суттєвого ефекту товщина матеріалу повинна бути досить великою – 1–3 мм.

Аналогічний ефект можна отримати у інший спосіб. Для цього було виготовлено серію рідких екрануючих сумішей на основі стандартних сертифікованих фарб (матриця) та дрібнодисперсного магнетиту (екрануючий наповнювач). Результати випробувань захисних властивостей таких сумішей наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти

Серія рідких екрануючих сумішей	Коефіцієнт екранування при різних концентраціях сумішей			
	15%	30%	45%	60%
Суміш № 1	1,2–1,3	1,3–1,4	1,8–1,9	4,0–4,1
Суміш № 2	1,3–1,4	1,6–1,7	2,9–3,0	5,5–5,6
Суміш № 3	1,7–1,8	2,3–2,4	4,0–4,1	7,8–7,9

У наведеній таблиці коефіцієнтом екранування вважається загальне зниження щільності потоку енергії електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц.

Випробування щодо внеску у загальний коефіцієнт екранування відбиття електромагнітних хвиль наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Коефіцієнти відбиття електромагнітного поля ультрависокої частоти

Серія рідких екрануючих сумішей	Коефіцієнт відбиття при різних концентраціях сумішей			
	15%	30%	45%	60%
Суміш № 1	-	-	0,10–0,15	0,22–0,23
Суміш № 2	-	-	0,15–0,18	0,28–0,29
Суміш № 3	-	-	0,22–0,24	0,32–0,34

На наступному етапі на поверхню наносилися послідовно 2–3 шари сумішей. Нижній шар мав концентрацію екрануючої субстанції 60%, верхній – 30–45%.

У результаті дослідження отриманий коефіцієнт відбиття багатошарової структури не перевищував 0,1, а загальний коефіцієнт екранування був більший за сумарний коефіцієнт екранування окремих шарів.

Наприклад, для двошарового покриття на основі водно-дисперсної фарби з концентраціями 45 та 60% коефіцієнт відбиття складав не більше 0,1, а загальний коефіцієнт екранування становив 6,2–6,3.

Для тришарового покриття на основі геополімерної фарби (30, 45, 60%) коефіцієнт відбиття складав 0,15–0,16, а загальний коефіцієнт екранування – 11–12. Значне підвищення ефективності тришарової структури порівняно з сумарною ефективністю шарів можна пояснити додатковим розсіюванням електромагнітних хвиль на границях розділу шарів.

Перевагою таких захисних конструкцій є отримання градієнта електрофізичних та магнітних властивостей з можливістю розрахункового прогнозування діелектричних та магнітних проникностей з урахуванням морфології екрануючих частинок, які закладені у коефіцієнт деполяризації.

Для визначення ефективності матеріалу необхідно попередньо розрахувати магнітні та електрофізичні властивості кінцевого матеріалу. Це доцільно здійснювати за співвідношенням Лоренца для магнітної проникності магнітодіелектриків:

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

де μ – ефективна магнітна проникність магнітодіелектрика,

μ_m – магнітна проникність наповнювача,

ν_m – об’ємний вміст наповнювача у матеріалі.

Для визначення ефективності діелектричної проникності матеріалів доцільно використовувати співвідношення Максвелла-Гарнета:

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_d}{\varepsilon + 2\varepsilon_d} = v_m \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_d}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_d}, \quad (2)$$

$\varepsilon_d, \varepsilon_m$ – діелектричні проникності матриці та наповнювача,
 v_m – об’ємна доля наповнювача у діелектричній матриці.

Для визначення ефективної діелектричної проникності композиції доцільно скористатися формулою Оделевського:

$$\varepsilon = \varepsilon_d \left[1 + \frac{v_m(\varepsilon_m - \varepsilon_d)}{(1 - \frac{v_m}{v_k}) * F * (\varepsilon_m - \varepsilon_d) + \varepsilon_d} \right], \quad (3)$$

де $\varepsilon_d, \varepsilon_m$ – 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 деполаризації.

Для проектування захисних матеріалів необхідні відомості про магнітні та електрофізичні властивості матеріалів за визначених об’ємних концентрацій наповнювача. Наведені співвідношення дозволяють проектувати багат шарові покриття з потрібними захисними властивостями у залежності від конкретної електромагнітної обстановки.

Висновки

1. Для екранування електричних, магнітних та електромагнітних полів найбільш поширених частот доцільним є розроблення матеріалів багат шарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій.
2. Було виготовлено серію рідких екрануючих сумішей, в яких матрицею виступають стандартні сертифіковані фарби, а в якості екрануючого наповнювача – дрібнодисперсний магнетит.
3. Результати досліджень свідчать, що коефіцієнти відбиття поверхневого шару двошарової структури становили не більше 0,1, а поверхневого шару тришарової структури – 0,15–0,16, при цьому загальні коефіцієнти екранування для двошарової структури становили – 6,2–6,3, для тришарової – 11–12.
4. Перевагою запропонованого способу є зручність і простота у виготовленні і використанні екрануючого матеріалу, його низька вартість, можливість оброблення поверхонь великих площ і складних конфігурацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bartłomiej Salski. (2012). The Extension of the Maxwell Garnett Mixing Rule for Dielectric Composites with Nonuniform Orientation of Ellipsoidal Inclusions. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 30, 173–184, <https://doi.org/10.2528/PIERL12020202>.
2. Glyva, V., Kovalenko, V., Levchenko, L., & Tykhenko, O. (2017). Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (87), P. 50–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103167>.

3. 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/10.15587/1729-4061.2021.23147>.
4. Glyva V. A., Podoltsev A. D., Bolibrukh B. V., Radionov A. V. (2018). A thin electromagnetic shield of a composite structure made on the basis of a magnetic fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. – № 4. – P. 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned.2018.04.014>.
5. Патент 149126, Україна МПК 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01). Спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей. Винахідники: Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Колумбет В.П., Левченко Л.О., Панова О.В., Ходаковський О.В. Володілець: Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І., Колумбет В.П., Левченко Л.О., Панова О.В., Ходаковський О.В.; № u 2021 02561; заявл. 17.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42.
6. Касаткіна Н.В., Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ченчевой В.В. (2020). Оптимізація параметрів екранування електромагнітних полів різнорідних джерел у виробничих будівлях. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту* № 1 (46). ISSN 1999-981X/Розділ – безпеки життєдіяльності. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-181-188>.
7. Панова О.В., Бірук Я.І. (2022). Засади розроблення рідких сумішей для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вісті Донецького гірничого інституту»*, Вип. 1 (50), С. 108-113. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-108-113>.
8. Левченко Л.О., Осадчий Б.М., Панова О.В., Бірук Я.І. (2021). Електромагнітний екран градієнтного типу. *Науково-технічний інформаційно-аналітичний журнал «Новини енергетики»*. № 4, С. 3.
9. Глива В. А., Коваленко В. В., Тихенко О. М. (2017). Сучасні підходи до розроблення і впровадження матеріалів для екранування електромагнітних полів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Вип. 2 (42). 176–178.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2022 і прийнята до друку після рецензування 31.01.2023

REFERENCES

1. Salski, Bartłomiej. (2012). The Extension of the Maxwell Garnett Mixing Rule for Dielectric Composites with Nonuniform Orientation of Ellipsoidal Inclusions. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 30, 173–184. <https://doi.org/10.2528/PIERL12020202>.
2. Glyva, V., Kovalenko, V., Levchenko, L., & Tykhenko, O. (2017). Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (87)), 50–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103167>.
3. 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/10.15587/1729-4061.2021.23147>.
4. Glyva, V. A., Podoltsev, A. D., Bolibrukh, B. V., & Radionov, A. V. (2018). A thin electromagnetic shield of a composite structure made on the basis of a magnetic fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*, 4, 14–18. <https://doi.org/10.15407/techned.2018.04.014>.
5. Patent 149126, Ukraine IPC 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01). The method of manufacturing an electromagnetic screen with a gradient of electrophysical properties. Inventors: Burdeina N.B., Biruk Y.I., Kolumbet V.P., Levchenko L.O., Panova O.V., Khodakovskiy O.V. Owner: Burdeina N.B., Biruk Y.I., Kolumbet V.P., Levchenko L.O., Panova O.V., Khodakovskiy O.V.; No. u 2021 02561; statement 05/17/2021; published 20.10.2021, Bul. №. 42.

6. Kasatkina, N. V., Levchenko L. O., Panova O. V., Tikhenko O. M., & Chenchevoi V. V. (2020). Optimization of shielding parameters of electromagnetic fields of heterogeneous sources in industrial buildings. *NEWS of the Donetsk Mining Institute*, 1(46), 181–188 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-1-181-188>.
7. Panova, O.V., & Biruk, Y.I. (2022). Principles of development of liquid mixtures for shielding electromagnetic fields of a wide frequency range. *All-Ukrainian scientific and technical journal "News of the Donetsk Mining Institute"*, 1(50), 108–113 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-108-113>.
8. Levchenko, L. O., Osadchiy, B. M., Panova, O. V., & Biruk, Y. I. (2021). Gradient-type electromagnetic screen. *Scientific and technical information and analytical magazine "Energy News"*, 4, 3 [in Ukrainian].
9. Glyva, V. A., Kovalenko, V. V., & Tyhenko, O. M. (2017). Modern approaches to the development and implementation of materials for shielding electromagnetic fields. *Control, navigation and communication systems*, 2(42), 176–178 [in Ukrainian].

The article was received 25.10.2022 and was accepted after revision 31.01.2023

Бурдейна Наталія Борисівна

кандидат педагогічних наук, доцент, професор кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: orcid.org/0000-0002-2812-1387 **e-mail:** burdeina.nb@knuba.edu.ua

Бірук Яна Ігорівна

асистент кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744> **e-mail:** biruk.iai@knuba.edu.ua

Ніколаєв Кирило Дмитрович

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології Національного авіаційного університету

Адреса робоча: пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

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