

Я. І. Бірук, С. Й. Шаманський, А. В. Климчук

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ РЕЗОНАНСНОГО ТИПУ

Анотація. Досліджено можливості розроблення одношарового захисного покриття з малими коефіцієнтами електромагнітних хвиль ультрависоких, надвисоких і надзвичайно високих частот. Визначено, що досягнення потрібних коефіцієнтів відбиття досягається за рахунок узгодження електричної та фізичної товщин захисного матеріалу. Регулювання шуканих параметрів здійснюється за рахунок обирання матеріалу з визначеною діелектричною проникністю. Застосування у якості наповнювача діелектричної матриці ($\epsilon = 24$) магнетиту ($\epsilon = 14$) дозволяє застосовувати співвідношення для розрахунку ефективності діелектриків. Наявність у магнетиті магнітних властивостей ($\mu = 4,5$) дозволяє одночасно екранувати й електромагнітні поля промислової частоти з коефіцієнтами екранування 6–8. Встановлено, що для електричної товщини матеріалу, яка дорівнює одиниці (перший порядок чвертьхвильового захисту) на частоті 1 ГГц прийнятний коефіцієнт відбиття (-10 дБ) досягається у смузі частот від 0,9 до 1,1 ГГц, на частоті 3 ГГц – від 2,3 до 3,3 ГГц, на частоті 6 ГГц – від 5,3 до 6,6 ГГц, на частоті 10 ГГц – від 9 до 11 ГГц. Це дозволяє у практичній діяльності враховувати певний діапазон робочих частот обладнання визначених стандартів. Слід враховувати, що при визначенні ефективної діелектричної проникності композиційного матеріалу за відомими співвідношеннями спостерігається велика похибка. Тому у розрахунках слід користуватися максимальними значеннями, що дозволить отримати певний запас ефективності при визначенні електричної товщини матеріалу.

Ключові слова: електромагнітне поле, електромагнітний екран, резонанс, композиційний матеріал.

Вступ

Розроблення та дослідження захисних властивостей матеріалів та конструкцій для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону є одним з пріоритетних напрямів у галузях цивільної безпеки. Сучасною тенденцією у створенні таких матеріалів є проектування композицій з потрібними коефіцієнтами екранування. Це обумовлене необхідністю забезпечення високих захисних властивостей екранів за рахунок поглинання електромагнітної енергії і мінімізації коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль. В останні роки спостерігається тенденція до підвищення робочих частот усіх типів бездротового зв'язку, що призводить до перерозподілу інтенсивностей електромагнітних випромінювань внаслідок відбиття від поверхонь будівельних конструкцій, металевих поверхонь тощо. Для мінімізації коефіцієнтів відбиття і забезпечення достатніх поглинальних властивостей композиційні матеріали повинні мати градієнт електрофізичних властивостей по товщині, що підвищує їх вартість й знижує технологічність застосування. Зазвичай захисний матеріал наноситься на якусь поверхню, тому відбиття електромагнітної хвилі відбувається від цієї поверхні, якщо товщина захисного матеріалу набагато менша за довжину падаючої хвилі. Особливо це практично для приміщень спеціального призначення, у яких виконуються дослідження щодо електромагнітної сумісності електронного обладнання. У таких приміщеннях крім повної ізоляції від зовнішніх електромагнітних впливів коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль не повинні перевищувати -10 дБ. Такі показники можна забезпечити за рахунок застосування узгоджувального шару між несучою поверхнею та захисним матері-

алом або за рахунок узгодження електричної та фізичної товщини захисного матеріалу. Тому доцільно дослідити частотні залежності цих показників за певних складів захисних композицій матеріалів.

Огляд літературних джерел. Кількісні значення електромагнітних полів широкого частотного діапазону регламентуються національними санітарними нормами [1, 2]. Крім того в Україні методом підтвердження прийнято низку міжнародних стандартів з елетросумісності обладнання, наприклад [3, 4]. При цьому строго регламентуються умови не тільки експлуатації, а й випробування електронного обладнання. Це вимагає наявності засобів екранування електромагнітних полів для їх нормалізацій у виробничих та побутових умовах. Найбільш актуальною проблемою є захист від електромагнітних випромінювань ультрависоких, надвисоких та надзвичайно високих частот. Розроблено багато композиційних матеріалів для екранування випромінювань цих частотних діапазонів. У роботі [5] наведено результати випробувань матеріалу з різними фазовими складами. Він має високі захисні властивості, але має й великий коефіцієнт відбиття. Матеріали [6, 7] майже не відбивають електромагнітні хвилі, але мають низький коефіцієнт поглинання. Достатньо збалансовані коефіцієнти відбиття та поглинання у матеріалах, запропонованих у [8, 9]. Але для умов випробувань електронної техніки та захисту від вузько-смугового електромагнітного випромінювання коефіцієнтів відбиття можна досягти, застосовуючи узгоджувальний шар між окремими поверхнями завтовшки непарній чверті довжини падаючої хвилі [10]. Але у даному випадку матеріал достатньо громіздкий. При цьому він вважається призначеним для поглинання монохромного випромінювання.

Доцільно дослідити можливості забезпечення певної смуги частот, у якій коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль має прийнятні значення.

Метою дослідження є визначення ефективності електромагнітних екранів резонансного типу у певній смузі частот, близьких до резонансної.

Викладення основного матеріалу

Зниження значень коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль від поверхонь будівель, приміщень тощо залежність виключно від електрофізичних показників поверхневих шарів матеріалу. Зазвичай діелектричні проникності матеріалів мають значення 2–5. Коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль K_r не можуть бути нижчими за значення:

$$K_r = 10 \lg \left(\sqrt{\varepsilon_e} - 1 / (\sqrt{\varepsilon_e} + 1) \right), \text{ дБ},$$

де ε_e – ефективна відносна діелектрична проникність матеріалу на даній частоті випромінювання. Тому коефіцієнти відбиття мають значення - 10 ÷ -7 дБ.

Для більшості умов перебування людей це прийнятний показник. Але такий матеріал практично не поглинає електромагнітну енергію і не може розглядатися як захисний. Для приміщень, де рівні електромагнітних полів повинні бути мінімальними, а випромінювання внутрішніх джерел суттєво не відбивається від поверхонь необхідно одночасно забезпечувати малі коефіцієнти відбиття, не більше - 12 дБ, та високі коефіцієнти поглинання – не менше 20 дБ.

Такі показники можна отримати, застосовуючи тришарове покриття. Таке покриття повинне мати товщину, яка дорівнює половині максимальної довжини хвилі смуги частот електромагнітного випромінювання, яке падає на поверхню. Коефіцієнт відбиття можна знизити до значень -15 ÷ -20 дБ у певній смузі частот за умови, що товщина зовнішнього шару d й мінімальна довжина падаючої електромагнітної хвилі λ відповідає співвідношенню:

$$K_r = \frac{d\sqrt{\varepsilon_e}}{\lambda} < 0,3.$$

У випадку подальшого зменшення довжини хвилі коефіцієнт відбиття буде підвищуватися досить швидко й досягати значення -40 дБ за умови:

$$K_r = \frac{d\sqrt{\varepsilon_e}}{\lambda} < 0,25.$$

У будь-якому випадку між поверхнею монтажу та зовнішнім захисним матеріалом повинен бути узгоджувальний шар товщиною, кратною чверті довжини падаючої електромагнітної хвилі. Для надання покриттю певної широкосмуговості узгоджувальний шар повинен достатньо товстий, ще не завжди зручно у практичній роботі.

Зазвичай у будь-яких реальних умовах існують переважні довжини хвиль (частоти), характерні для електромагнітної обстановки. У більшості випадків це визначається стандартними робочими частотами обладнання, наприклад, засобів мобільного зв'язку. Але реальні робочі частоти сіх випромінювачів

лежать у певній смузі навколо основної частоти. Якщо захисний шар матеріалу має товщину, яка відповідає чверті довжини електромагнітної хвилі, яка відповідає робочій частоті, то для реальних робочих частот покриття може бути недостатньо ефективним. Тому доцільно визначити межі ефективності покриттів навколо основної частоти. Мінімум досяжний рівень коефіцієнта відбиття визначається товщиною покриття, яке відповідає основній (резонансній) частоті. Ця товщина повинна відповідати чверті довжини падаючої хвилі, або бути кратною цій величині – непарній кількості чвертей. Навіть для достатньо великих діелектричних проникностей поверхневого шару матеріалу за таких умов відбувається інтерференційне придушення відбиття. Для раціоналізації параметрів захисного матеріалу необхідно визначити межі його прийнятної ефективності. Особливістю резонансних конструкцій є те, що оптимальна товщина захисного покриття визначається неоднозначно. Вона відповідає електричній товщині матеріалу за умови непарним кратностям чвертей довжин хвиль:

$$T_e = 2\pi/\lambda \cdot l \cdot R_e \sqrt{\varepsilon_{екв}} \approx n \cdot \pi/2,$$

де λ – довжина хвилі, l – товщина, $n = 1, 3, 5, \dots$

Значення $n = 1$ відповідає мінімально необхідній товщині радіопоглинального матеріалу.

Були визначені значення коефіцієнтів відбиття для різних резонансних частот з визначенням їх приведених електричних товщин, які відповідають $n = 1$.

Розрахунки проводилися для композиційного матеріалу на основі латексу та магнетиту (табл. 1).

У таблиці ε_m – ефективна діелектрична проникність матриці, ε_n – ефективна діелектрична проникність екрануючого наповнювача, V_n – об'ємний вміст екрануючого наповнювача, f_r – резонансна частота, f – частота електромагнітної хвилі, K_r – коефіцієнт відбиття електромагнітного випромінювання, $2T_e/\pi$ – приведена електрична товщина матеріалу, яка відповідає мінімальній кількості непарних чвертей довжини електромагнітної хвилі (фізична товщина – 0,25 λ).

Вважається, що коефіцієнт відбиття -10 дБ є достатнім для вирішення задач електромагнітної сумісності та випробування електронної техніки. Тому для базових частот можна визначити частотні смуги прийнятних значень коефіцієнтів відбиття. Це стосується й процесів зниження інтенсивності випромінювань базових станцій зв'язку у зонах їх можливого підвищення за рахунок відбиття електромагнітних хвиль. У даному випадку наповнювачем полімерної матриці розглядався магнетит. Його перевагою є наявність й магнітних властивостей, що одночасно дає можливість знизити рівні магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти [11]. Це особливо актуально енергонасичених будівель з наявністю великої кількості електричного обладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками. Навіть за товщини покриття до 2 мм коефіцієнти екранування електричної складової електромагнітного поля промислової частоти складають 5–6, магнітної складової 6–8, для більшості виробничих та побутових умов є достатньо.

Таблиця 1 – Залежність ефективності резонансних електромагнітних екранів від електрофізичних властивостей і вмісту компонентів

ε_m	ε_n	$V_n, \%$	f_r, GHz	f, GHz	K_r, dB	$2T_e/\pi$
24	12	15	0,500	0,45	-6,75	0,91
				0,46	-8,85	0,93
				0,48	-11,65	0,96
				0,49	-15,18	0,98
				0,500	17,73	1,00
				0,512	16,01	1,03
				0,525	13,00	1,05
				0,538	-10,64	1,07
24	12	15	1,000	0,550	-8,90	1,10
				0,900	-11,08	0,93
				0,925	-13,50	0,96
				0,950	-16,53	0,98
				0,975	-20,10	0,99
				1,000	-22,17	1,00
				1,025	-20,15	1,05
				1,050	-17,20	1,07
24	12	15	3,000	1,075	-14,83	1,09
				1,100	-13,02	1,11
				2,700	-9,52	0,92
				2,780	-11,19	0,94
				2,850	-13,04	0,96
				2,935	-14,96	0,98
				3,000	-16,56	1,00
				3,075	-16,50	1,02
24	12	15	6,000	3,150	-16,48	1,04
				3,225	-15,32	1,07
				3,300	-13,94	1,09
				5,400	-12,60	0,95
				5,550	-14,48	0,97
				5,700	-16,45	0,99
				5,850	-18,19	1,00
				6,000	-19,67	1,00
24	12	15	10,000	6,150	-18,65	1,01
				6,300	-17,40	1,02
				6,450	-16,04	1,04
				6,600	-14,71	1,06
				9,000	-14,78	0,97
				9,250	-17,17	0,99
				9,500	-19,84	1,01
				9,950	-22,07	1,02
24	12	15	10,000	10,000	-22,26	1,03
				10,250	-20,50	1,05
				10,500	-18,37	1,10
				10,750	-16,53	1,12
				11,000	-15,00	1,14

При розрахунковому визначенні відносних діелектричних проникностей композиційних матеріалів слід враховувати, що співвідношення Максвелла-Гарнета, Бруггемана є емпіричними і дають велику похибку. Тому для зниження коефіцієнтів відбиття слід обирати максимальне значення, що надає певний запас ефективності по електричній товщині матеріалу.

Висновки

1. Визначено засади розроблення одношарового покриття з мінімальними коефіцієнтами відбиття електромагнітних хвиль ультрависоких та вищих частот. Головною умовою ефективності таких

покриттів є узгодженість електричної та фізичної товщин захисного матеріалу. Визначено можливість одночасного зниження у визначених зонах електромагнітних полів промислової частоти за рахунок застосування у композиційних матеріалах наповнювача з магнітними властивостями.

2. Визначено смуги прийнятних значень коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль навколо резонансних частот покриттів, для яких електрична товщина дорівнює одиниці. Це дозволяє знижувати значення щільностей потоків енергії височастотних випромінювань за різних робочих частот випромінювачів поблизу основної (стандартної) частоти.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань [Чинний від 2017-12-22]: затв. наказом МОЗ України від 01.08.1996 р. № 239. Київ, 2017. 28 с.

2. ДСНІП 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.
3. 41. 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.
4. 42. ETSI EN 301 489-1 V2.2.1 (2019-03). ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements; Harmonised Standard for ElectroMagnetic Compatibility. Directive. European Telecommunications Standards Institute, 2019. 36 p.
5. Kefeng JI; Jun GAO; Xiangyu CAO; Jiangfeng HAN; Huanhuan YANG. Design of Ultra-wideband Low RCS Reflecting Screen Based on Phase Gradient Metasurface. *Radioengineering*. Jun 2021, Vol. 30 Issue 2, p. 314-322. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0314>
6. Кизимчук О.П., Арабулі С.І., Власенко В.І. Текстиль для захисту від електромагнітного випромінювання. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 3 (134). С. 48-61
7. Арабулі С.І., Кизимчук О.П., Власенко В.І., Тунак М., Тунакова В. Дослідження ефективності екранування ЕМВ текстильними матеріалами. III International Scientific-Practical Conference 31.10.2019 Kyiv, Ukraine. Kyiv, 2019. С. 202–206.
8. Butenko O., Boychuk V., Savchenko B., Kotsyubynsky V., Khomenko V., Barsukov V. Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today*. 2019. V. 6, pp. 270–278
9. 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.
10. 175. 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>
11. Burdeina, N., Levchenko, L., Korduba, I., Shamanskyi, S., Biruk, Y., Dovhanovskyi, 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) 23.02.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.04.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бірук Яна Ігорівна – доктор філософії, доцент, доцент кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Yana Biruk – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: vesna0999@gmail.com, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57225188391>.

Шаманський Сергій Йосипович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри водопостачання та водовідведення, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Sergii Shamanskyi – Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Water Supply and Drainage, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: shamanskiy.sy@knuba.edu.ua, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6215-3438>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190491594>.

Климчук Андрій Васильович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Andrii Klymchuk – PhD student at the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: klymchuk_av-2022@knuba.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0005-1248-7316>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59413074000&origin=recordpage>.

Study of the efficiency of resonant electromagnetic screens

Yana Biruk, Sergii Shamanskyi, Andrii Klymchuk

Abstract. The possibilities of developing a single-layer protective coating with low coefficients of electromagnetic waves of ultra-high, ultra-high and extremely high frequencies are investigated. It is determined that the required reflection coefficients are achieved by matching the electrical and physical thicknesses of the protective material. The desired parameters are regulated by selecting a material with a certain dielectric constant. The use of magnetite ($\epsilon = 24$) as a filler in the dielectric matrix ($\epsilon = 14$) allows the use of the ratio to calculate the dielectric efficiency. The presence of magnetic properties in magnetite ($\mu = 4.5$) makes it possible to simultaneously shield electromagnetic fields of industrial frequency with shielding coefficients of 6–8. It has been established that for the electrical thickness of the material equal to one (first order of quarter-wave protection) at a frequency of 1 GHz, an acceptable reflection coefficient (-10 dB) is achieved in the frequency band from 0.9 to 1.1 GHz, at a frequency of 3 GHz – from 2.3 to 3.3 GHz, at a frequency of 6 GHz – from 5.3 to 6.6 GHz, at a frequency of 10 GHz – from 9 to 11 GHz. This makes it possible to take into account a certain range of operating frequencies of equipment of certain standards in practice. It should be borne in mind that when determining the effective permittivity of a composite material using known ratios, a large error is observed. Therefore, the maximum values should be used in the calculations, which will allow obtaining a certain margin of efficiency in determining the electrical thickness of the material.

Keywords: electromagnetic field, electromagnetic shield, resonance, composite material.