

Т. М. Ткаченко¹, Н. Б. Бурдейна¹, О. О. Ченчева²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

²Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського, Кременчук, Україна

ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ШУМУ У БУДІВЛЯХ І СПОРУДАХ

Анотація. Аналіз сучасного стану електромагнітного та акустичного забруднення виробничого та навколишнього середовища свідчить про необхідність обґрунтування загальних засад захисту будівель універсальними захисними конструкціями. Показана можливість застосування витких рослин для покриття поверхонь будівель. Каркасом для поширення витких рослин доцільно обрати регулярну структуру – сітчасту або шпарувату. Ефективність таких структур розраховано, виходячи з фундаментальних співвідношень електродинаміки. Отримані співвідношення для розрахунку коефіцієнтів екранування для нормально падаючої електромагнітної хвилі та для хвилі, яка падає на екран під довільним кутом. Показано співвідношення довжин хвиль електромагнітного та акустичного полів, які екрануються регулярною структурою і визначається через швидкості розповсюдження електромагнітних та акустичних хвиль. Впровадження витких рослин для захисту від фізичних впливів необхідними є експериментальні дослідження, які дозволять розробити емпіричні або напівемпіричні співвідношення щодо попереднього оцінювання ефективності захисту. Надано розрахунковий апарат для обчислення параметрів перфорованого або шпаруватого екрана для екранування шуму. Його структура ґрунтується на визначенні параметрів конструкції, виходячи з частоти звуку з найбільшою амплітудою, яка розглядається як резонансна. Така конструкція також може бути носієм витких рослин. Перевагою таких конструкцій є пристосованість для екранування низькочастотного звуку, а виткі рослини розширюють діапазон захисту. Крім того, виткі рослини сприяють енергозощадженню.

Ключові слова: екранування, електромагнітне поле, шум, виткі рослини.

Вступ

Електромагнітні та акустичні поля техногенного походження є найбільш вагомими фізичними факторами несприятливого впливу на працюючих та населення. Найбільш ефективним засобом захисту від змінних електромагнітних полів та шуму є застосування екранування відповідними матеріалами та конструкціями з них. Такий захист гарантовано ефективний для ультрависоких та вищих частот електромагнітних полів високих частот акустичних полів, принаймні для невеликої ділянки або приміщення, що обумовлене малими довжинами електромагнітних і акустичних хвиль. Для них дифракційні явища на кромках екранів не є суттєвими, а проникність у захищену зону – мінімальна. Це ж стосується засобів індивідуального захисту працюючих. Для електромагнітних полів дуже високих частот і частот нижчих діапазонів та звукових хвиль середніх і низьких частот ситуація ускладнюється. Особливо це стосується електромагнітних полів наднизької частоти (в основному – 50 Гц) та акустичних низької – до 250–300 Гц. Навантаження на виробниче та навколишнє середовище з боку полів таких частот зростає. Цей процес супроводжується підвищенням внеску у електромагнітне навантаження частот бездротового зв'язку різного призначення. У таких умовах найбільш раціональним є застосування засобів колективного захисту. Таким захистом є екранування усєї будівлі або її частини з урахуванням амплітудно-частотних характеристик фізичних полів, які розповсюджуються від найбільш критичних джерел. Доцільно розглянути комбіновані засоби захисту, ефективні щодо екранування як електромагнітних, так і акустичних полів.

Стан питання. В умовах поступового переходу України на загальноєвропейські стандарти у галузі

безпеки працюючих та населення, при виконанні досліджень і прикладних розробок доцільно керуватися вимогами відповідних директив ЄС, які крім загальних вимог безпеки містять кількісні дані щодо гранично допустимих значень шкідливих та небезпечних чинників виробничого середовища. Це загальна вимога [1] та директиви щодо захисту від впливу електромагнітних полів та шуму [2–4]. Методам та засобам захисту від цих фізичних чинників присвячено багато досліджень. Тенденцією останніх років є розроблення та дослідження захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування фізичних полів. Більшість з них стосуються електромагнітних полів [5–7]. У цих роботах надано коефіцієнт екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. При цьому підкреслюється, що дослідження з екранування магнітних полів промислової частоти виконувалися для геометрично замкнених конструкцій, що обумовлене квазістаціонарністю цих полів. У реальних виробничих умовах, принаймні для окремого приміщення, суцільне екранування не завжди прийнятне. Дослідження щодо композиційних матеріалів для захисту від шуму практично відсутні. Це пояснюється тим, що поглинання механічних хвиль залежить від значень модулів – пружних характеристик матеріалів, а ці дані для композитів не є довідковими величинами через їх значну залежність від складу оброблення сумішей. У дослідженні [8] наведено результати розроблення і випробування захисних властивостей універсального електромагнітного та акустичного екрана. Але екранування акустичних хвиль досягається виключно за рахунок неоднорідності матеріалу. Ця неоднорідність досягається за рахунок застосування латексу у вигляді пінолатексу та додаванням у латекс гранульованого пінополістиролу. Неоднорідні структури також використовуються для захисту від електромагнітних полів

як наднизьких частот [9], так і ультрависоких і вищих частот [10]. При цьому приблизні розрахунки щодо перфорованих неоднорідних звукопоглинальних панелей відомі і наведені у довідковій літературі. Загальновідомо, що зелені насадження знижують рівні шуму від автомобільних шляхів, аеродромів цивільної авіації. Але їх застосування для захисту окремих будівель проблематичні, наприклад, через геометричні характеристики захисних смуг з дерев. У роботах [11, 12] наведено результати досліджень щодо застосування витких рослин для терморегуляції приміщень і будівель. Застосування таких конструкцій може мати комплексний характер [13]. Виходячи з цього, доцільно розглянути можливість одночасного використання для екранування електромагнітних та акустичних полів металевих регулярних структур у комплексі з виткими рослинами.

Метою роботи є розроблення концептуальних засад забезпечення електромагнітної та акустичної безпеки працюючих та населення за рахунок екранування електромагнітних полів та шуму у захисних конструкціях.

Викладення основного матеріалу

Ідея роботи полягає у застосуванні регулярної металевої структури для екранування електромагнітних полів, яка слугує каркасом для поширення витких рослин, що екранують акустичний шум.

Перевагою регулярних металевих структур є те, що їх ефективність можна розрахувати, виходячи із фундаментальних співвідношень електродинаміки. Розрахунки ґрунтуються на дифракції електромагнітних хвиль на решітках або ґратках, вироблених з провідних матеріалів. Для електромагнітних полів, принаймні дуже високих і вищих частот, питома провідність дротів, з яких виготовлено сітку не є критичною. Тому для виготовлення такої сітки можна використовувати дріт-катанку з номенклатури, яка виробляється металургійною промисловістю. Це виявилось можливим навіть для екранування магнітного поля промислової частоти [9]. При нормальному падінні на металеву сітку електромагнітної хвилі коефіцієнт екранування визначається як:

$$K_s = 10 \lg \left(4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r} \right)^2 \right) / \left(1 + 4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r} \right)^2 \right),$$

де λ – довжина падаючої хвилі, d – відстань між дротами (крок сітки), r – радіус дротів.

При падінні хвилі під кутом φ :

$$K_r = 10 \lg \left(4 \left(\frac{d \cos \varphi}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r} \right)^2 \right) / \left(1 + 4 \left(\frac{d \cos \varphi}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r} \right)^2 \right),$$

$$K_s = 10 \lg \frac{(1 - \cos \varphi)^2 + 4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \left(\frac{d}{2\pi r} \right) \right)}{1 + 4 \left(\frac{d}{\lambda} \ln \left(\frac{d}{2\pi r} \right) \right)}.$$

Слід враховувати, що ці співвідношення коректні за умов:

$$d/\lambda < 10, \quad r/\lambda < 0,04, \quad r/d < 0,1.$$

При цьому сітка повинна перебувати у хвильовій зоні електромагнітного поля. Існує експериментально визначена вимога, що лінійні розміри екрана (довжина і ширина) повинні перевищувати довжину падаючої хвилі принаймні у 5 разів, що виконується у разі облицювання поверхонь будівель для електромагнітних полів усіх типових джерел, крім полів промислової частоти. Для поширених довжин хвиль (радіотехнічних об'єктів цивільної авіації, мобільного та радіорелейного зв'язку) та типових сіток залежності екрануючих властивостей від цих параметрів наведені на рис. 1–3.

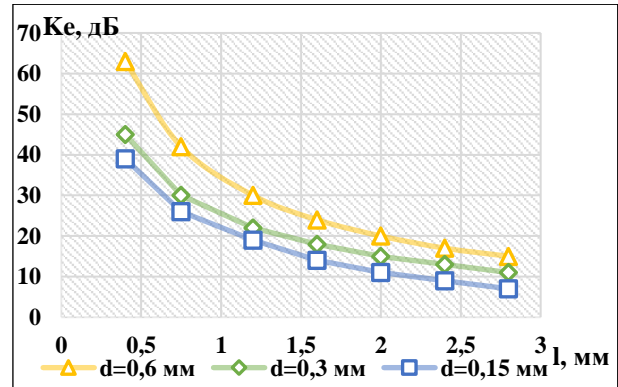


Рис. 1. Залежність коефіцієнта екранування від параметрів металевої сітки $\lambda=0,03$ м (довжина хвилі); l – розмір комірки сітки; d – діаметр дротів, з яких виготовлено сітки

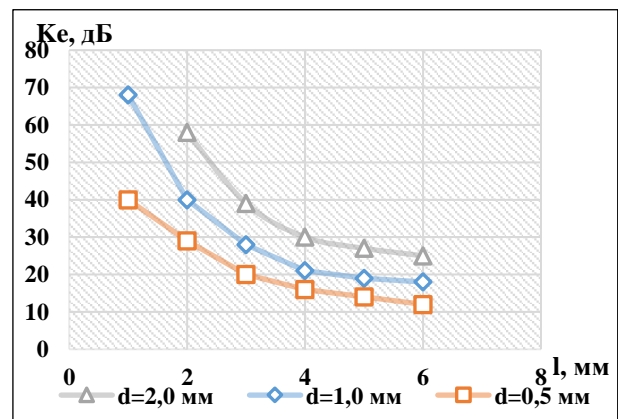


Рис. 2. Залежність коефіцієнта екранування від параметрів металевої сітки $\lambda=0,1$ м (довжина хвилі); l – розмір комірки сітки; d – діаметр дротів, з яких виготовлено сітки

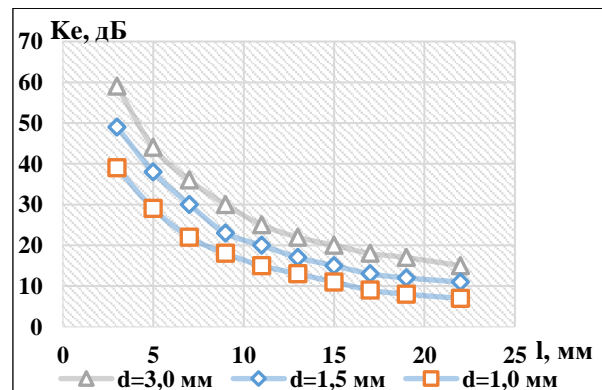


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів екранування електромагнітного випромінювання частотою 0,9 ГГц від розміру комірки сітчастої структури, виготовленої з дротів діаметрами 1,0 мм, 1,5 мм, 3,0 мм

Досвід натурних вимірювань свідчить, що за кроку сітки у $0,1\lambda$ структура стає повністю непроникною для електромагнітного поля. Це дозволяє обрати параметри захисту, які забезпечують мінімально необхідні сигнали базових станцій мобільного зв'язку. Такі структури можуть бути використані як каркас для поширення витких рослин. Ці рослини через великий вміст води частково екранують електромагнітні поля (принаймні ультрависоких і вищих частот), але розрахувати цей параметр практично неможливо через непередбачуваність товщини і щільності покриву.

Зелені насадження на прийнятному рівні здійснюють звукопоглинання. Перевагою витких рослин є покриття безпосередньо об'єкту захисту, що за великих довжин звукових хвиль дозволяє мінімізувати дифракційні явища. На сьогоднішній день навіть приблизний розрахунок ефективності звукопоглинання рослинами не уявляється можливим, тому доцільно спиратися на вимірювання індексів зниження шуму зеленими панелями. За даними професора Вінчука М.М. шумозахисні властивості витких рослин значні (табл. 1).

Таблиця 1 – Зниження рівнів шуму виткими рослинами

Дівочий виноград'ятилисточковий	Відстань від джерела шуму, м	Показання шумометра, dB	
		Без рослин	З рослиною
	1	79,9	72,7
	3	73,8	69,1
	5	69,7	65,6
Плющ звичайний		Без рослин	З рослиною
	1	81,3	76,8
	3	75,2	68,3
Жимолость в'юнка		Без рослин	З рослиною
	1	71,7	64,6
	3	66,8	62,2
	5	63,2	57,6

Знаючи параметри несучого сітчастого каркасу можливо оцінити його внесок у захист від шуму. Це визначається фундаментальним співвідношенням:

$$f = v/\lambda,$$

де λ – довжина падаючої хвилі, f – частота, v – швидкість поширення хвилі.

Різниця коефіцієнтів екранування на однаковій структурі електромагнітних та звукових хвиль у загальному випадку визначається різними швидкостями їх поширення. Наприклад, структура ефективна для екранування електромагнітного поля частотою 1,8 ГГц (найбільш поширена в Україні частота мобільного зв'язку), буде ефективною для звукових хвиль частотою приблизно 2 кГц. Ця частота зростає зі зменшення кроку сітки. Ще однією можливістю комбінованого захисту від впливу двох фізичних чинників є застосування перфорованих та шпаринчастих регулярних структур. Основою їх застосування є теоретичні дослідження [14], за якими можна з мінімальною похибкою розрахувати ефективність екранування електромагнітних полів визначених частот.

Перфорований або шпаринчастий екран можна застосувати для захисту від впливу шуму [15]. Його ефективність, принаймні на переважних частотах, можна розрахувати. Параметри екрана обираються виходячи з частоти найбільшої амплітуди. Екрануюча панель працює за резонансним принципом, а резонансною частотою є частота з найбільшою амплітудою коливань. Така панель може бути каркасом для витких рослин, які забезпечують широкосмуговість звукопоглинання. Перфорований металевий лист розташовується на деякій відстані від стіни будівлі і є одним з параметрів, який визначає ефективність захисту. Зазор між панеллю та стінкою сприяє провітрюванню і відводу вологи.

Перфорована конструкція може розглядатися як ряд резонаторів. При рівномірній перфорації листа поглинач має типову резонансу криву поглинання. При нерівномірній – рівномірну криву поглинання. Для рівномірного розташування отворів резонансна частота визначається зі співвідношення:

$$f_p = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_e d^2 h}},$$

де v – швидкість звуку, S – переріз отвору, $l_e = \Delta + 0,5\sqrt{\pi S}$ – ефективна товщина панелі, Δ – товщина листа, h – відстань панелі від поверхні, на якій вона змонтована, d – відстань між центрами отворів.

Якщо отвори у вигляді шпарин, то резонансна частота визначається як:

$$f_p = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{b}{ldh}}.$$

де b – ширина шпарини, d – відстань між шпаринами.

Найбільшою перевагою таких панелей є придатність для захисту від низькочастотного звуку, ефективність яких можна розрахувати. Це важливо з точки зору розповсюдження низькочастотного звуку на великі відстані через його повільне згасання з відстанню. Викладене є загальними засадами проектування і впровадження комплексного захисту будівель від впливу електромагнітних полів та шуму широких частотних діапазонів. Крім звукопоглинання виткі рослини певним чином сприяють енергозощадженню через позитивний вплив на температурний режим будівель.

Висновки

1. Підвищення електромагнітного та акустичного навантаження на виробниче та навколишнє середовище робить актуальними розроблення та впровадження універсальних засобів комплексного захисту від впливу техногенних фізичних полів. Це знімає проблему застосування двох окремих захисних конструкцій.

2. Ефективним засобом звукопоглинання є покриття поверхонь будівель виткими рослинами, які безпосередньо прилягають до стін. Це мінімізує прояви дифракційних явищ на кромках екрануючих конструкцій.

3. Каркасом для поширення витких рослин доцільно обирати сітчасті або шпаруваті металеві

конструкції для екранування електромагнітних полів. Коефіцієнти екранування розраховано виходячи з фундаментальних співвідношень електродинаміки. Такі конструкції частково екранують акустичні хвилі. Переважні частоти екранування визначаються співвідношеннями швидкостей поширення електромагнітних та акустичних хвиль.

4. Каркасом для поширення витких рослин можуть бути і перфоровані звукопоглинальні конструкції резонансного типу. Перевагою таких конструкцій є можливість екранування низькочастотного шуму, захист від якого найбільш складний. Показана можливість аналітичного попереднього визначення параметрів захисних панелей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions on an EU Strategic Framework on Health and Safety at Work 2014-2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2014:332:FIN>
2. Dir. 2013/35/EU - electromagnetic fields. <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2013-35-eu-electromagnetic-fields>
3. Directive 2003/10/EC - noise. <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/82>
4. Directive 2000/14/EC - noise - equipment for use outdoors. <https://osha.europa.eu/en/legislation/directives/directive-2000-14-ec>
5. Seon-Chil Kim and Sung-Hyoun Cho., 2019. Analysis of the Correlation between Shielding Material Blending Characteristics and Porosity for Radiation Shielding Films. *Journals Applied Sciences* 9(9), 1765; <https://doi.org/10.3390/app9091765>
6. Development and application of thin wide-band screening composite materials. Senyk, I., Kuryptia, Y., Barsukov, V., Butenko, O., Khomenko, V. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2020, 21(4), pp. 771–778. <https://journals.pnu.edu.ua/index.php/pcss/article/view/4451/5175>
7. Glyva V., Kasatkina N., Nazarenko V., Burdeina N., Karaieva N., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. Development and research of protective properties of composite materials for screening electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Iss. 2/12 (104). PP. 40–47.
8. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61.
9. Grinchenko V. S. Mitigation of three-phase power line magnetic field by grid electromagnetic shield // *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. Vol. 2018, Issue 4. P. 29–32. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.029>
10. 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>.
11. Tkachenko Tetiana Assessment of Light Transmission for Comfort and Energy Efficient Insolation by “Green Structures”// *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, No 1296, p. 139–151. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-63403-2_13
12. Tkachenko Tetiana The Role of "Green Structures" in Reducing the Environmental Footprint of Urbocenos. Tetiana Tkachenko, Olena Voloshkina. *International Journal of Engineering & Technology*. – Vol.7, No 4,8 (2018). – P. 214-220. <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/issue/view/452>
13. Abu Deeb S. Environmental Assessment of Relationships and Mutual Influences in the System "Protective Forest Plantations – Anthropogenic Landscapes". S.Abu Deeb, Tetiana Tkachenko, Viktor Mileikovskiy. 2nd International Symposium of Earth, Energy, Environmental Science and Sustainable Development (JEESD 2021) 25th-26th September 2021, Jakarta, Indonesia. - IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - Vol. 940. - <https://doi.org/10.1088/1755-1315/940/1/012083>
14. Глива В. А., Тихенко О. М., Ходаковський О. В. Методологія проектування неоднорідних електромагнітних екранів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава, 2019. Вип. 4(56). С. 122–125.
15. Glyva, V., Kasatkina, N., Levchenko, L., Tykhenko, O., Nazarenko, V., Burdeina, N., Panova, O., Bahrii, M., Nikolaiev, K., & Biruk, Y. (2022). Determining the dynamics of electromagnetic fields, air ionization, low-frequency sound and their normalization in premises for computer equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(10 (117)), 47–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258939>

Received (Надійшла) 21.02.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.05.2023

Shielding of electromagnetic fields and noise in buildings and structures

T. Tkachenko, N. Burdeina, O. Chenchava

Abstract. Analysis of the current state of electromagnetic and acoustic pollution of the industrial and environmental environment indicates the need to substantiate the general principles of building protection with universal protective structures. The possibility of using climbing plants to cover the surfaces of buildings is shown. It is advisable to choose a regular structure (mesh or slatted) as a frame for the propagation of creeping plants. The efficiency of such structures is calculated based on the fundamental relations of electrodynamics. Obtained relations for calculation of shielding coefficients for a normally incident electromagnetic wave and for a wave incident on the shield at an arbitrary angle. The ratio of the wavelengths of electromagnetic and acoustic fields, which are shielded by a regular structure, is shown. It is determined by the ratio of propagation speeds of electromagnetic and acoustic waves. For the introduction of creeping plants for protection against physical influences, experimental studies are necessary, which will allow to develop empirical or semi-empirical relationships for the preliminary assessment of the effectiveness of protection. A calculator is provided for calculating the parameters of a perforated or slotted screen for noise shielding. It is based on the determination of design parameters based on the sound frequency with the largest amplitude, which is considered resonant. Such a structure can also be a carrier of creeping plants. The advantage of such structures is their suitability for shielding low-frequency sound, and winding plants extend the range of protection. In addition, winding plants contribute to energy saving.

Keywords: shielding, electromagnetic field, noise, winding plants.