Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КЛИМЧУК АНДРІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК [351.861+331.45]:[537.87:691]

ДИСЕРТАЦІЯ

ЗАХИСТ НАСЕЛЕННЯ ТА ПРАЦЮЮЧИХ ВІД ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НЕОДНОРІДНИМИ ОБЛИЦЮВАЛЬНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

263 – Цивільна безпека
26 – Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії вперше

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ А.В. Климчук

Науковий керівник: Бірук Яна Ігорівна
доктор філософії, доцент

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Климчук А.В. Захист населення та працюючих від впливу техногенних електромагнітних полів неоднорідними облицювальними матеріалами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 26 – «Цивільна безпека», за спеціальністю 263 – «Цивільна безпека» – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2026.

Збільшення кількості й ущільнення розташування електричного та електронного обладнання у будівлях і спорудах та на територіях має наслідком підвищення електромагнітного фону техногенного походження. Поступовий перехід мобільного зв'язку на стандарт 5G збільшує частку електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот у загальному електромагнітному навантаженні на середовище і може підвищувати електромагнітний фон за рахунок відбиттів та перевідбиттів високочастотних випромінювань. У таких умовах у значній частині будівель і споруд необхідно вживати заходи зі зниження електромагнітних впливів на людей. Крім того, необхідним є підвищення електромагнітної сумісності технічних засобів, тобто стійкості до зовнішніх електромагнітних впливів. Найбільш ефективним засобом захисту є екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Головним недоліком більшості існуючих захисних матеріалів є високі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль та неможливість регулювати захисні властивості у залежності від потрібної ефективності. Останнє вимагає розроблення й впровадження екрануючих матеріалів і конструкцій, які поряд з високою ефективністю забезпечують надійне функціонування усіх засобів бездротового зв'язку.

У першому розділі проаналізовані нормативна база з електромагнітної безпеки та існуючі підходи до забезпечення електромагнітної безпеки людей. Визначено недостатнє використання неоднорідностей у будівельних матеріалах та конструкціях. Зокрема умови застосування феромагнітних неоднорідностей без

зниження функціоналу будівельних матеріалів і конструкцій. Недостатньо розроблено засади застосування неоднорідних матеріалів з наповнювачами малої вартості для вироблення облицювальних матеріалів.

У другому розділі розглянуто методи і методики експериментальних досліджень та методи прогнозування захисних властивостей матеріалів.

У третьому розділі досліджено захисні властивості будівельних матеріалів з регулярними феромагнітними неоднорідностями та визначені теоретичні засади їх раціоналізації. Досліджено ефективність матеріалів з неоднорідностями різних конфігурацій. Визначено захисні властивості неоднорідних діелектричних будівельних матеріалів. Досліджено захисні властивості неоднорідних облицювальних матеріалів на основі карбонільного заліза.

У четвертому розділі визначено загальні засади розроблення і впровадження неоднорідних матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань й надано відповідний алгоритм. Розглянуто застосування електромагнітних екранів у комплексі заходів з безпеки фізичних факторів техногенного походження і надано пропозиції щодо вдосконалення національної нормативно-правової бази з електромагнітної безпеки.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

Вперше

– *визначено* ефективність екранування електромагнітних випромінювань будівельними матеріалами з регулярно розташованими провідними лінійними структурами і встановлено, що їх можна розглядати як електромагнітні кристали, що дозволило визначити смуги прозорості і поглинання випромінювання матеріалом з використанням універсального показника $ka/2\pi$ (k – хвильове число, a – амплітуда електромагнітної хвилі) спрощує процес обирання будівельних матеріалів необхідної ефективності, виходячи з фактичний амплітудно-частотних характеристик випромінювання, яке потребує екранування;

– *визначено* залежності захисних властивостей неоднорідних будівельних матеріалів на основі цементобетону (матриця) і базальтових волокон (арматура) на

основі порівняння коефіцієнтів заломлення електромагнітних хвиль, що дозволило визначити підходи до підвищення ефективності таких матеріалів: нанесення на поверхню базальтових волокон провідної субстанції дозволяє підвищити ефективність екранування й застосовувати для прогнозування кількісних значень відповідних коефіцієнтів математичний апарат для металевих регулярних структур.

Удосконалено:

– технологічні підходи до проєктування композиційних магнітодіелектриків. Застосування у якості наповнювача карбонільного заліза у кількості 14–15 % за об'ємом і товщини матеріалу 5 мм, дозволило отримати коефіцієнт пропускання матеріалу електромагнітних випромінювань ультрависоких частот не вищий за 0,40. Коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль не перевищує 0,25, що є кращим показником у порівнянні з відомими аналогами.

– *Набули подальшого розвитку* розрахункові методи прогнозування ефективності неоднорідних металевих перфорованих структур за рахунок застосування математичного апарату теорії хвилеводів. Це дозволило визначити частоти резонансних поглинань і пропускань у залежності від параметрів перфорованої структури.

Практичне значення одержаних результатів:

– одержані результати дозволяють підвищити ефективність екранування електромагнітних випромінювань будівельними та облицювальними матеріалами без зниження їх основного функціоналу – масогабаритних розмірів, пружних модулів тощо;

– застосування діелектричних неоднорідностей у якості екрануючих елементів дозволяє знизити вагу матеріалів, покриття неоднорідності провідним матеріалом захищає арматуру від лужного середовища цементобетонів;

– застосування розрахункового апарату на основі теорії хвилеводів дозволяє з мінімальними похибками прогнозувати захисні властивості перфорованих структур на принципах розумної достатності;

– застосування карбонільного заліза великої дисперсності і низької вартості дозволяє застосовувати його у якості наповнювача облицювальних матеріалів з малими коефіцієнтами відбиття електромагнітних хвиль, що унеможливлює небажаний перерозподіл потоків електромагнітної енергії.

Ключові слова: електромагнітна безпека, електромагнітний екран, будівельні матеріали, неоднорідні матеріали, екранування, діелектричні властивості, композиційні матеріали.

ABSTRACT

Klymchuk, A.V. Protection of the population and workers from the effects of man-made electromagnetic fields using non-homogeneous cladding materials. – Qualification thesis in the form of a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 26 – ‘Civil Safety’, specialisation 263 – ‘Civil Safety’ – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The increase in the number and density of electrical and electronic equipment in buildings, structures and outdoor areas results in a rise in man-made electromagnetic background radiation. The gradual transition of mobile communications to the 5G standard increases the proportion of ultra-high and higher frequency electromagnetic radiation in the overall electromagnetic load on the environment and may increase the electromagnetic background due to reflections and re-reflections of high-frequency radiation. Under such conditions, measures must be taken in a significant proportion of buildings and structures to reduce electromagnetic exposure to people. Furthermore, it is necessary to improve the electromagnetic compatibility of technical equipment, i.e. its resistance to external electromagnetic influences. The most effective means of protection is the shielding of electromagnetic fields across a wide frequency range. The main drawback of most existing shielding materials is their high electromagnetic wave reflection coefficients and the inability to adjust their shielding properties according to the required level of effectiveness. The latter necessitates the development and

implementation of shielding materials and structures which, alongside high effectiveness, ensure the reliable operation of all wireless communication devices.

The first chapter analyses the regulatory framework for electromagnetic safety and existing approaches to ensuring the electromagnetic safety of people. It identifies the insufficient use of inhomogeneities in building materials and structures. In particular, it examines the conditions for the application of ferromagnetic inhomogeneities without compromising the functionality of building materials and structures. The principles for the use of heterogeneous materials with low-cost fillers in the production of cladding materials have not been sufficiently developed.

The second chapter examines the methods and techniques of experimental research and methods for predicting the protective properties of materials.

The third chapter investigates the protective properties of building materials with regular ferromagnetic inhomogeneities and establishes the theoretical foundations for their optimisation. The effectiveness of materials with inhomogeneities of various configurations is investigated. The protective properties of heterogeneous dielectric building materials are determined. The protective properties of heterogeneous cladding materials based on carbonyl iron have been investigated.

The fourth chapter defines the general principles for the development and implementation of heterogeneous materials for shielding electromagnetic radiation and provides a corresponding algorithm. The use of electromagnetic screens within a comprehensive set of measures for the safety of man-made physical factors is considered, and proposals are made for improving the national regulatory framework for electromagnetic safety.

The scientific novelty of this work lies in the following:

For the first time

– The effectiveness of electromagnetic radiation shielding by building materials with regularly arranged conductive linear structures has been determined, and it has been established that these can be regarded as electromagnetic crystals; this has made it possible to determine the bands of transparency and absorption of radiation by

the material using the universal index $ka/2\pi$ (k – wave number, a – amplitude of the electromagnetic wave), which simplifies the process of selecting building materials of the required effectiveness based on the actual amplitude-frequency characteristics of the radiation requiring shielding;

– The dependencies of the protective properties of heterogeneous building materials based on cement concrete (matrix) and basalt fibres (reinforcement) have been determined by comparing the refractive indices of electromagnetic waves, which has enabled the identification of approaches to improving the effectiveness of such materials: applying a conductive substance to the surface of basalt fibres improves shielding efficiency and allows the use of a mathematical framework for metallic regular structures to predict the quantitative values of the relevant coefficients.

Improvements:

– Technological approaches to the design of composite magnetodielectrics. The use of carbonyl iron as a filler in an amount of 14–15% by volume and a material thickness of 5 mm has made it possible to achieve an electromagnetic wave transmission coefficient for ultra-high frequencies of no more than 0.40. The electromagnetic wave reflection coefficient does not exceed 0.25, which is a better indicator compared to known analogues.

– Calculation methods for predicting the effectiveness of heterogeneous perforated metal structures were further developed through the application of the mathematical apparatus of waveguide theory. This has made it possible to determine the frequencies of resonant absorption and transmission depending on the parameters of the perforated structure.

Practical significance of the results obtained:

– the results obtained make it possible to improve the effectiveness of electromagnetic radiation shielding using building and cladding materials without compromising their primary functional characteristics – mass, dimensions, elastic moduli, etc.;

– the use of dielectric inhomogeneities as shielding elements allows the weight of materials to be reduced; coating the inhomogeneities with a conductive material protects the reinforcement from the alkaline environment of cement-concrete;

– the use of a calculation method based on waveguide theory allows the protective properties of perforated structures to be predicted with minimal error, based on the principle of reasonable sufficiency;

– The use of highly dispersed, low-cost carbonyl iron allows it to be used as a filler in cladding materials with low electromagnetic wave reflection coefficients, thereby preventing the undesirable redistribution of electromagnetic energy flows.

Keywords: electromagnetic safety, electromagnetic shielding, building materials, heterogeneous materials, shielding, dielectric properties, composite materials.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus)

1. 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

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Biruk, Y., & Klymchuk, A. (2024). Засади проєктування неоднорідних електромагнітних екранів. Системи управління, навігації та зв’язку. Збірник наукових праць, 3(77), 199-202. https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.199

3. Я. І. Бірук, А. В. Климчук (2025). Дослідження умов максимальної ефективності перфорованих електромагнітних екранів. Системи управління, навігації та зв’язку. Збірник наукових праць. 1(79), 162-164, doi: 10.26906/SUNZ.2025.1.162

4. Бірук Я. І., Шаманський С. Й., Климчук А. В. Дослідження ефективності електромагнітних екранів резонансного типу. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2(80), 2025, с. 218-221, doi: 10.26906/SUNZ.2025.1.218-221

Публікації у інших виданнях України

5. Бірук Я. І., Климчук А. В. Неоднорідні широкосмугові матеріали для екранування електромагнітних полів // Тези доповідей міжнародної науково-методичної конференції «Захист населення, територій та об'єктів критичної інфраструктури – освіта, наука, практика»: НАУ, Київ, Україна, Лечче, Італія, 23 - 24 травня 2024 року – С.28.https://dspace.nau.edu.ua/handle/NAU/63629

6. Y. Biruk, L. Zozulya, A. Klymchuk Means of increasing the efficiency of shielding electromagnetic fields by heterogeneous building materials. REPORTS of the 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, November 27-29, 2024, KYIV, p. 105

7. Я.І. Бірук, А.В. Климчук. Я.О. Галонько. Засоби нормалізації фізичних чинників середовища сховищ цивільного захисту. V Міжнародна науково-практична конференція «будівлі та споруди спеціального призначення: матеріали та конструкції, с.134-135. https://drive.google.com/drive/folders/1YLiRwHBMwHuCRTH22OXjKjeQqOx6b279?usp=sharing

8. Yana Biruk, Andrii Klymchuk, Serhii Zozulya, Georgiy Suraichenko. Innovative means of shielding wide-frequency-range electromagnetic fields. REPORTS of the 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, December 3-5, 2025, KYIV, p. 73-74

ЗМІСТ

ГЛОСАРІЙ……..……... 12

ПЕРЕЛІК УМОВИХ ПОЗНАЧЕНЬ……... 14

ВСТУП……. 15

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ТА РОЗРОБОК ЩОДО ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ…… 20

1.1. Електромагнітні поля техногенного походження як фактор шкідливого впливу на людей……..... 20

1.2. Аналіз нормативної бази з електромагнітної безпеки…… 21

1.3. Огляд результатів досліджень і розробок у галузі електромагнітної безпеки……... 24

1.4. Оцінка сучасного стану питання та постановка завдань досліджень…..... 29

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ……..... 31

2.1. Теоретичні засади прогнозування ефективності екранування електромагнітних полів і проєктування електромагнітних екранів……. 31

2.2. Особливості визначення захисних властивостей коефіцієнтів екранування захисних матеріалів для екранування електромагнітних полів…… 38

Висновки до розділу 2…….. 42

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ НЕОДНОРІДНИМИ МАТЕРІАЛАМИ І КОНСТРУКЦІЯМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МАКСИМАЛЬНИХ ЕФЕКТИВНОСТЕЙ……..... 44

3.1. Дослідження захисних властивостей будівельних матеріалів з регулярними феромагнітними неоднорідностями…… 44

3.2. Дослідження захисних властивостей регулярних структур на основі провідних матеріалів…..…….. 52
3.3. Дослідження захисних властивостей неоднорідних діелектричних будівельних матеріалів …… 63
3.4. Дослідження захисних властивостей пласких неоднорідних облицювальних матеріалів …….……. 66
Висновки до розділу 3…….…… 80
РОЗДІЛ 4. ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ БЕЗПЕКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕОДНОРІДНИХ ЕКРАНУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ…….. 83
4.1. Загальні засади розроблення і впровадження неоднорідних матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань……..... 83
4.2. Електромагнітні екрани у комплексі заходів з безпеки фізичних факторів техногенного походження…… 90
4.3. Пропозиції щодо вдосконалення національної нормативно-правової бази з електромагнітної безпеки…….. 93
4.4. Впровадження результатів досліджень та їх ефективності…… 96
Висновки до розділу 4…….. 98
ВИСНОВКИ…… 100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..... 103
ДОДАТОК А……. 118
ДОДАТОК Б……...……..... 120
ДОДАТОК В…… 122

ГЛОСАРІЙ

Електромагнітне випромінювання	електромагнітні хвилі, випромінювані зарядженими частинками, атомами, молекулами, антенами та іншими випромінювальними системами.
Електромагнітна сумісність	здатність радіоелектронних засобів і вимірювальних пристроїв одночасно функціонувати з обумовленою якістю в реальних умовах експлуатації з урахуванням впливу радіозавад і не створювати неприпустимих радіозавад іншим радіоелектронним засобам.
Інфрачервоне випромінювання	випромінювання, що охоплює спектральну область між червоною межею видимого світла з довжиною хвилі 700 нм та мікрохвильовим випромінюванням з довжиною хвилі 1 мм.
Коефіцієнт екранування	відношення інтенсивності електромагнітного поля, виміряної до встановлення безперервного нескінченного екрана та після його встановлення
Електромагнітна безпека	система технічних, організаційних та нормативних заходів, спрямованих на забезпечення умов, за яких рівні електромагнітного впливу в робочих, житлових та виробничих середовищах не перевищують встановлених нормативних меж
Ефективність екранування	це величина, що характеризує здатність матеріалу або конструкції екрану зменшувати інтенсивність електромагнітного поля при його проходженні через екран

Електромагнітне поле (ЕМП)	це фізичне поле, що утворюється взаємопов’язаними змінними електричними та магнітними складовими, які є проявом електромагнітної взаємодії та поширюються у просторі у вигляді електромагнітних хвиль.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers – Міжнародна організація інженерів у галузі електротехніки, радіоелектроніки та радіоелектронної промисловості

ISO – International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації

ICNIPR – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – Міжнародна комісія із захисту від неіонізуючого випромінювання

ELF − Extremely low frequency – Надзвичайно низькі частоти

ЕМП – Електромагніті поля

ДСНіП – Державні Санітарні Норми і Правила,

ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров’я

K_r − Коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль

K_s − Коефіцієнт екранування електромагнітних полів

SA − Питома поглинена енергія

SAR − Питома поглинена потужність

ВСТУП

Актуальність теми. В останнє десятиріччя спостерігається стале підвищення електромагнітного навантаження на людей у виробничих і побутових умовах та довкілля в цілому. Значною мірою це обумовлене збільшенням кількості джерел електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот та підвищенням робочих частот усіх систем бездротової передачі інформації, а також збільшенням розгалуженості електричних, побутових, громадських і промислових мереж. У таких умовах актуальною є проблема захисту людей у виробничому та побутовому середовищі від електромагнітних впливів. Одним з аспектів вирішення цієї проблеми є застосування екранування електромагнітних полів і випромінювань. Застосування додаткових облицювань на будівлях не завжди є зручним і доцільним. Додаткове облицювання повинне мати малу товщину й регульовану ефективність. Це ускладнює конструкцію, спотворює її вигляд і потребує додаткових витрат. Крім того, поряд із захистом людей від електромагнітних впливів необхідно забезпечити надійне функціонування усіх видів бездротового зв’язку. Додавання до будівельних матеріалів металевих та металовмісних домішок для екранування електромагнітних випромінювань не є виправданим. Такі домішки впливають на основний функціонал будівельних матеріалів. Тому важливою задачею є зниження рівнів електромагнітних полів і випромінювань за рахунок раціоналізації розміщення регулярних структур будівельних матеріалів з точки зору екранування електромагнітних полів і випромінювань із забезпеченням стабільного функціонування бездротового зв’язку.

Виходячи з викладеного тема дисертаційного дослідження є актуальним науково-практичним завданням.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до «Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні», схваленою розпорядженням Кабінету

Міністрів України від 12.12.2018 р. № 989–р. та у рамках виконання держбюджетних тем: «Дослідження фізичних факторів техногенного походження виробничих ризиків та засоби їх зниження. № 0121U111535».

Мета і завдання дослідження.

Метою дослідження є виявлення закономірностей змін ефективності екранування електромагнітних полів будівельними та облицювальними матеріалами у залежності від їх складу та конструктивних особливостей і визначення їх максимальних захисних властивостей.

Завдання:

- аналіз сучасних підходів до екранування техногенних електромагнітних випромінювань, які впливають на населення та працюючих і визначення невирішених питань у цій галузі;
- визначення методів і розроблення методик дослідження кількісних значень коефіцієнтів відбиття, поглинання та проходження електромагнітних випромінювань крізь захисні конструкції;
- дослідження екрануючих властивостей регулярних феромагнітних структур у будівельних матеріалах та визначення шляхів підвищення їх ефективності;
- дослідження регулярних діелектричних структур у будівельних матеріалах та визначення шляхів підвищення їх ефективності;
- дослідження ефективності композиційних екрануючих матеріалів, придатних для облицювання поверхонь великих площ.

Об’єкт дослідження – процеси екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот неоднорідними матеріалами, придатними для застосування у будівельній галузі.

Предмет дослідження – залежності коефіцієнтів відбиття, поглинання та пропускання електромагнітних випромінювань у залежності від конструктивних особливостей будівельних та облицювальних матеріалів, та визначення засобів підвищення екранувальних властивостей.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

Вперше

– *Визначено* ефективність екранування електромагнітних випромінювань будівельними матеріалами з регулярно розташованими провідними лінійними структурами і встановлено, що їх можна розглядати як електромагнітні кристали, що дозволило визначити смуги прозорості і поглинання випромінювання матеріалом з використанням універсального показника $ka/2\pi$ (k – хвильове число, a – амплітуда електромагнітної хвилі) спрощує процес обирання будівельних матеріалів необхідної ефективності, виходячи з фактичний амплітудно-частотних характеристик випромінювання, яке потребує екранування;

– *Визначено* залежності захисних властивостей неоднорідних будівельних матеріалів на основі цементобетону (матриця) і базальтових волокон (арматура) на основі порівняння коефіцієнтів заломлення електромагнітних хвиль, що дозволило визначити підходи до підвищення ефективності таких матеріалів: нанесення на поверхню базальтових волокон провідної субстанції дозволяє підвищити ефективність екранування й застосовувати для прогнозування кількісних значень відповідних коефіцієнтів математичний апарат для металевих регулярних структур.

Удосконалено:

– Технологічні підходи до проєктування композиційних магнітодіелектриків. Застосування у якості наповнювача карбонільного заліза у кількості 14–15 % за об’ємом і товщини матеріалу 5 мм, дозволило отримати коефіцієнт пропускання матеріалу електромагнітних випромінювань ультрависоких частот не вищий за 0,40. Коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль не перевищує 0,25, що є кращим показником у порівнянні з відомими аналогами.

– *Набули подальшого розвитку* розрахункові методи прогнозування ефективності неоднорідних металевих перфорованих структур за рахунок застосування математичного апарату теорії хвилеводів. Це дозволило визначити

частоти резонансних поглинань і пропускань у залежності від параметрів перфорованої структури.

Практичне значення одержаних результатів:

– Одержані результати дозволяють підвищити ефективність екранування електромагнітних випромінювань будівельними та облицювальними матеріалами без зниження їх основного функціоналу – масогабаритних розмірів, пружних модулів тощо;

– Застосування діелектричних неоднорідностей у якості екрануючих елементів дозволяє знизити вагу матеріалів, покриття неоднорідності провідним матеріалом захищає арматуру від лужного середовища цементобетонів;

– Застосування розрахункового апарату на основі теорії хвилеводів дозволяє з мінімальними похибками прогнозувати захисні властивості перфорованих структур на принципах розумної достатності;

– Застосування карбонільного заліза великої дисперсності і низької вартості дозволяє застосовувати його у якості наповнювача облицювальних матеріалів з малими коефіцієнтами відбиття електромагнітних хвиль, що унеможливлює небажаний перерозподіл потоків електромагнітної енергії.

Особистий внесок здобувача. У [1] експериментальні визначення коефіцієнтів екранування неоднорідних будівельних матеріалів з феромагнітними регулярними структурами. У [2] ідея визначення розрахункового апарату для проєктування захисних матеріалів. У [3] експериментальні дослідження коефіцієнтів екранування перфорованих структур з різними параметрами перфорацій. У [4] визначення ефективності захисних конструкцій на основі теорії хвилеводів.

Апробація результатів дослідження.

Результати досліджень доповідалися на*:*

1. Міжнародній науково-методичній конференції «Захист населення, територій та об'єктів критичної інфраструктури – освіта, наука, практика»: НАУ, Київ, Україна, Лечче, Італія, 23 - 24 травня 2024 р.
2. V Міжнародній науково-практичній конференції «БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ: МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЇ
3. 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, November 27-29, 2024, KYIV, UKRAINE
4. 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, December 3-5, 2025, KYIV, UKRAINE

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 8 наукових працях, серед яких 1 стаття у наукометричній базі «SCOPUS», 3 статті у наукових фахових періодичних виданнях рекомендованих Міністерством освіти і науки України, 4 тез доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 122 сторінки, з них: 102 сторінки основного тексту, список використаних джерел із 111 найменувань на 15 сторінок; 3 додатків на 5 сторінках.

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ТА РОЗРОБОК ЩОДО ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

1.1. Електромагнітні поля техногенного походження як фактор шкідливого впливу на людей

Електромагнітні поля техногенного походження є невід'ємною частиною світу. У зв'язку зі зростанням використання електронних пристроїв, таких як комп'ютери, мобільні телефони, та інші технології, інтенсивність та поширення електромагнітних полів у навколишньому середовищі значно зростають. Вплив цих полів на здоров'я людей є критично важливим. Всесвітня організація здоров'я (ВООЗ) у рамках Міжнародного проєкту зазначає, що електромагнітні поля різних частот є одним з найпоширеніших факторів впливу на довкілля. Особливе занепокоєння викликає можливість розвитку лейкемії у людей, які піддаються впливу електромагнітних полів наднизьких частот [1]. У роботі [2] дослідження електромагнітних полів наднизької частоти (1–300 Гц) показали зміни в клітинному рості під впливом ELF-EMF, які можуть як стимулювати, так і пригнічувати клітинний ріст залежно від параметрів експозиції. У дослідженні [3] показано, що вплив ELF-EMF може призводити до змін у когнітивних функціях, а саме: увага, пам'ять, швидкість обробки інформації. Дослідження [4] вказує на можливості порушення сну, його зміни і тривалості, що може негативно позначатися на здоров'ї людини. Згідно з дослідженням [5], працівники, що зазнають впливу високочастотних електромагнітних, таких що генеруються медичними сканерами MRI, можуть бути піддані значним ризикам. Також зазначається, що рівень впливу на виробництві часто перевищує той, який зустрічається у загальній популяції, що робить ці ризики особливо важливими для робітників. У дослідженнях [6, 7] представлені дещо суперечливі дані щодо впливу електромагнітних полів визначених частот на здоров'я людей. Ці розбіжності у

багатьох наукових дослідженнях можуть пояснюватися не тільки різними методологіями, але й можливими синергетичними ефектами, коли вплив електромагнітних полів і випромінювань взаємодіє з іншими факторами, посилюючи або змінюючи його загальний ефект. У роботі [8] розглянуто можливість оцінювання ризиків для здоров'я щодо впливу електромагнітних полів на організм людини. Вплив електромагнітних полів техногенного походження на здоров'я людей залишається неоднозначним. Для запобігання шкідливим ефектам електромагнітних полів на здоров'я людей існує ряд міжнародних стандартів та рекомендацій. Міжнародні організації, такі як ICNIPR та IEEE встановлюють максимально допустимі рівні впливу для національних норм, які застосовуються у багатьох країнах світу. ICNIPR та IEEE регулярно переглядають та оновлюють свої стандарти на основі наукових даних. Ці стандарти включають максимально допустимі рівні впливу для різних частот електромагнітного спектра, щоб мінімізувати ризики для здоров'я. Подальші дослідження є необхідними для глибокого розуміння впливу електромагнітних полів та розробки чітких рекомендацій щодо безпечного використання електромагнітних технологій. Але є очевидним, що високочастотні електромагнітні впливи є шкідливими для людей, а невизначеності порогових значень вимагають максимального зниження рівнів впливу електромагнітних випромінювань на людей.

1.2. Нормативна база з електромагнітної безпеки

Нормативна база з електромагнітної безпеки регулює вплив електромагнітних полів (ЕМП) на людей і навколишнє середовище, встановлюючи стандарти та правила для зменшення потенційного шкідливого впливу.

Основними нормативами з електромагнітної безпеки в Україні є [9, 10]. У нормативі [9] вказано, що допустимий рівень електромагнітного поля в середині житлових будинків, приміщень освітніх закладів (крім тестових зон для радіообладнання), закладів охорони здоров'я та рекреаційних зон не повинен

перевищувати 100 мкВт/см² або 19 В/м. Але у державних санітарних нормах [10] набагато нижчі граничні рівні – 10–25 мкВт/см^2, і у найближчий час зміни не плануються. Основними перевагами нормативу [9] є те, що при плануванні забудов передбачаються заходи для зниження рівнів електромагнітних полів, які створюються металевими конструкціями та іншими джерелами перевипромінювання в житлових, громадських та інших будівлях. Норматив [9] зосереджується, в основному, на захисті населення від електромагнітних випромінювань, тоді, як [10] також охоплює процеси проєктування та будівництва споруд, включаючи заходи для зниження впливу електромагнітних полів. В Україні дані нормативи вимірюють енергетичне навантаження у(В/м)^2·год та (А/м)^2·год. Але у рекомендаціях ICNIRP [11] навантаження на людей визначається у Вт/кг та Дж/кг.

Незважаючи на рекомендації ВООЗ щодо впровадження принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable), у реальних виробничих та побутових умовах необхідно регламентувати гранично допустимі значення електромагнітних полів для всіх діапазонів частот або окремих частот. В Україні у 2023 році були прийняті вимоги Європейської директиви з електромагнітної безпеки [12]. Ці вимоги імплементовані в нормативно-правову базу України як мінімальні умови [13]. Але ці вимоги стосуються кількісних значень напруженостей електричних і магнітних полів, щільностей потоків енергії електромагнітних полів, які впринципі неповинні впливати на людей незалежно від часу впливу. У реальних умовах електромагнітні впливи повинні бути набагато нижчими. Перевагою загальноєвропейського нормативу є те, що в ньому окремо розглядаються гранично допустимі значення полів і випромінювань у виробничих та побутових вимогах й відсутні розбіжності щодо граничних рівнів для аналогічних умов, що притаманне чинним національним нормативам. Наявність кількох чинних нормативів з різними вимогами ускладнює їх практичне застосування. У той же час імплементація міжнародних нормативів в національну нормативно-правову базу породжує декілька проблем. Наприклад, застосування таких показників, як SA (питома

поглинена енергія) та SAR (питома поглинена потужність) не може бути реалізована в Україні. Відсутнє обладнання та методики визначення цих показників, що потребує вирішення. Потребують перегляду нормативи [9], які містять принципове протиріччя. Якщо для усіх засобів бездротового зв'язку гранично допустимий рівень складає 100 мкВт/см², то таблиці з вимогами щодо радіотехнічних засобів цивільної авіації й морського транспорту залишилися без змін. Склалася парадоксальна ситуація – для джерел з більш високими частотами електромагнітних випромінювань гранично допустимі рівні залишилися порядка 15–20 мкВт/см². Недоліком нормативних документів є або абстрактна вимога застосовувати екранування електромагнітних полів за необхідності, або рекомендації застосовувати сплави чорних та кольорових металів та вироби з них. Застосування композиційних екрануючих матеріалів не згадуються та не регламентуються жодними санітарними нормами. Але аналіз чинних національної та міжнародної нормативних баз дозволяють дійти висновку про необхідність максимального зниження електромагнітних впливів техногенного походження на людей. Усі заходи з екранування електромагнітних полів повинні здійснюватися з узгодженням з вимогами електромагнітної сумісності обладнання. В Україні методом підтвердження було прийнято низку міжнародних стандартів з електромагнітної сумісності, які регламентують взаємний вплив електричного та електронного обладнання [14]. Щодо низькочастотних електромагнітних полів, то це, наприклад [15, 16], радіодіапазону стосуються нормативи[17, 18]. Важливість проблематики електромагнітної сумісності обладнання також обумовлюється необхідністю дотримання норм електромагнітної безпеки та стабільності роботи комп'ютерної техніки [19, 20]. Такі вимоги відповідають вимогам загальноєвропейської директиви [21]. Слід враховувати, що електромагнітна безпека, електромагнітна сумісність технічних засобів є двоєдиною задачею [22, 23]. Дослідження цієї проблематики узагальнені у роботі [24]. Зокрема показано необхідність одночасного захисту людей та обладнання об'єктів критичної інфраструктури. Вимоги щодо значень електромагнітних полів у побутових умовах

містяться у загальновизнаному Європейському стандарті [25]. Перевагою цього стандарту, крім гранично допустимих рівнів електромагнітних полів та випромінювань усіх частотних діапазонів є регламентація напруженості стаціонарних магнітних полів, у частині спотворення природного магнітного поля. Це є дуже важливим аспектом у галузі екранування, тому що зниження природного магнітного поля за рахунок застосування електромагнітних екранів може знизити й рівні природного магнітного поля. В Україні рекомендації щодо небажаності зниження геомагнітного поля нижче 25 мкТл у виробничих умовах і 30 мкТл у побутових умовах міститься у нормативі [26].

У практичній площині наведені вище вимоги означають необхідність одночасного захисту людей та забезпечення стабільного функціонування усіх типів бездротового зв’язку.

1.3. Огляд результатів досліджень і розробок у галузі електромагнітної безпеки

Проблематика електромагнітної безпеки людей в усіх умовах – виробничих та побутових має дві складові: захист від впливу електричних і магнітних полів наднизьких і низьких частот та від впливу електромагнітних полів дуже високих, ультрависоких і вищих частот. Це обумовлено як різними фізіологічним впливом електромагнітних полів різних частот, так і різними фізичними механізмами зниження їх кількісних значень. Проблематиці впливу та зниження рівнів низькочастотних електричних та магнітних полів присвячено роботи [27, 28]. У виробничих умовах усередині приміщень засоби зниження рівнів електричних в магнітних полів промислової частоти та частотних діапазонів комп’ютерної техніки, а також систем освітлення наведено у дисертаційному досліджені [29]. Для енергетичних об’єктів рівні полів та засоби їх зниження наведено у [30,31]. Зокрема показано, що значний вплив на електромагнітну обстановку складають струми витоку у системах електроживлення [32–33]. Крім того, через наявність у

будівлях і спорудах електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками генеруються гармоніки та інтергармоніки електричного струму промислової частоти, які мають відповідні магнітні поля [34, 35]. Екранування таких полів дуже складне через їх генерацію системи електроживлення, що є наслідком нелінійності навантаження. У таких умовах застосування екранування практично неможливе, тому зниження значень таких полів доцільне вдосконаленням системи електроживлення будівель і споруд. У роботах [36–38] показана необхідність придушення гармонік та інтергармонік напруги (електроструму) застосуванням відповідних технічних засобів у системах електроживлення. Найбільш досконалі підходи до цієї проблеми наведено у роботах [39, 40]. У загальному випадку доцільно розробити і впровадити системи керування електромагнітною обстановкою у будівлях і спорудах [41, 42]. Одним засобом керування електромагнітною обстановкою є застосування екранування. Але для застосування екранування необхідно мати вихідні дані, які дозволять оптимізувати коефіцієнти екранування, зокрема виходячи з необхідності забезпечення роботи мобільного зв’язку та нормативних значень геомагнітного поля. Дослідження рівнів електромагнітних полів промислової частоти з боку ліній електропередач присвячено багато робіт [43–45], зокрема це стосується як повітряних, так і кабельних ліній електропередачі [46, 47], а також розподільчих пристроїв [48]. Одним зі способів прогнозування електромагнітного навантаження на середовище є моделювання поширення електричних і магнітних полів від окремих джерел [49, 50]. Застосування моделювання надає змогу прогнозувати електромагнітну обстановку за різних навантажень на електрообладнання зовнішніх та внутрішніх джерел. В останнє десятиліття багато уваги приділяється дослідженню розповсюдження електромагнітних випромінювань високочастотних джерел – мобільного зв’язку [51–53]. Фактично усі ці роботи присвячені визначенню закономірності поширення електромагнітних випромінювань частот мобільного зв’язку та значенням щільностей потоків енергії. Засобом захисту від електромагнітних полів таких частот присвячені дослідження [54–57]. Головними

засобами захисту пропонуються санітарно-захисні зони та екранування. Але ці роботи виконані за встановлення гранично допустимих рівнів щільностей потоків енергії 2,5–10 мкВт/см^2. На сьогодні, принаймні в Україні, це значення складає 100 мкВт/см^2. У Європейських країнах існує тенденція до підвищення гранично допустимих рівнів. Значною мірою це обумовлене поступовим впровадженням мобільного зв'язку стандарту 5G [58], який за своїм впливом й поширенням кардинально відрізняється від випромінювань мобільного зв'язку, який використовувався протягом багатьох років [59]. Проблема полягає в дуже високому згасанні при розповсюдженні у повітрі електромагнітних випромінювань надвисоких частот (вище 3 ГГц), що притаманне стандарту 5G. Тому виникає необхідність або збільшувати щільність розташування базових станцій мобільного зв'язку, або підвищити гранично допустимі рівні. Зазвичай є тенденція комбінації цих двох підходів. Але у будь-якому випадку постає задача зниження рівнів полів у приміщеннях, що особливо стосується закладів охорони здоров'я, освіти тощо. У загальному випадку впровадження захисту потребує визначення значень електромагнітних полів у сучасних умовах. Це стосується як низькочастотних, так і високочастотних впливів [60–64]. У дослідженні [65] показано, що врахування просторових гармонік є обов'язковим для проєктування засобів захисту, що накладає додаткові умови як на склад захисних матеріалів, так і на конструкції, виготовлені з них [66, 67]. У роботах [68, 69] наведено можливість активного екранування електромагнітних полів, тобто створення джерел зустрічного поля, яке компенсує поле, яке потребує екранування. Втім такий підхід не дає можливості захистити великі об'єми, такі як цілісні будівлі і споруди від електромагнітних впливів. Дослідження щодо екранування електромагнітних полів і випромінювань металевими матеріалами наведено у [70, 71] свідчить що, такі матеріали не відповідають вимогам сьогодення. Зокрема, це стосується високочастотних випромінювань. Принциповим недоліком усіх суцільних металевих матеріалів є високі коефіцієнти відбиття. Враховуючи той факт, що коефіцієнти відбиття підвищуються зі зростанням частоти електромагнітного

випромінювання, що є фундаментальною закономірністю, слід розглянути можливість застосування металевих матеріалів у неоднорідному вигляді. У практичній розробці [72] показано принципову можливість такого підходу. У роботі [73] наведено ефективність екранування магнітного поля промислової частоти сітчастими структурами. Такий підхід застосовувався для екранування електромагнітних випромінювань радіотехнічних об'єктів цивільної авіації [54]. Але специфікою таких структур є їх практична монохромність, тобто призначеність для екранування електромагнітного випромінювання практично однієї частоти. Це обмежує застосування сітчастих неоднорідних структур для екранування більшості об'єктів цивільного призначення. Існуючі підходи до проєктування таких систем [74, 75] певним чином застаріли. Це стосується як математичних апаратів, так і матеріалів, з яких виготовляються захисні конструкції – як амплітудно-частотні характеристики електромагнітного випромінювання, так і значення електрофізичних і магнітних властивостей матеріалів закладаються у розрахункові співвідношення, що потребує продовження досліджень у цьому напрямі. В останнє десятиліття активно розвивається галузь розроблення й впровадження композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів і випромінювань [76–79]. Перевагою композицій є можливість не тільки керування захисними властивостями, а й зменшення значення коефіцієнту відбиття електромагнітних хвиль. У роботах [80, 81] показана можливість застосування відносно дешевих наповнювачів на основі феритів у полімерних матрицях для виготовлення екрануючих поверхонь великих площ. Але для виготовлення екранів високої ефективності товщина таких матеріалів повинна бути достатньо великою, що не зовсім прийнятно. У дослідженнях [82, 83] показана можливість підвищення ефективності екранування за рахунок створення градієнту електрофізичних властивостей. Розробки останніх років [84–86] свідчать про високу ефективність таких матеріалів. Але вони потребують застосування кількох шарів з послідовним їх нанесенням, що знижує технологічність застосування й підвищує вартість екранування. Високу ефективність екранування за малих товщин мають сучасні

текстильні матеріали [87–91]. Робота [92] свідчить, що такі матеріали ефективні за умови напилення металевої субстанції на текстильні волокна, або їх просочення наночастинками. Це робить такі матеріали занадто дорогими для широкого застосування. У роботах [93–95] показано ефективність рідких сумішей для екранування, принаймні високочастотних електромагнітних полів. Але застосування кількох наповнювачів сприяє деградації кінцевого матеріалу у процесі експлуатації. А застосування таких компонентів, як графітизована сажа та наночастинки значно підвищують вартість матеріалу. Більш прийнятними є рідкі суміші, описані у роботах [96–100]. Застосування магнетиту у вигляді залізорудного концентрату та концентрату з додавання невеликої кількості металургійного графіту забезпечує прийнятні коефіцієнти екранування і відносно низьку вартість кінцевого продукту. Але застосування таких матеріалів потребує їх окремого нанесення на потрібні поверхні, тобто фактично у існуючій будівлі, або у будівлі, яка проєктується потрібно додатково нанести захисні матеріали. Такі матеріали є захисними, але не є будівельними, або облицювальними. Як облицювальний пропонується матеріал, описаний у дослідженні [101]. Але він є чисто захисний і не несе іншої функції. Це притаманне більшості металополімерним матеріалам незалежно від того, чи є вони електродіелектриками, або магнітодіелектриками. У серії досліджень [102–105] визначено можливості застосування двоокису титану (рутилу) для виготовлення композиційних матеріалів, які ефективно екранують електромагнітні поля ультрависоких і вищих частот. У цих дослідженнях використовувався модифікований рутил, для кого додавалися вуглецеві компоненти. Не дивлячись на те, що пропонована технологія анонсується як достатньо проста, у розробленому вигляді вона мало придатна для промислових умов. Наноструктурований рутил з додаванням графіту нанорозмірів різних модифікацій потребує особливих умов синтезу у сухому аргоні й абсолютному й етиловому спирті. Тобто промислова технологія таких матеріалів буде мати високу вартість. Крім того, графеноподібний графіт та чорний рутил вимагають великих витрат при

виготовленні. Усі дослідження були виконані на модельних матеріалах (матрицях). Тобто для подальшого практичного застосування необхідно обрати прийнятну за фізико-механічними властивостями матриці, що також потребує додаткових досліджень. В той же час у наведених роботах поглинальні властивості модифікованого двоокису титану забезпечувалися дипольним механізмом поглинання електромагнітної енергії. Тобто за наявності у композиції електропровідних і магнітних компонентів можливо підвищити екрануючі властивості матеріалу зі зменшенням масогабаритних параметрів. Такий механізм доцільно отримати, наприклад, за рахунок забезпечення взаємодії вуглецю з іншими компонентами. Слід враховувати, що подібні властивості має карбонільне залізо. Але системних досліджень щодо його застосування у галузі цивільної безпеки не виконувалося.

У роботі [106] показана принципова можливість надання будівельним матеріалам функцій захисту від електромагнітних випромінювань. Але навіть для модельних матеріалів, для забезпечення високих захисних властивостей вміст екрануючої субстанції повинен бути близько 15 % за об’ємом. Це спричиняє погіршення головних показників будівельних матеріалів – міцності і технологічності застосування. Тому доцільно розглянути можливість надання будівельним та облицювальним матеріалам функцій захисту від електромагнітних випромінювань без змін їх пружних модулів. Перспективним напрямом є використання для електромагнітної безпеки неоднорідності будівельних матеріалів, таких, як металева арматура, сітки для армування тощо.

1.4. Оцінка сучасного стану питання та постановка завдань досліджень

Проведений аналіз досліджень і прикладних розробок у галузі екранування електромагнітних випромінювань дозволи дійти висновку, що не дивлячись на розроблення й впровадження великої кількості композиційних матеріалів високої ефективності існує низка невирішених питань. Більшість матеріалів призначена

для окремого нанесення на поверхні для надання будівлям, спорудам, окремим приміщенням більшого захисту від електромагнітних впливів. Не досліджено застосування для екранування електромагнітних випромінювань неоднорідностей будівельних матеріалів і конструкцій, закладених у них. Зокрема, не досліджено можливості умов застосування феромагнітних неоднорідностей (арматури, сітки) для екранування електромагнітних випромінювань без зниження міцнісних властивостей будівельних матеріалів і конструкцій. Не досліджено можливості застосування діелектричних неоднорідностей будівельних і облицювальних матеріалів, зокрема базальтових армуючих структур для забезпечення електромагнітної безпеки у будівлях і спорудах. Недостатньо досліджено і розроблено засади застосування неоднорідних матеріалів із наповнювачами малої вартості для їх використання у якості облицювальних матеріалів. Виходячи з наведеного були формульовані об’єкт, предмет, мета і завдання дослідження.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Теоретичні засади прогнозування ефективності екранування електромагнітних полів і проєктування електромагнітних екранів

Відомо, що електромагнітне поле, характеризується векторами напруженості *E* та *H* електричного та магнітного полів.

Електромагнітна хвиля розповсюджується в середовищі, яке характеризується властивостями, що впливають на умову розповсюдження. До них відносяться діелектрична і магнітна проникності. Через наявність наскрізної провідності, магнітних втрат і частотної залежності, дані величини є комплексними.

1. Комплексна діелектрична проникність:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \tag{2.1}$$

ε' – дійсна частина діелектричної проникності (Ф/м);

$j\varepsilon''$ – уявна частина діелектричної проникності;

$\varepsilon'' = \sigma / _{м}$ – коефіцієнт електричних втрат в середовищі;

σ – питома провідність середовища, $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$;

$\omega = 2\pi f$ – колова частота поля;

f – частота поля, Гц.

2. Комплексна магнітна проникність:

$$\mu = \mu' - j\mu'', \tag{2.2}$$

μ'' – коефіцієнт магнітних втрат в середовищі.

3. Тангенс кута електричних втрат, який характеризує залежність електричних властивостей даного середовища від частоти:

$$tg\Delta_1 = \sigma/\omega\varepsilon' = \varepsilon''/\varepsilon'. \tag{2.3}$$

При $tg\Delta_1 \ll 1$ матеріал є діелектриком, при $tg\Delta_1 \gg 1$ – провідником, при $tg\Delta_1 \approx 1$ – напівпровідником.

Так, як $tg\Delta_1 = \sigma/\omega\varepsilon'$, то з підвищенням частоти багато матеріалів, які мають які мають властивості провідників, переймають властивості діелектриків. Наприклад, морська вода і суха земля на надвисоких частотах переходять в розряд діелектриків.

4. Тангенс кута магнітних втрат:

$$tg\Delta_2 = \mu'/\mu'', \tag{2.4}$$

5. Комплексне хвильове число (стала розповсюдження поля в даному середовищі):

$$k' = \omega\sqrt{(\varepsilon' - j\varepsilon'')(\mu' - j\mu'')} = k' - jk'', \tag{2.5}$$

$k' = \omega/v\upsilon = 2\pi/\lambda$ – дійсна частина хвильового числа;

υ – швидкість розповсюдження поля в середовищі, м/с;

$\lambda = \upsilon / f$ – довжина електромагнітної хвилі;

k'' – коефіцієнт поглинання енергії поля в середовищі.

Для більшості поглинаючих середовищ магнітні втрати дуже малі $(\mu'' = 0)$.

$$k' = \omega\sqrt{\frac{\mu'\varepsilon'}{2}\left(\sqrt{1+tg^2\Delta_1}+1\right)}, \tag{2.6}$$

$$k'' = \omega\sqrt{\frac{\mu'\varepsilon'}{2}\left(\sqrt{1+tg^2\Delta_1}-1\right)}, \tag{2.7}$$

6. Хвильовий опір середовища:

$$Z = \sqrt{(\mu' - j\mu'')/(\varepsilon' - j\varepsilon'')}, \tag{2.8}$$

Враховуючи вище згадані властивості середовища, можна представити розповсюдження в ньому електромагнітного поля в відповідності з наступними рівняннями:

$$\vec{H} = H_0 e^{-k''r - k'r}, \tag{2.9}$$

$$\vec{E} = E_0 e^{-k''r - k'r}, \tag{2.10}$$

$\vec{E}$, $\vec{H}$ – комплексні вектори напруженості полів;

E_0, H_0 – напруженості поля на межі середовища, В/м, А/м, $E_0 = H_0 Z$.

r – відстань, яку пройшла хвиля, м.

Енергія електромагнітного поля характеризується вектором Пойтінга:

$$\vec{\Pi} = \frac{1}{2}\left[\vec{E}, \vec{H}\right] = \frac{1}{2}\frac{E^2}{Z} = \frac{1}{2}H^2 Z, \tag{2.11}$$

або в скалярній формі – щільністю потоку енергії в Вт/м^2, (енергія, яка проходить через одиницю поверхні, перпендикулярну напрямку розповсюдження поля за одиницю часу).

З урахуванням виразів (2.9–2.10) щільність потоку енергії буде визначатися із виразу:

$$W = \Pi = \frac{1}{2}EH = \frac{1}{2}H_0^2 eZ^{-2k''r} = \Pi_0 e^{-2k''r}. \tag{2.12}$$

З виразу (2.12) видно, що значення густини потоку потужності зменшується в середовищі за експоненціальним законом.

Для вакууму $\varepsilon'' = 0,\ \varepsilon = \varepsilon' = 1,\quad \varepsilon = \varepsilon' = 1,\ \mu'' = 0,\ \mu'' = 0,\ \mu = \mu' = 1,\ \mu = \mu' = 1,$ $tg\Delta_1 = 0,\ k'' = 0,\ k = k' = \omega\sqrt{\mu\varepsilon},\ Z = \sqrt{\mu/\varepsilon},$ і рівняння (2.9–2.10) набудуть вигляду:

$$\vec{H} = H_0 e^{-jkr}, \tag{2.13}$$

$$\vec{E} = E_0 e^{-jkr}, \tag{2.14}$$

де k – хвильове число для вакууму, яке визначається з виразів (2.13–2.14).

При падінні на межу розділу двох середовищ хвиля частково відбивається, а частково продовжує розповсюджуватися в новому середовищі, змінюючи напрям.

Коефіцієнти відбиття K_r і пропускання K_t:

$$K_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \tag{2.15}$$

$$K_t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \tag{2.16}$$

де Z_1 *і* Z_2– хвильові опори на границях середовищ.

Якщо середовища узгоджені, то $K_r = 0,\ K_t = 1,$ тобто відбиття відсутнє.

Найбільш складною задачею є визначення діелектричних і магнітних проникностей композиційних матеріалів, які не є довідковими значеннями і відсутні у літературних джерелах. Для проєктування композиційних матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань доцільно оцінювати ці параметри за кількома співвідношеннями [107].

Ефективну діелектричну проникність можна оцінити, виходячи зі співвідношення Максвела-Гарнета:

$$\frac{\varepsilon_к - \varepsilon_м}{\varepsilon_к + 2\varepsilon_м} = V_н \frac{\varepsilon_н - \varepsilon_м}{\varepsilon_н + 2\varepsilon_м}\ , \tag{2.17}$$

де $\varepsilon_к$, $\varepsilon_м$, $\varepsilon_н$ – відповідно діелектричні проникності композиту, матриці та наповнювача. Співвідношення дає прийнятні результати за $V_н < 1/3$.

Для визначення критичного вмісту наповнювача, за якого різко зростає провідність матеріалу, доцільно скористатися формулою Оделевського:

$$\varepsilon_к = \varepsilon_м \left[1 + \frac{V_н \left(\varepsilon_н - \varepsilon_м \right)}{\left(1 - V_н / V_к \right) F \left(\varepsilon_н - \varepsilon_м \right) + \varepsilon_м} \right], \tag{2.18}$$

де $V_к$ – критична об’ємна концентрація наповнювача, за якої екрануючі частинки контактують між собою,

F – коефіцієнт деполяризації.

Коефіцієнт деполяризації враховує форму частинок наповнювача (співвідношення довжини і середнього діаметра). Він може бути визначений зі співвідношення [108]:

$$F = \ln\left(\frac{2l}{d}\right) \Big/ \left(\frac{1}{d}\right)^2, \tag{2.19}$$

де l – довжина частинки,

d – діаметр.

У цьому випадку критична об’ємна концентрація наповнювача визначається як:

$$V_к = \frac{\left[3F(1-F)\right]^{0,6}}{\left[4F\sqrt{\frac{l}{d}} + \frac{1-F}{\sqrt{\frac{l}{d}}}\right]^{0,6}}. \tag{2.20}$$

Магнітна проникність для малих концентрацій наповнювача до 0,3 за об’ємом визначається за формулою Лорентца:

$$\mu_к = 1 + \frac{V_н(\mu_н - 1)}{1 + \frac{1 - \upsilon_н(\mu_н - 1)}{3}}, \tag{2.21}$$

де $V_н$ – відносна об’ємна частина наповнювача у матеріалі.

Якщо магнітні проникності мають відносно низькі значення, наприклад для феритів, найбільш прийнятною є формула Максвела:

$$\mu_к = 1 + \frac{3V_н(\mu_н - 1)}{\mu_н + 2} \ . \qquad (2.22)$$

За великих концентрацій наповнювача більше 0,3 за об'ємом ефективна діелектрична проникність доцільно користуватися формулою Бругемана [109]:

$$\sum_{i=1}^{N} \vartheta_{m_i} \frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_i}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_{eff}} = 0 \qquad (2.23)$$

Важливим показником ефективності екрана є еквівалентна глибина проникнення високочастотного поля у екран:

Для електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот еквівалентна глибина проникнення δ визначається як:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}} \ , \qquad (2.24)$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність,

$\mu_a = \mu_0 \mu$

Еквівалентна глибина проникнення – це відстань від поверхні екрана, на якій поле зменшується у е разів (2,7 раз або 8,7 дБ за потужністю)

Слід враховувати, що співвідношення (2.17), (2.18), (2.21), (2.22) є емпіричними. Тому, визначення діелектричної магнітної проникності є оціночним.

2.2. Особливості визначення захисних властивостей коефіцієнтів екранування захисних матеріалів для екранування електромагнітних полів

Головною особливістю вимірювань ефективності екранування у лабораторних умовах є забезпечення неможливості проникнення електромагнітного випромінювання поза екраном через щілини або внаслідок дифракційних явищ. Для частот, нижче 2 ГГц вимірювання здійснювалися у замкнених екрануючих структурах 0,2×0,2×0,2 м.

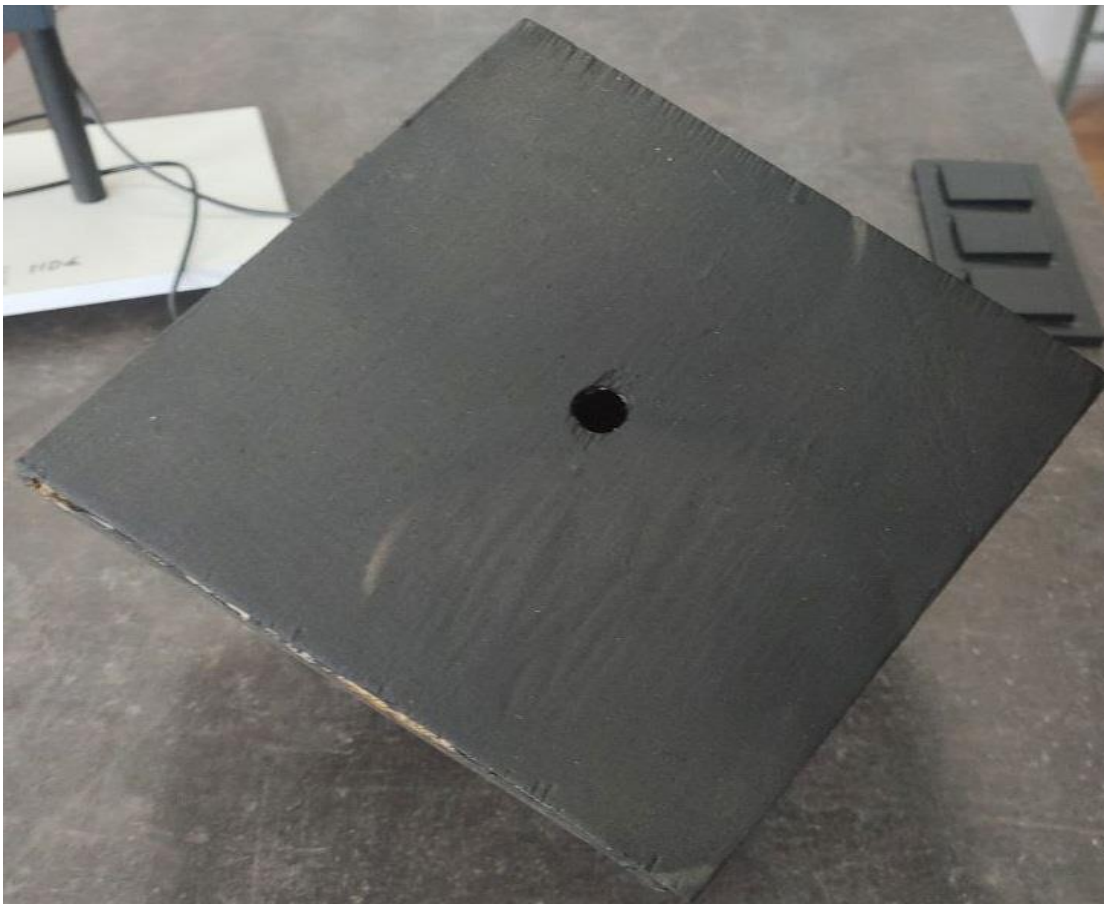


Рис. 2.1. Експериментальний стенд для оцінки ефективності екранування електромагнітних полів наднизької частоти

Вимірювальна антена вміщувалася усередину конструкції і під’єднувалася до вимірювального приладу крізь технологічний отвір. Вимірювання ефективності

екранування на частотах вище 2ГГц здійснювалося на стенді непроникного для випромінювання з отвором для вміщення зразку (рис. 2.2). Розміри зразків складали 0,15×0,15×0,15 м.



Рис. 2.2. Фольгований стенд для вимірювання змін коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль

Коефіцієнт пропускання визначався шляхом порівняння інтенсивності електромагнітного випромінювання перед екраном і за екраном. Коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль визначався розміщенням вимірювальної антени між джерелом випромінювання і стендом за наявності зразка у отворі стенда і його відсутності. Джерелом електромагнітних випромінювань був магнетрон мікрохвильової печі та високочастотний генератор зі штирьовою антеною. Вимірювання здійснювалися з використання каліброваного вимірювача напруженостей електричного магнітного поля П3-31.

Технічні характеристики наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики приладу П3-31

Характеристики		Значення
Робочий діапазон частот		
для щільності потоку енергії (ЩПЕ):	антена А1	300–40 000 МГц
для електричної складової поля (Е):	антена А4	0,03–300 МГц
для магнітної складової поля (Н):	антена А5	0,01–30 МГц
Межі виміру:		0,265–100000 мкВт/см^2
для А1		(1–615) (В/м)
для А4	в діапазоні частот від 0,03 до 0,1 МГц	4–600 В/м:
	в діапазоні частот від 0,1 до 300 МГц	2–600 В/м:
для А5	в діапазоні частот від 0,01 до 0,1 МГц	3–16 А/м
	в діапазоні частот від 0,1 до 30 МГц	0,5–16 А/м
Межі допустимої основної похибки вимірювання щільності потоку енергії та напруженості Е і Н поля визначеної частоти		2,7 дБ

У процесі вимірювань застосовувалася максимальна основна похибка, враховуючи відносно невеликі інтенсивності електромагнітних випромінювань тестових джерел та можливості часткових відбиттів випромінювань від обладнання.

Для більш точного визначення захисних властивостей матеріалів застосовувався векторний аналізатор поля (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Загальна схема установки для досліджень ефективності зразків в умовах, наближених до реальних

Для точного визначення амплітудно-частотних характеристик поглинання застосовувався:

1. Векторний аналізатор FieldFox N9916A, який містить генератор сигналу, що охоплює діапазон до 18 ГГц. Параметри вимірювання (усереднення, потужність) підбираються для забезпечення стабільності фону $< \pm 1$ дБ та фазового розкиду $< \pm 5°$ у діапазоні частот.

2. Антени типу Вівальді для прийому і передачі сигналу. Антени мають робочий діапазон частот від 2 до 18 ГГц.

3. Лінза Люнеберга застосовується для фокусування й формування вузької плями опромінення на площині зразка, що дозволяє сформувати дальнє поле випромінювання та мінімізувати вплив зовнішніх факторів. Розмір плями перевіряється експериментально за максимізацією пропускання від зразка при мікрозміщенні.

Антени типу Вівальді з’єднані з векторним аналізатором за допомогою каліброваних фазостабільних коаксіальних кабелів з низькими втратами, що

забезпечило повторюваність вимірювань. Антени та лінзи розміщуються під кутом 30 ° відносно зразка, для реалізації моностатичного відбиття (кут падіння рівний куту відбиття).

4. Зразок, що знаходиться у фокусній зоні.

5. Поглинальний матеріал для мінімізації взаємного впливу бічних променів, та відбиття від місцевих предметів.

Поглинальний матеріал має коефіцієнт поглинання не менше 30 дБ в діапазоні частот 2–18 ГГц, що дозволяє забезпечити високий рівень розв'язки між антенами. Поглинальний матеріал розміщується таким чином, щоб покрити всі можливі шляхи бічного випромінювання, що забезпечує точність вимірювань.

Так методика дозволяє досліджувати як зразки великих розмірів, так і малих. При цьому визначається коефіцієнт відбиття і коефіцієнт пропускання. Різниця цих показників характеризує поглинальні властивості матеріалу.

Висновки до розділу 2

1. Визначені основні математичні функції для прогнозування захисних властивостей матеріалів і конструкцій, що екранують електромагнітні випромінювання. Враховуючи, що розглядаються широкі частотні смуги електромагнітних випромінювань ультрависоких і надвисоких частот обов'язковим є врахування комплексного характеру діелектричних і магнітних проникностей. Ці параметри залежать від наскрізної провідності, магнітних втрат та амплітудно-частотних характеристик екранованого електромагнітного поля.

2. Необхідно враховувати, що існуючі співвідношення для оцінки електрофізичних і магнітних показників матеріалів є емпіричними. Тому, такі обчислення дають великі похибки й тільки окреслюють межі вмісту екрануючого наповнювача у діелектричних матрицях.

3. Для електромагнітних випромінювань частотами, нижчими за 2 ГГц, з відносно великою довжиною хвилі у лабораторних умовах доцільно

використовувати захисні конструкції замкненої форми. Для більш високих частот вимірювання доцільно здійснювати на стенді з отвором із забезпеченням неможливості проникнення електромагнітного випромінювання поза екраном внаслідок дифракційних явищ. Такий стенд дає можливість визначити не тільки загальний коефіцієнт екранування, а й коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль.

4. Вимірювання необхідно здійснювати з використанням каліброваного обладнання. Враховуючи відносно невеликі інтенсивності випромінювання джерел та можливість часткового відбиття випромінювань від обладнання при обробленні результатів вимірювань слід керуватися максимальною основною похибкою приладу, наданою у його технічній документації.

Основні положення розділу 2 опубліковані автором у наукових працях [2]

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ НЕОДНОРІДНИМИ МАТЕРІАЛАМИ І КОНСТРУКЦІЯМИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МАКСИМАЛЬНИХ ЕФЕКТИВНОСТЕЙ

3.1. Дослідження захисних властивостей будівельних матеріалів з регулярними феромагнітними неоднорідностями

Найбільш поширеною неоднорідністю у конструкційних матеріалах є сталева арматура з різним кроком її розташування. Фактично таку структуру можна розглядати як електромагнітний кристал. Головною його особливістю є наявність у ньому абсолютно забороненої зони (смуги не прозорості). Існування такої зони означає, що електромагнітне випромінювання певної довжини хвилі не може розповсюджуватися у даній структурі. Для кроку розташування регулярної провідної структури 0,1 м амплітудно-частотні характеристики коефіцієнта пропускання електромагнітного випромінювання наведені на рис. 3.1. Для узагальнення результатів амплітудно-частотні характеристики наведені у значеннях хвильового числа K (частотні характеристики) і амплітуди випромінювання a (амплітудні характеристики). Коефіцієнт 2π характеризує зв'язок частоти і колової частоти у стандартному хвильовому рівнянні.

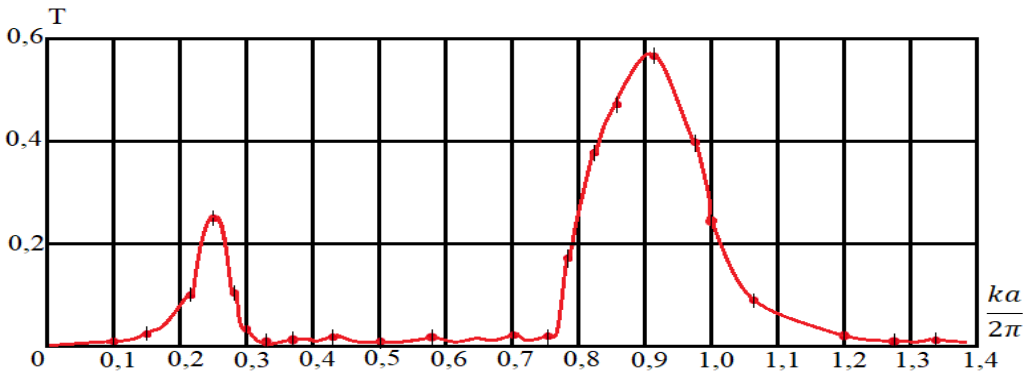


Рис. 3.1. Амплітудно-частотна залежність коефіцієнта пропускання електромагнітної хвилі (T) конструкції з одним рядом металевих стрижнів

Отриманий результат прийнятно узгоджується з розрахунками коефіцієнтів відбиття регулярної структури *R*. Якщо смуги пропускання матеріалу дорівнюють приблизно 0,23–0,28 та 0,75–1,10, то смуги ефективного відбиття становлять відповідно 0,2–0,3 та 0,8–1,0. Деякі розбіжності обумовлені обмеженими розмірами зразків у процесі вимірювання коефіцієнтів пропускання та складністю врахування ефективного перерізу металевої арматури у розрахунках.

Було проведено дослідження залежності коефіцієнта пропускання регулярної структури від кількості фронтальних шарів арматури у глибину матеріалу. Встановлено, що при кількості шарів 4–5 досягається максимальне зниження коефіцієнта пропускання, тому подальше збільшення кількості шарів є недоцільним (рис. 3.2).

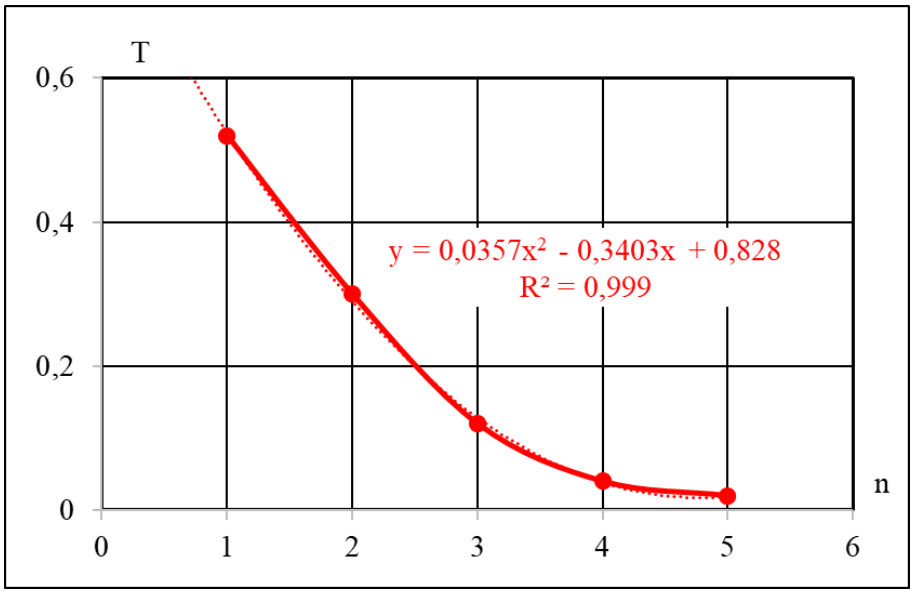


Рис. 3.2. Залежність коефіцієнта пропускання регулярної структури (T) від кількості шарів (n), частота електромагнітного випромінювання 3 ГГц

Наведена залежність відповідає аналітичній функції $T=0{,}0357n^2-0{,}3403n+0{,}828$.

Для регулювання коефіцієнтів пропускання та загального екранування електромагнітного випромінювання можливий зсув шарів арматури відносно один

до одного. Таким чином підвищується густина регулярних екрануючих елементів. При цьому їх загальна кількість не змінюється й не впливає на міцність конструкції.

Наведена категорія матеріалів є магнітодіелектриками, які містять регулярні феромагнітні структури на основі заліза у діелектричній матриці. Їх захисні властивості, крім густини розташування металевих повздовжніх структур, визначаються магнітними властивостями феромагнетика – комплексною магнітною проникністю μ: $\mu=\mu_1+j\mu_2$.

При цьому слід враховувати різні значення проникності за поглинанням μ_k та за заломленням μ_n у феромагнітних стрижнях і дротах: $\mu_1=\sqrt{\mu_n\cdot\mu_k}$, $\mu_2=(\mu_k-\mu_n)/2$. Магнітні проникності феромагнетиків мають частотні залежності, що є важливим для проєктування захисних матеріалів. Тому було досліджено зміни магнітної проникності поширеної конструкційної сталі марки 45 (рис. 3.3).

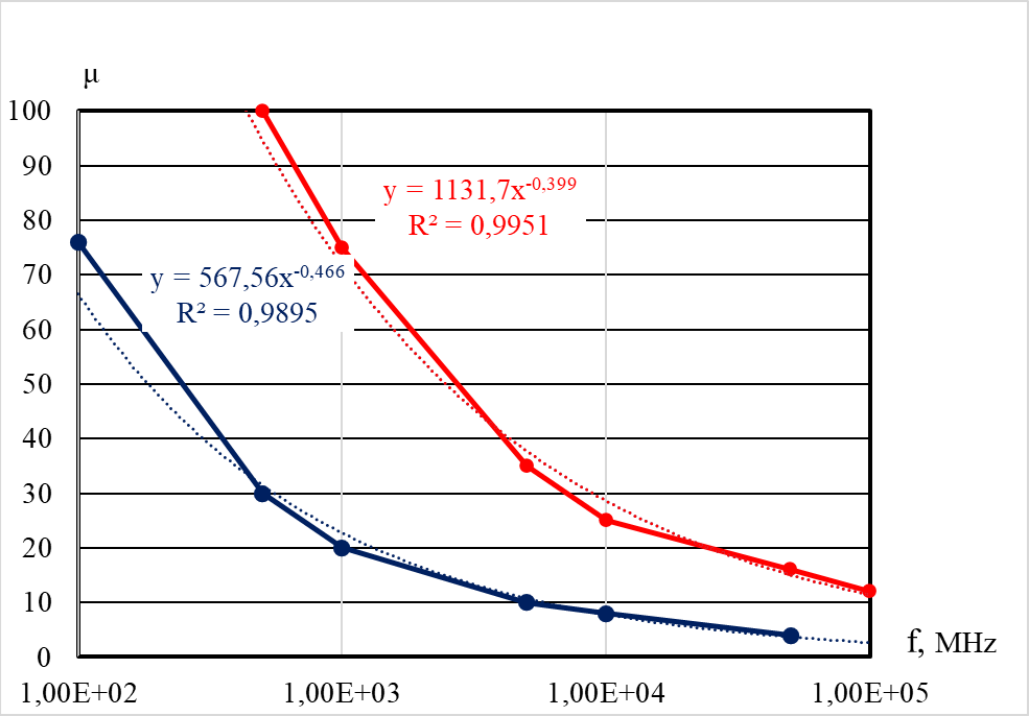


Рис. 3.3. Частотні залежності магнітної проникності за поглинанням μ_k та за заломленням μ_n конструкційної сталі марки 45: – магнітної проникності за поглинанням μ_k; – магнітної проникності за заломленням μ_n

Наведені залежності на рис. 3.3 відповідають аналітичним функціям $\mu_k=1131{,}7f^{-0{,}399}$; $\mu_n=567{,}56f^{-0{,}466}$.

Наявність таких залежностей може вносити значні похибки у реальних умовах використання конструкцій з функціями екранування електромагнітних випромінювань. Тому у процесі проєктування матеріалів і будівлі необхідно мати відомості про амплітудно-частотні характеристики електромагнітних випромінювань, які потребують екранування.

Прогнозування ефективності екранування лінійчастих металевих структур, якими є арматура, не є складним. Для цього використовується стандартне рівняння, яке описує дифракцію електромагнітних хвиль. Встановлено, що така структура стає повністю непроникною для електромагнітного випромінювання за кроку арматури у фронтальній проекції 0,1λ, де λ – мінімальна довжина падаючої довжини хвилі.

Більш складно розрахувати ефективність екранування сітчастою провідною структурою.

Пропонується розрахунок захисних властивостей металевих сітчастих регулярних структур. Коефіцієнт екранування сітки за нормального падіння електромагнітної сітки визначається співвідношенням:

$$K_s = 10\lg\frac{4\left(\frac{d}{\lambda}\ln\frac{d}{2\pi r_0}\right)^2}{1+4\left(\frac{d}{\lambda}\ln\frac{d}{2\pi r_0}\right)^2} \qquad (3.1)$$

де r_0 – радіус металевого дроту,

d – середня відстань між дротами,

λ – довжина падаючої електромагнітної хвилі.

У випадку падіння електромагнітної хвилі під деяким кутом до екрана:

$$K_r = 10\lg \frac{4\left(\frac{d\cos\varphi}{\lambda}\ln\frac{d}{2\pi r_0}\right)^2}{1+4\left(\frac{d\cos\varphi}{\lambda}\ln\frac{d}{2\pi r_0}\right)^2}, \quad (3.2)$$

$$K_s = 10\lg \frac{(1-\cos\varphi)^2 + 4\left(\frac{d}{\lambda}\ln\left(\frac{d}{2\pi r_0}\right)\right)}{1+4\left(\frac{d}{\lambda}\ln\left(\frac{d}{2\pi r_0}\right)\right)}, \quad (3.3)$$

де φ – кут між напрямком розповсюдження електромагнітної хвилі і нормаллю до поверхні екрана.

Співвідношення 3.1–3.3 враховують тільки геометричні характеристики сіток. Вважається, що матеріал сітки має високу провідність й надійний контакт у точках перетину. У реальності провідності матеріалів відрізняються. А вони використовуються для виготовлення сіток різних параметрів, обумовлених номенклатурою виробів. На сьогодні більшість сітчастих структур виготовляються зі сталі, а частина – з латуні.

У таблиці 3.1 наведено експериментальні дані щодо ефективності екранування сітчастих структур з різних матеріалів і номенклатури, що виробляється промисловістю.

Таблиця 3.1

Ефективність екранування електромагнітного випромінювання сітчастими структурами

Параметри сітки			**Частота, ГГц**			
Матеріал	**Крок комірки, мм**	**Діаметр дроту, мм**	**1**	**3**	**6**	**12**
Сталь	1,5	0,35	> 50	> 40	35–40	30–35
	3,5	0,50	> 50	20–25	20–25	15–20
	4,5	1,10	> 40	30–35	30–35	25–30
	6,5	1,40	35–40	25–30	15–20	15–20
	10,2	0,70	20–25	10–15	5–10	5–10
	15,4	1,40	20–25	10–15	4–6	5–10
	21,5	1,40	15–20	5–10	4–5	5–10
Латунь	0,17	0,17	> 50	> 50	> 50	> 50
	0,33	0,13	> 50	> 50	> 40	10–15
	0,72	0,22	> 50	> 40	> 40	35–40
	1,35	0,35	> 40	> 40	> 40	35–40
	2,50	0,50	> 40	35–40	30–35	25–30
	3,10	0,50	> 40	30–35	25–30	20–25

Не дивлячись на певні проміжки, присутні у даних щодо ефективності екранування, вони обумовлені, в основному похибками вимірювань. Певні розбіжності даних також можуть бути обумовлені недостатніми контактами, окисленням дротів тощо. Тому такі конструкції не можна вважати широкосмуговими. Нижче певної довжини хвилі вони є абсолютно прозорими, а вище – непрозорими.

Користуватися таблицею 3.1 не зовсім зручно. Тому необхідно певним чином

узагальнити дані щодо співвідношення частоти випромінювання (довжини хвилі, довжини дроту й розмірів комірок сітчастої структури). Це можливо, виходячи з даних наведених у таблиці. Узагальнені співвідношення сіток для сталі наведені на рис. 3.4.

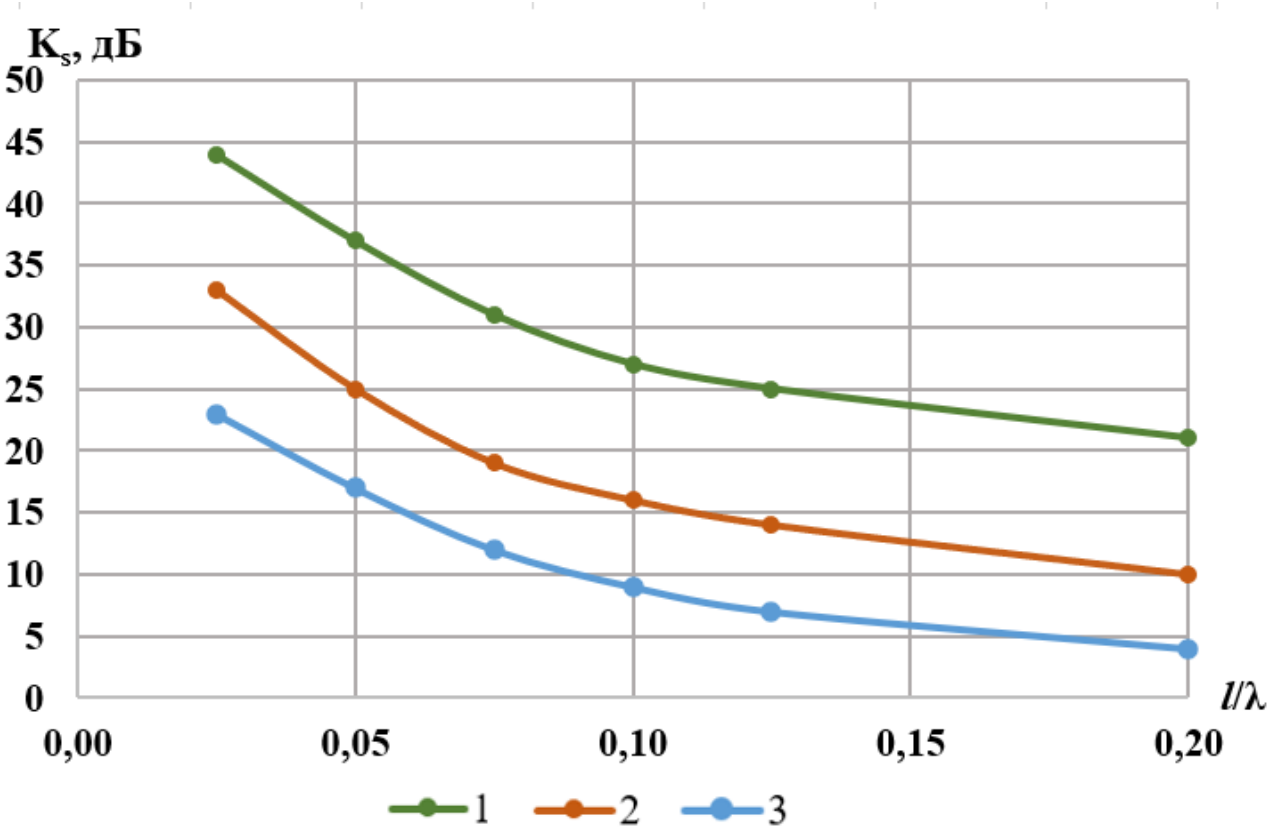


Рис. 3.4 Залежність ефективності екранування сітчастої структури від довжини хвилі екранованого електромагнітного випромінювання, діаметру дроту *d* та розміру комірки; *1, 2, 3* відповідають співвідношенням *l/d=2; 5; 10*, *l* – відстань між осями дротів

Такий графічний матеріал дає можливість попередньо оцінити захисні властивості сітчастих структур й обрати найбільш раціональний матеріал.

Як зазначалося вище, недоліком таких структур є монохромність поглинання, тобто розрахованість на електромагнітне випромінювання певної частоти або вузької смуги частот. Вони, в основному, використовуються для екранування електромагнітних випромінювань певного джерела, наприклад

радіоелектронного обладнання цивільної авіації. У реальних умовах спектри електромагнітних полів та випромінювань достатньо широкі. Для подолання цього недоліку доцільно застосувати дві сітчасті регулярні структури, розташовані паралельно. Одна з них розраховується, виходячи з мінімально можливої довжини хвилі, друга – максимально можливої. Ці довжини хвиль визначаються або з технічної документації потенційних джерел електромагнітних полів, або експериментально. Такий підхід робить конструкцію широкосмуговою. Доцільно розглянути також можливість підвищення ефективності конструкції певним зсувом однієї сітки відносно іншої.

Найбільш привабливим способом забезпечення екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону є екранування полів будівельними матеріалами. Але будь-які екрануючі домішки до сировини змінюють міцнісні характеристики будівельних матеріалів (пружні модулі), що небажано, принаймні для стінових конструкцій та перекриттів. Тому для забезпечення захисних властивостей будівельних матеріалів екрануючий матеріал доцільно вмішувати у існуючі порожнини, як конструктивно закладені у цеглу, шлакоблоки, панелі тощо. Такі матеріали використовуються у великих обсягах, тому екрануючі добавки повинні мати мінімально можливу вартість. Зазвичай, високі коефіцієнти екранування непотрібні, тому для визначених цілей доцільно використовувати відходи або побічні продукти виробництва. Попередні дослідження показали, що коефіцієнти екранування електромагнітних полів на рівні 2,0–2,5 може забезпечити сажа, яка у великих обсягах утворюється на теплових електростанціях. Для екранування стаціонарних та квазістаціонарних магнітних полів доцільно використовувати залізорудний концентрат, який у великих обсягах виробляється на гірничо-збагачувальних комбінатах України. Найбільш перспективним напрямом отримання високих коефіцієнтів екранування електромагнітних полів наднизької частоти (промислової) та ультрависоких і вищих частот є використання порожнин піно- та газобетону для розміщення екрануючих матеріалів. Виходячи з теоретичних міркувань, можна передбачити,

що доданий у вихідну бетонну суміш залізорудний концентрат у процесі піноутворення буде осідати на внутрішніх поверхнях порожнин піно- та газобетону. Відомі експерименти з пінолатексом показали, що додавання пилу із вмістом дрібнодисперсної залізної руди, отриманого в процесі подрібнення руди, навіть за товщини матеріалу 10 мм забезпечує коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти до 38, електромагнітного поля ультра високої частоти – до 52 (вміст екрануючого матеріалу – до 20 % за масою).

3.2. Дослідження захисних властивостей регулярних структур на основі провідних матеріалів

Для екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот головним фактором є провідність екрануючого матеріалу. За використання регулярних структур коефіцієнти екранування обумовлюються дифракційними явищами. Крім сіток, це перфоровані структури, виготовлені з будь-якого провідного матеріалу.

Значна частина будівельних матеріалів, особливо тих, що використовуються для оздоблювальних робіт є перфорованими. Використовується велика кількість перетинок перфорованої структури. Такі матеріали можливо застосовувати для цілей електромагнітної безпеки. Існують кілька простих співвідношень для визначення ефективності екранування електромагнітних полів матеріалами з отворами. Вони вважаються емпіричним і не мають широкого застосування. Але прості у застосуванні співвідношення можна строго отримати з теорії хвилеводів. Причому це можливо з будь-якою точністю у залежності від потреб.

Для цього треба застосовувати хвильове рівняння для вектора Герца:

$$\frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial z^2} + R^2 \Pi_z = 0, \tag{3.4}$$

або

$$\frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z}{\partial y^2} + (k^2 - h^2) \cdot \Pi = 0, \tag{3.5}$$

де $\Pi = c \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$ (хвильовий вектор Герца),

k – хвильове число,

h – повздовжнє хвильове число, яке характеризує розповсюдження хвилі уздовж осі Z,

m, n – натуральні коефіцієнти,

a, b – ширина і довжина хвилеводу.

Наявність можливості розкладання функції П у ряд забезпечує необхідну точність обчислень.

Будь-який отвір можна вважати хвилеводом малої довжини, тому відповідні розрахунки є коректними. Розв'язуючи хвильове рівняння, обирається співвідношення k та h, яке відповідає найбільшій довжині хвилі, яка проникає крізь отвір. Таку довжину можна визначити як критичну. Для прямокутного отвору:

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}}}, \tag{3.6}$$

для круглого отвору

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi r}{1,84} = 3,4r, \tag{3.7}$$

де r – радіус отвору.

Такі отвори є непроникними для електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda_{кр}$.

У практичному застосуванні зручніше користуватися критичною частотою, так званою «частотою зрізу».

Для прямокутного отвору:

$$f_з = \frac{1,5 \cdot 10^8}{b}, \text{ Гц} \tag{3.8}$$

де b – найбільший розмір прямокутного отвору.

Для круглого отвору:

$$f_з = \frac{1,75 \cdot 10^8}{Д}, \text{ Гц} \tag{3.9}$$

де $Д$ – діаметр отвору.

Тоді, застосовуючи стандартні визначення ефективності поглинання електромагнітних хвиль A, отримуємо для прямокутного отвору:

$$A = 27,3 \frac{l}{b}, \text{ дБ} \tag{3.10}$$

для круглого отвору:

$$A = 32 \frac{l}{Д}, \text{ дБ} \tag{3.11}$$

де l – товщина стінки екрана.

Для розрахунку втрат на поглинання зони з отвором (апертурою), обирається частота, яка за наближеними співвідношеннями нижча за $f_з$.

З наведених співвідношень можна зробити висновок, що для підвищення ослаблення поля необхідно збільшувати глибину апертури l.

Втрати на відбиття у загальному випадку визначаються зі співвідношення:

$$R = 100 - 20\lg(bf) + 20\lg\left(1 + \ln\frac{b}{a}\right), \text{ дБ} \qquad (3.12)$$

де b – ширина отвору,

a – висота отвору,

f – частота випромінювання.

Відповідно до круглого отвору втрати на відбиття розраховуються зі співвідношення:

$$R = 102 - 20\lg(df), \text{ дБ} \qquad (3.13)$$

де d –діаметр отвору.

Кількість отворів (щільність розташування) враховується співвідношенням:

$$K_n = 10\lg(Sn). \text{ дБ} \qquad (3.14)$$

де S – площа одного отвору,

n – кількість отворів на одиницю площі.

Добуток *Sn* надає частку площі отворів на одиницю площі екрана у відносних одиницях. Тобто, коефіцієнт K_n має від'ємне значення ($Sn < 1$). Фізичне тлумачення цього факту полягає у тому, що ефективність екранування знижується зі збільшенням загальної площі отворів.

Було розглянуто суто геометричні критерії ефективності екранування неоднорідних провідних структур.

У подальшому доцільно визначити ефективності екранування неоднорідних структур з урахуванням електрофізичних властивостей матеріалів з яких вони виготовлені.

Врахування наявності отворів у екрануючій конструкції доцільне для частот, нижчих за частоту «зрізу», тобто для електромагнітних хвиль, для яких екран непроникний. При цьому розглядається дальня зона електромагнітного поля. Частоти зрізу строго розраховуються, виходячи з теорії хвилеводів, що було показано вище.

Для прямокутного отвору:

$f_3 = 1{,}5 \cdot 10^8 / b$ Гц,

де b – більший розмір отвору.

Для отвору круглої форми

$f_3 = 1{,}75 \cdot 10^8 / D$ Гц,

де D – діаметр отвору.

При цьому втрати на поглинання для частот, нижчих за $f_з$ приблизно дорівнюють:

Для прямокутного отвору:

$$A = 27\frac{d}{b},\ \text{дБ} \tag{3.15}$$

де d – товщина стінки екрануючої конструкції;

Для круглого отвору

$$A = 32\frac{d}{D},\ \text{дБ} \tag{3.16}$$

Обов’язковим є врахування відбиття електромагнітних хвиль R.

Для круглого отвору:

$$R = 102 - 20\lg(Df),\ \text{дБ}, \tag{3.17}$$

Для прямокутного отвору:

$$R = 100 - 20\lg(bf) + 20\lg\left(1 + \ln\frac{b}{a}\right),\ \text{дБ}, \tag{3.18}$$

де b, a – ширина та висота прямокутного отвору.

Але можна передбачити, що проходженню електромагнітної хвилі крізь хвилевод притаманні резонансні явища. Наприклад, при випробуванні пласкої гетерогенної структури (композиту) хвилеводним методом спостерігалися резонансні явища, притаманні самій хвилеводній системі (рис. 3.5).

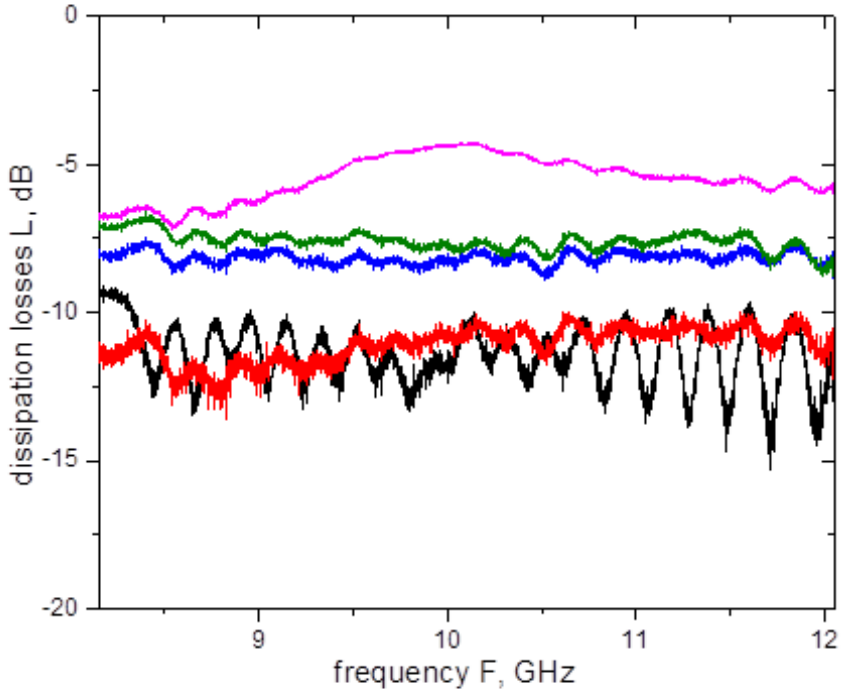


Рис. 3.5 Періодичні зміни ефективності екранування, обумовлені резонансними явищами

При цьому, для матеріалів малої товщини (до 0,5 мм) можливі резонансні поглинання у самому матеріалі, що призводить до різкого зниження коефіцієнта відбиття.

Це обумовлює те, що хвилевод стає понадмежним за умови:

$$m\lambda / 2a \succ \sqrt{\varepsilon},$$

де ε – діелектрична проникність середовища,

a – висота хвилевода, λ – довжина електромагнітної хвилі,

m – натуральне число.

Саме різним значенням m відповідають коливання інтенсивності випромінювання.

Це явище було виявлено у роботі [54], але потребує більш глибокого дослідження з використанням сучасної вимірювальної температури.

Для визначення можливих вікон прозорості електромагнітного екрана з отвором на певних частотах були проведені випробування кількох конструкцій з отворами.

Досліджувалися замкнені металеві конструкції, що виключало проникнення електромагнітного поля поза екраном. На рис. 3.6 наведено залежність коефіцієнта екранування конструкції зі щілиною розміром 15×5 см від частоти екранованого поля.

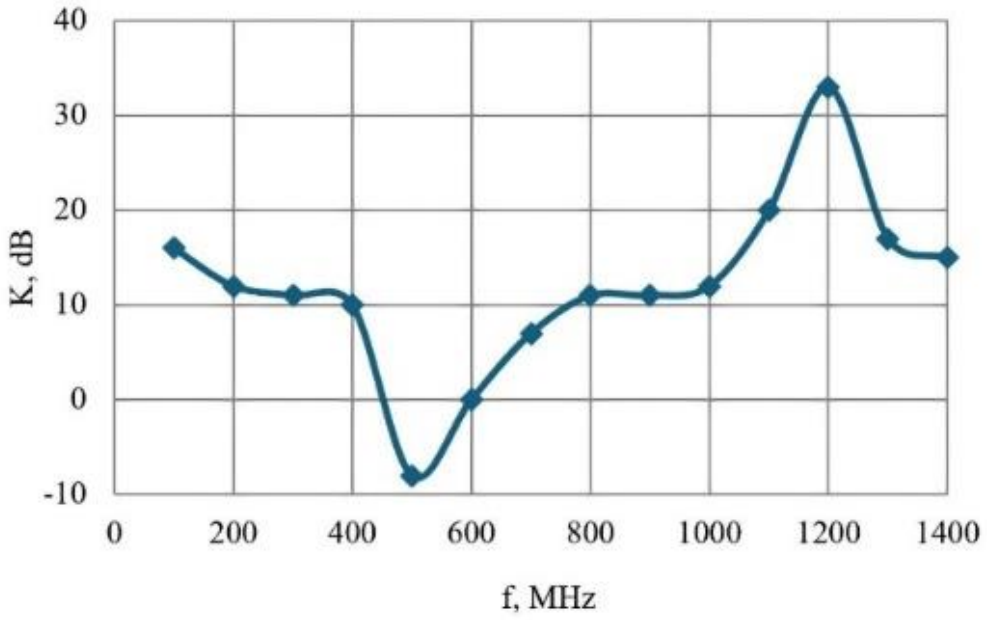


Рис 3.6. Залежність коефіцієнта екранування металевої конструкції з отвором розміром 15×5 см від частоти екранованого електромагнітного поля.

Як видно з наведених даних, конструкція є радіопрозорою на частоті приблизно 400–600 МГц.

Аналогічні дослідження проведені для отвору розміром 10×1 см.

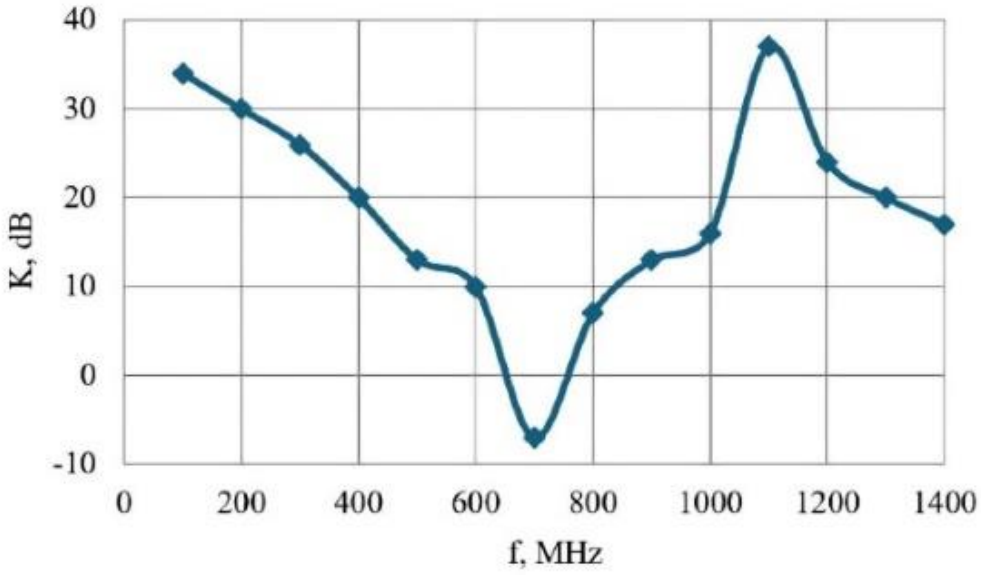


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнта екранування металевої конструкції з отвором розміром 10×1 см від частоти екранованого електромагнітного поля.

На рис. 3.8 наведено результати випробувань конструкції з отвором розмірами 20×3 см.

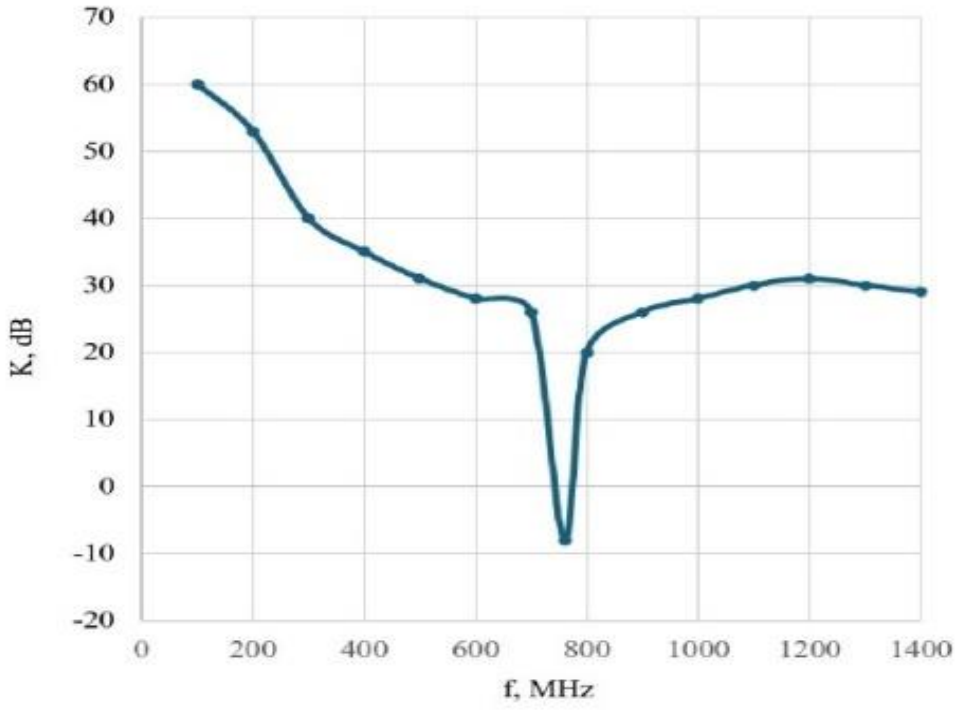


Рис. 3.8. Результати випробувань конструкції з отвором розмірами 20×3 см.

Аналізуючи отримані дані, що за різних розмірів отворів спостерігаються частотні смуги прозорості конструкції для електромагнітного поля. Це, очевидно пов’язане з резонансними явищами. Визначити строгу залежність смуги пропускання електромагнітних хвиль у залежності від розмірів отвору складно й недоцільно. Значною мірою цей показник залежить від товщини матеріалу, яку можна вважати довжиною хвилевода. Найбільш раціональним є попередні випробування конструкції з урахуванням амплітудно-частотних характеристик електромагнітного випромінювання, яке потребує екранування. Ефективність екранування електромагнітного поля може знижуватися внаслідок проникнення поля безпосередньо крізь екрануючий матеріал. При цьому цей показник істотно залежить від частоти поля. Підвищення частоти знижує проникність поля у провідний матеріал, тобто зменшується товщина скін-шару.

Для регулярно розташованих отворів поправочний коефіцієнт на проникнення поля через матеріал між отворами можна визначити з емпіричного співвідношення:

$$K = -20\lg\left(1+35p^{-2,3}\right), \text{ дБ} \tag{3.19}$$

$$p = \frac{l}{\delta}, \tag{3.20}$$

де l – довжина матеріалу між отворами,

δ – товщина скін-шару.

Товщина скін-шару (глибина проникнення поля у матеріал) визначається співвідношенням:

$$\delta = \frac{c}{2\pi\sqrt{\sigma f}}, \tag{3.21}$$

де с – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль,

σ – питома провідність матеріалу екрана.

Таким чином, поправочний коефіцієнт визначається як:

$$K = -20\lg\left(1+35\left(\frac{2\pi l\sqrt{\sigma f}}{c}\right)^{-2,3}\right), \text{дБ} \qquad (3.22)$$

Наведені співвідношення є емпіричними, тому їх застосування доцільне для попереднього оцінювання ефективності екранування з урахуванням амплітудно-частотних характеристик екранованого поля. Слід врахувати, що вони виконуються тільки для дальньої зони електромагнітного поля.

У процесі проєктування захисної конструкції можуть виникнути додаткові проблеми, наприклад, вплив великої кількості регулярно розташованих отворів для забезпечення вентиляції та охолодження обладнання. Тому для забезпечення нормативних умов перебування людей та забезпечення стабільної роботи електронного обладнання необхідне випробування дослідного зразка екрануючого матеріалу або конструкції у реальних умовах експлуатації. Враховуючи, що для перфорованих захисних конструкцій можливо застосувати теорію хвилеводів, перспективним напрямом досліджень є визначення можливості розроблення конструкцій з певною формою отворів, яка збільшить довжину хвилевода. Такі конструкції сприятимуть підвищенню ефективності екранування без зниження сумарного перерізу отворів.

Але, такі роботи слід виконувати на стадіях проєктування облицювальних матеріалів і структур з урахуванням амплітудно-частотних характеристик електромагнітного випромінювання, яке потребує екранування та необхідних коефіцієнтів екранування.

3.3. Дослідження захисних властивостей неоднорідних діелектричних будівельних матеріалів

В останні роки в усьому світі набули поширення конструкції, у яких у якості арматури використовуються неметалеві матеріали. Здебільшого це базальтові волокна різної товщини. При малих товщинах базальтових волокон – 0,1–0,3 мм, вони використовуються у вигляді сітки, при більших товщинах – у вигляді лінійних регулярних структур різного кроку розташування. В'яжучими речовинами є епоксидні смоли та бетонні розчини різного складу. Такі композиції є повністю діелектричними.

Діелектричні властивості компонентів композицій визначаються комплексними діелектричними проникностями $\varepsilon=\varepsilon_1+j\varepsilon_2$.

Зниження рівня електромагнітного випромінювання відбувається за рахунок заломлення електромагнітних хвиль n та поглинання *k*. Вони зв'язані між собою співвідношенням:

$$n^2 - k + 2jnk = \varepsilon, \tag{3.23}$$

n – коефіцієнт заломлення електромагнітних хвиль у матеріалі;

k – коефіцієнт поглинання середовища – швидкість згасання хвилі при її розповсюджені у матеріалі.

У загальному випадку, виходячи зі співвідношень електродинаміки суцільних середовищ, коефіцієнти заломлення і поглинання визначаються як:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}}{2}}, \tag{3.24}$$

$$k = \sqrt{\frac{-\varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}}{2}}. \qquad (3.25)$$

Згасання електромагнітної хвилі у немагнітних матеріалах відбувається за рахунок наявності провідних властивостей. Базальтові волокна і цементобетони є ефективними діелектриками. Тому очікувати екрануючого ефекту їх композиціями можна тільки за рахунок заломлення електромагнітних хвиль.

Коефіцієнти заломлення для базальтів і цементобетонів суттєво відрізняються через різні ефективні діелектричні проникності. Для базальтових волокон і стрижнів діелектричні проникності у діапазоні ультрависоких частот дорівнюють 2,65–3,15; для цементобетонів – 6,0–10,0.

Було досліджено вплив наявності границь розділу композиції на основі сітчастої базальтової структури у цементобетонній матриці (рис. 3.9).

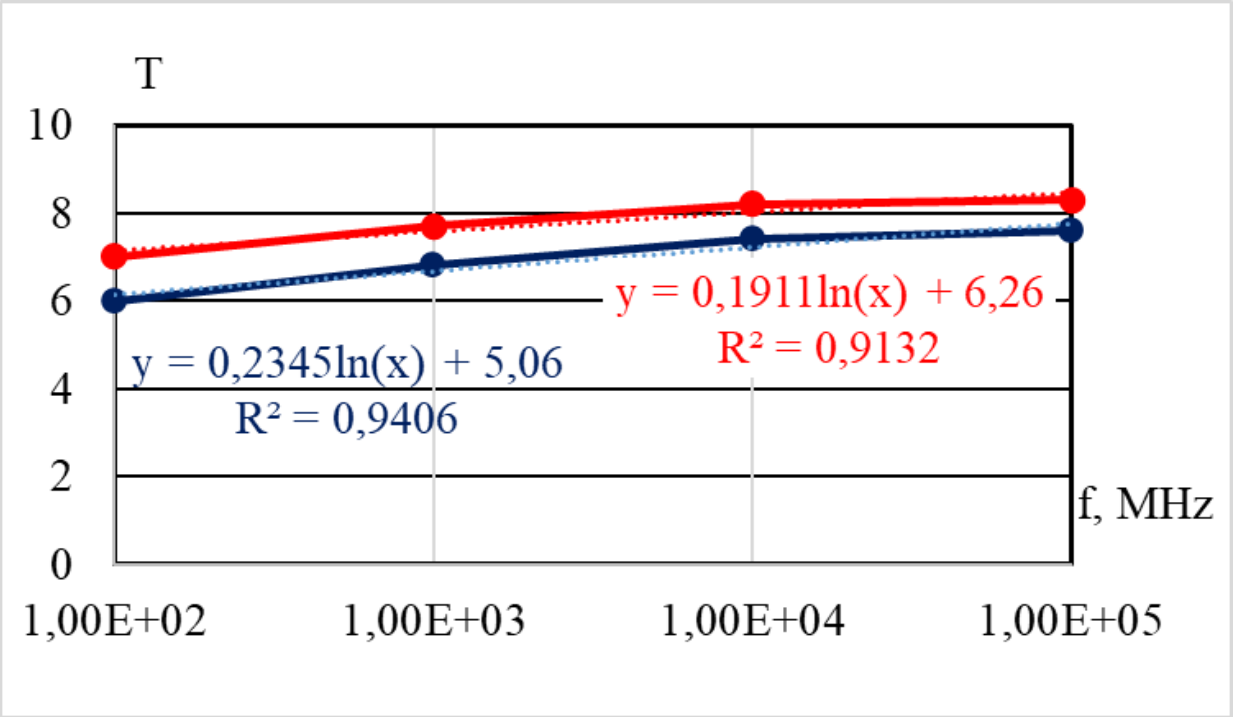


Рис. 3.9. Частотна залежність коефіцієнтів пропускання (*T*) електромагнітного випромінювання діелектричними матеріалами: – суцільний цементобетон; – сітчаста базальтова структура у цементобетонній матриці

Наведені залежності на рис. 3.3 відповідають аналітичним функціям T=0,1911ln(f)+6,26 для суцільного цементобетону; T=0,2345ln(f)+5,06 для сітчастої базальтової структури у цементобетонній матриці.

Як видно з результатів, наведених на рис. 3.9, вплив регулярної структури з відмінною від матеріалу матриці діелектричною проникністю суттєво не впливає на коефіцієнт пропускання електромагнітних хвиль. Тому таку конструкцію не можна вважати засобом підвищення екрануючих властивостей конструкційних та облицювальних матеріалів.

Для провідних матеріалів уявна складова комплексної діелектричної проникності велика у порівнянні з дійсною складовою:

$$\varepsilon_2 = \frac{4\pi\sigma}{\omega}, \tag{3.26}$$

де σ – питома провідність матеріалу;

ω – колова частота електромагнітного випромінювання.

Нехтуючи у рівняннях (3.24), (3.25) ε_1 порівняно з ε_2 отримуємо:

$$n = k = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\omega}}. \tag{3.27}$$

Тобто, надаючи матеріалу провідних властивостей можливо різко підвищити коефіцієнти екранування електромагнітних випромінювань. Одним зі шляхів підвищення ефективності екранування композиції на основі цементобетонів та базальтової арматури є нанесення на поверхню базальту металевої провідної субстанції. Пошуки таких можливостей мають сенс через те, що поверхневе покриття базальту може значно розширити застосування бетонно-базальтових композицій різного призначення.

Відомо, що обмеження застосування базальтової арматури у цементобетонах обумовлене частковим руйнуванням базальту лужними складовими цементобетонів [110]. Тому при наданні базальтовим волокнам провідних властивостей, нанесенням на них відповідного металевого напилення, одночасно відбувається захист арматури від хімічного впливу. Але така робота потребує проведення ґрунтовних теоретичних та експериментальних досліджень.

3.4. Дослідження захисних властивостей пласких неоднорідних облицювальних матеріалів

Як зазначалося у розділі 1.3 головними недоліками пласких композиційних матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань є складність технології виготовлення, що обумовлює їх високу вартість, а також висока вартість компонентів. Дослідження свідчать, що такі матеріали, особливо малої товщини мають захисні властивості у вузьких смугах, що обумовлено резонансими явищами (рис. 3.10).

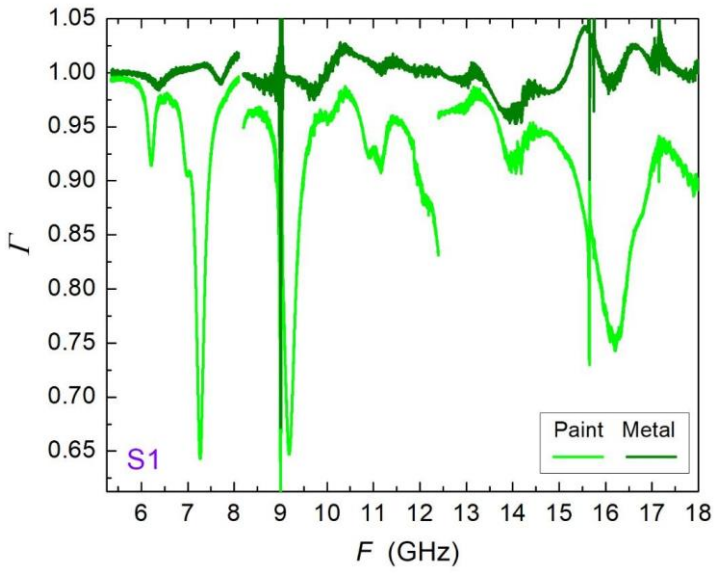


Рис. 3.10. Залежність коефіцієнта відбиття від частоти екранованого електромагнітного випромінювання, – підкладинка, – покриття

При цьому найбільш вагомим недоліком таких матеріалів є непередбачуваність зон зниження відбиття (рис. 3.11).

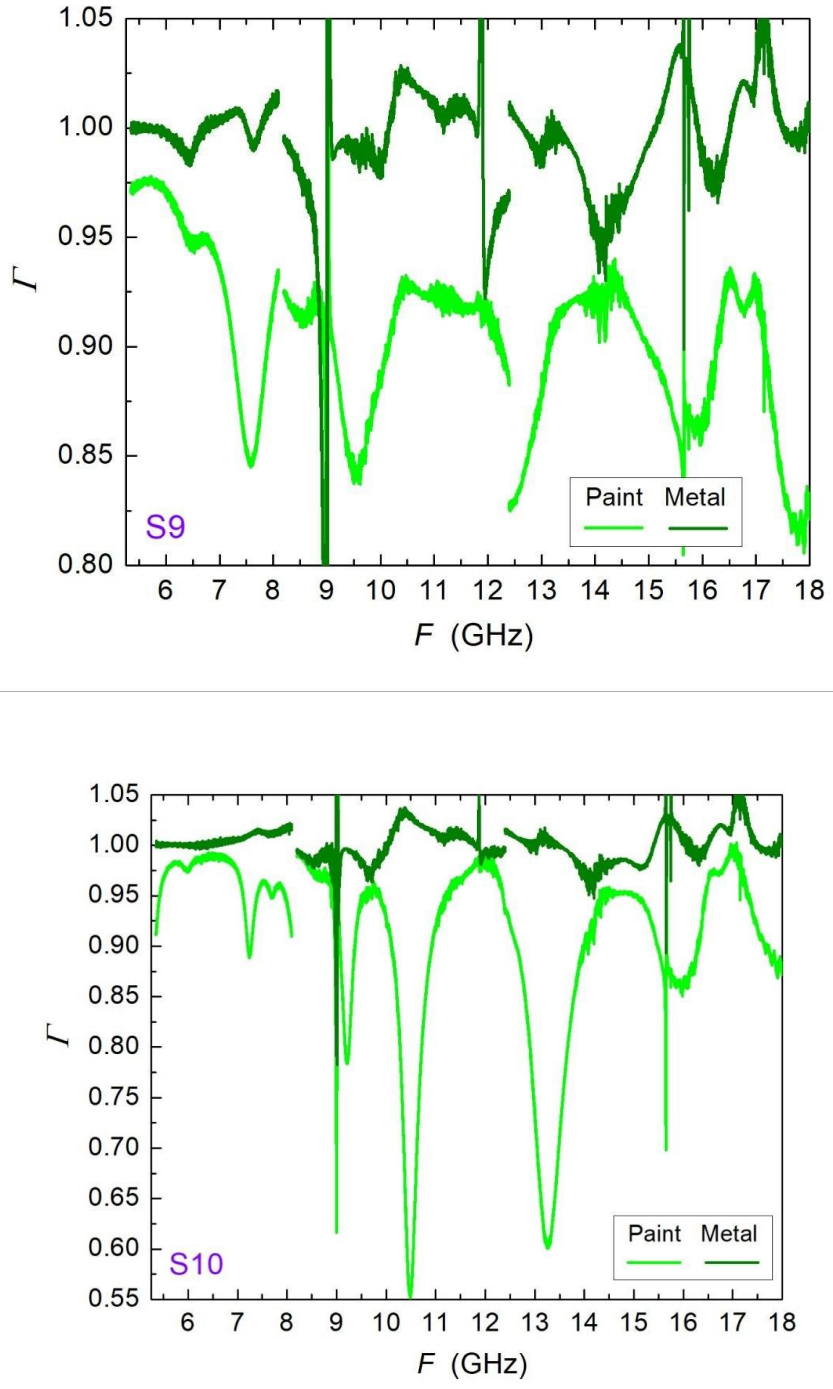


Рис. 3.11. Частотна залежність коефіцієнта відбиття тонких композиційних матеріалів різних складів

Передбачення таких піків і співвідношення поглинальних і відбивальних властивостей практично неможливе. Швидше за все це обумовлено значними розбіжностями значень уявних і дійсних складових діелектричних і магнітних властивостей композиційних матеріалів (рис. 3.12).

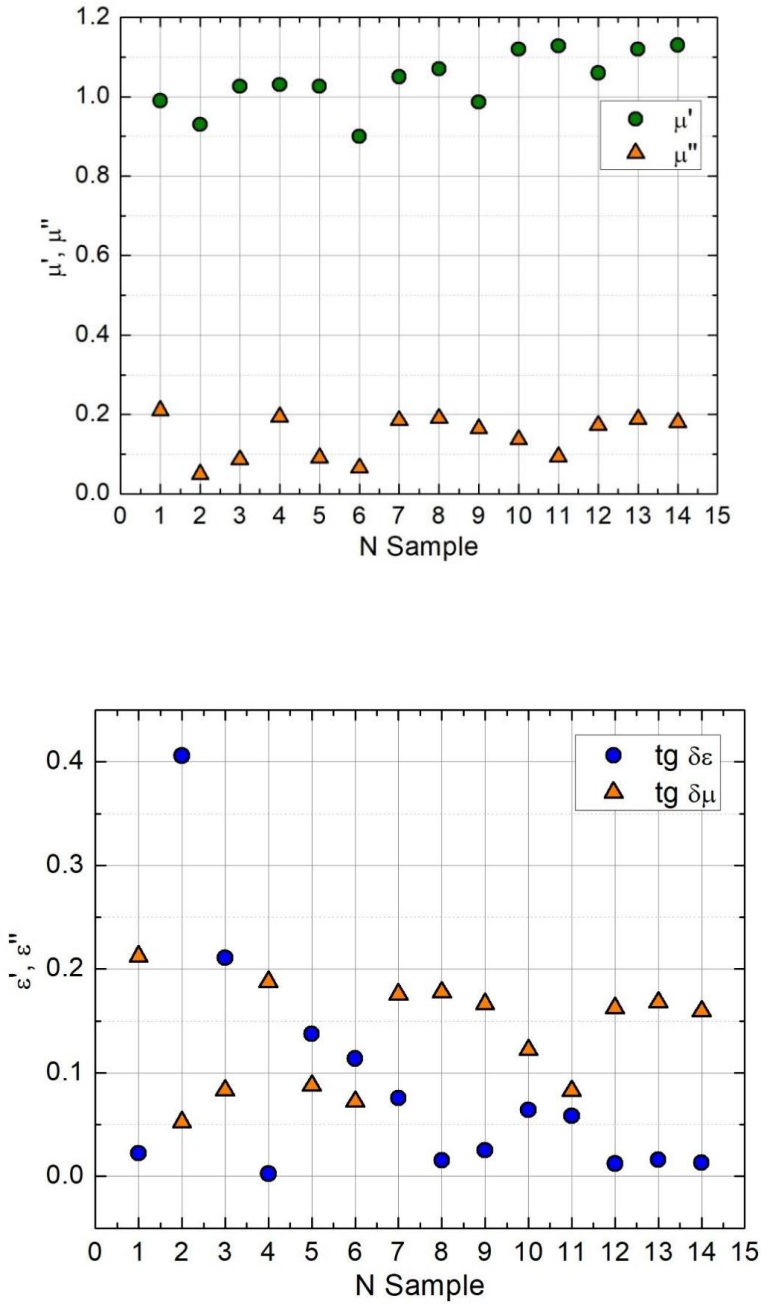


Рис. 3.12. Значення діелектричних і магнітних властивостей композиційних матеріалів за різного вмісту провідних та магнітних компонентів.

Дані, наведені на рис. 3.12 свідчать, що навіть за виготовлення великої кількості зразків різних складів балансувати значення дійсних і уявних складових діелектричної і магнітної проникності практично неможливо. Це призводить до збільшення коефіцієнта поглинання тільки у вузьких смугах частот виключно за рахунок резонансних явищ й непередбачуваним чином. При цьому зазвичай компоненти наповнювачів мають велику вартість. Особливо це стосується випадків, коли потрібно підвищувати дисперсність компонентів. Тому при обиранні наповнювачів доцільно керуватися матеріалами промислового виробництва відомих дисперсностей, закладених при виготовлені.

Крім того, багатокомпонентні суміші схильні до деградації у результаті фізико-хімічних впливів у процесі експлуатації. Тому існує необхідність з розроблення облицювальних неоднорідних матеріалів композиційної структури, виготовлених з дешевих матеріалів із застосуванням двох компонентів – стандартної матриці і наповнювача.

Для досягнення високої ефективності пласких облицювальних матеріалів наповнювачі діелектричної матриці повинні мати прийнятні електрофізичні та магнітні властивості. Аналіз властивостей магнітних провідних матеріалів дозволив дійти висновку, що перспективним наповнювачем для захисних композицій є карбонільне залізо FeC. Цей наповнювач має низку переваг порівняно з іншими металевими і металовмісними магнетиками. Карбонільне залізо складається з чистого магнітом'якого заліза (97–99,5 %) вкритого шаром вуглецю, що обумовлює його високу корозійну стійкість. Перевагою матеріалу є те, що його не треба подрібнювати до потрібної дисперсності. Карбонільне залізо виробляється промисловими підприємствами у вигляді порошків дисперсністю від 3,5 до 25 мкм. При цьому найбільш поширеними є порошки дисперсністю 6–8 мкм. При наявності контакту між зернами матеріал має гарантовану електричну провідність порядка 10^5 См. Відносні магнітні проникності – 10–15. Мінімальна ефективна магнітна проникність – 4–5.

Результати випробувань захисних властивостей матеріалу наведено на рис. 3.13.

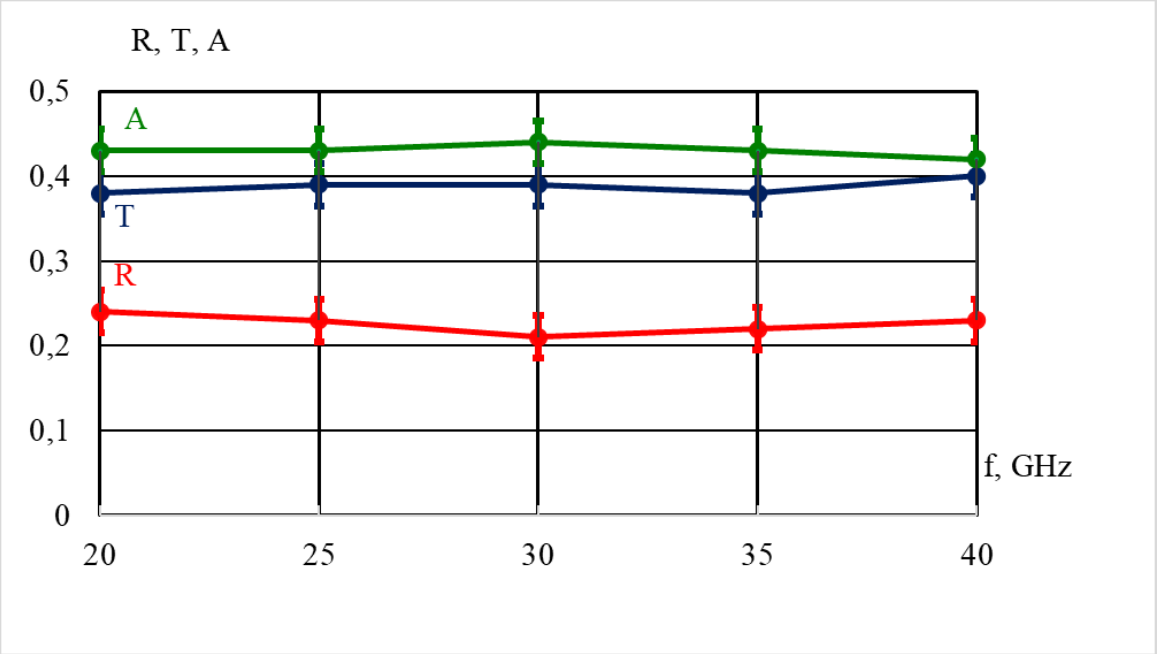


Рис. 3.13. Коефіцієнти відбиття (*R*), проходження (*T*) та поглинання (*A*) одношарового матеріалу завтовшки 5 мм з вмістом карбонільного заліза 14–15 % за об’ємом

Залежності, наведені на рис. 3.13, немонотонні. Відхилення від лінійної залежності випадкові і можуть бути результатом резонансних явищ у процесі відбиття і поглинання електромагнітних хвиль. Це обумовлене малими довжинами хвиль (1,51–0,75 см) та товщиною покриття (5 мм). Крім того, поверхня зразків не ідеально гладка. Це робить зміни відповідних коефіцієнтів при зміні частоти дещо випадковими. Тому визначати аналітичні функції змін цих коефіцієнтів недоцільно.

Як видно з наведених на рис. 3.13 даних, одношаровий матеріал має стабільні, у межах похибки вимірювань (до 1 дБ), захисні властивості. При цьому коефіцієнти відбиття нижчі за показники відомих аналогів на основі немагнітних металів та феритів. Враховуючи частотний діапазон, такі покриття є перспективними щодо створення електромагнітного камуфляжу.

Відбувається поступове впровадження мобільного зв’язку стандарту 5G. У зв’язку з цим підвищуються гранично допустимі рівні електромагнітних випромінювань ультрависоких та надвисоких частот в усіх країнах світу. Це пов’язане з більш швидким згасання хвиль цих частот у атмосфері й неможливістю підвищення щільності розташування базових станцій, у тому числі через економічні фактори. Тому було випробувано захисні властивості матеріалу на частотах 5 ГГц, які є основним для гнучкого застосування стандарту зв’язку 5G.

У результаті експериментів встановлено, що коефіцієнти відбиття дещо підвищується до 0,30–0,35. При цьому коефіцієнти поглинання електромагнітних хвиль знижуються до 0,30–0,35. Це обумовлює коефіцієнт проходження до 0,30. В цілому захисні властивості з точки зору захисту людей у побутових та виробничих умовах можна вважати задовільними.

Якщо враховувати, що облицювальний матеріал наноситься на поверхні будівельної конструкції та його досить велику товщину (принаймні декілька міліметрів) можливо оптимізувати товщину захисного шару, що може надати йому додаткових захисних властивостей за рахунок резонансних явищ.

У реальних умовах впровадження екранування екрануюча конструкція може мати дві особливості: обмежені розміри та обмежену товщину. У першому випадку необхідно враховувати дифракційні явища на краях екрана, у другому – проникнення електромагнітного випромінювання на глибини, більші за товщину скін-шару.

Для умов, коли захисний екран має обмежені розміри (окрема стіна приміщення, захисна конструкція для екранування окремого технічного засобу) слід враховувати дифракційні явища на краях екрана. На достатньо низьких частотах електромагнітних випромінювань, менше 2 ГГц, довжина електромагнітної хвилі складає 0,15 мм, що може бути суттєвим.

Цей ефект можна оцінити, виходячи з геометричних критеріїв [111].

$$k = h_0 \cos\varphi \sqrt{\frac{2f}{c}\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)}, \tag{3.28}$$

де k – безрозмірний коефіцієнт, який набуває мінімуму на кромках екрана,

f – частота електромагнітного випромінювання,

c – швидкість поширення електромагнітних хвиль,

r_1, r_2 – відстані від джерела випромінювання до екрана та від екрана до зони визначення інтенсивності випромінювання,

φ – кут, який визначає спрямованість випромінювання до контрольної точки,

h_0 – відстань від точки перетину променя з екраном до його кромки (рис. 3.14).

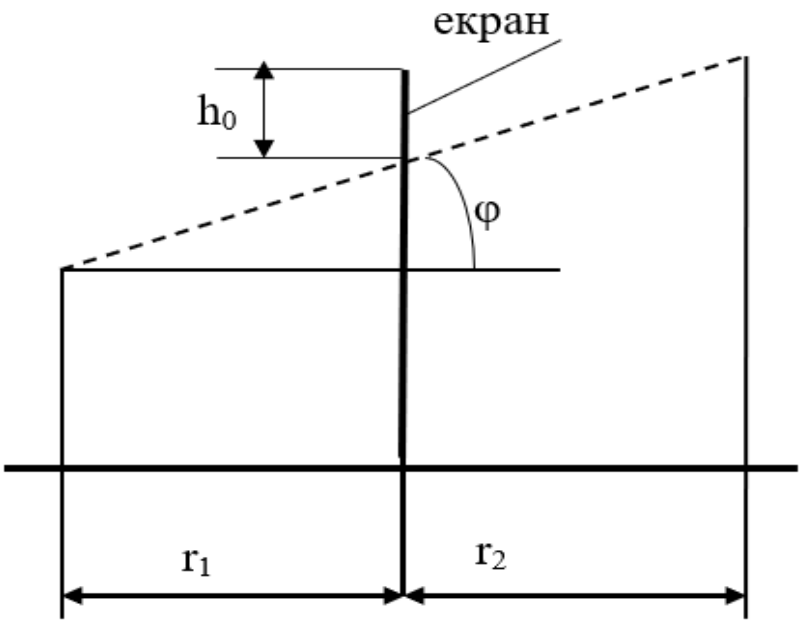


Рис. 3.14 Схема оцінки проникнення електромагнітного випромінювання у захищену зону внаслідок дифракційних явищ

Таке оцінювання є обов'язковим за малих відстаней екрана від джерела випромінювання і великих відстаней до контрольних точок. Критерієм є порівнянність розмірів екрана та відповідних відстаней.

За глибин проникнення електромагнітного поля, більших за товщину скін-шару, співвідношення коефіцієнтів проходження T та відбиття R у залежності від товщини захисного матеріалу має закономірності, наведені на рис. 3.15.

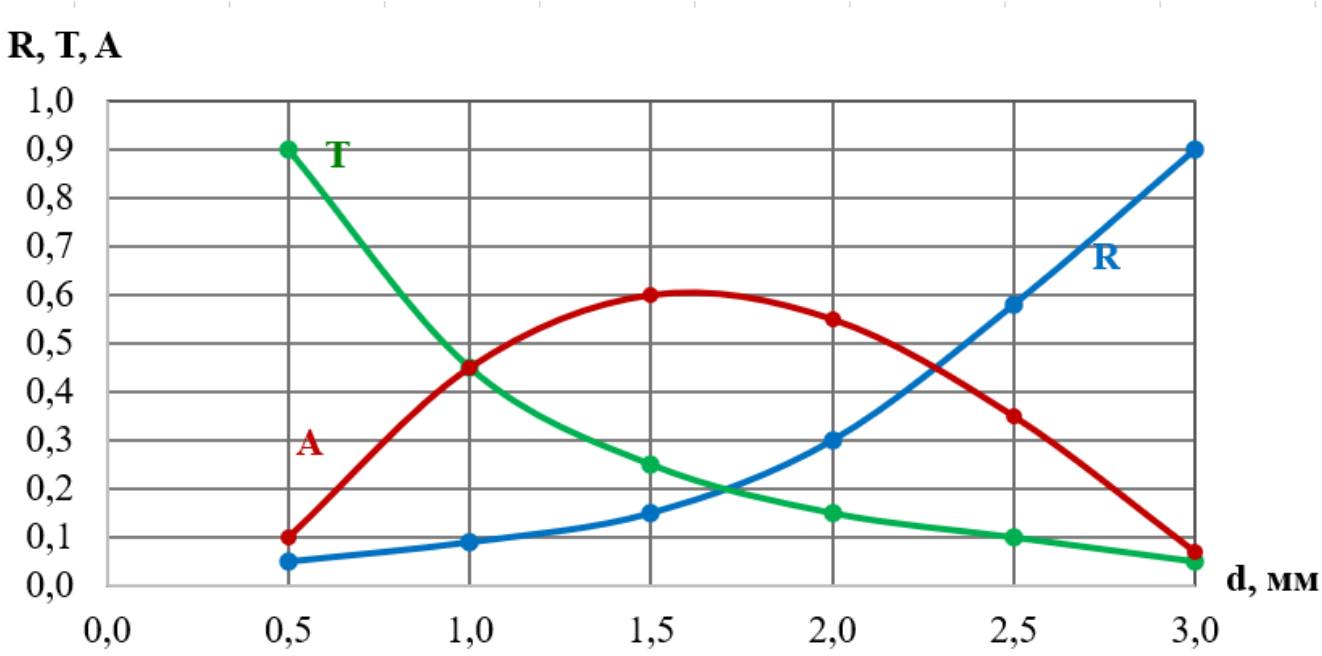


Рис. 3.15 Співвідношення коефіцієнтів проходження T та відбиття R у залежності від товщини захисного шару (f = 2, 45 ГГц)

Ці залежності мають загальний характер і відрізняються для різних металевих і композиційних матеріалів у залежності від електрофізичних характеристик, що виражається у крутизні наведених кривих. Значення T та R вимірюються стандартними методами. Це надає можливість визначити коефіцієнт поглинання A. Даний коефіцієнт є основним показником щодо вдосконалення захисного матеріалу.

Особливість оптимізації радіопоглинального матеріалу резонансного типу полягає в тому, що оптимальна товщина на заданій резонансній частоті визначається неоднозначно – мінімум цільової функції у вузькій смузі частот

поблизу резонансної частоти досягається при товщинах, які відповідають тов товщині (товщині узгодження), близькій до непарної кількості чвертей довжин хвиль у матеріалі.

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:

$$K_r = 10\lg\left(\frac{\sqrt{\varepsilon_e - 1}}{\sqrt{\varepsilon_e} + 1}\right), \text{ дБ}, \tag{3.29}$$

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:

$$K_r = \frac{d\sqrt{\varepsilon_e}}{\lambda} \prec 0,3, \tag{3.30}$$

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

$$K_r = \frac{d\sqrt{\varepsilon_e}}{\lambda} \prec 0,25. \tag{3.31}$$

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. Мінімально 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 діелектричний 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 товщині узгодження матеріалу за умови непарним кратностям чвертей довжин хвиль:

$$T_e = 2\pi/\lambda \cdot l \cdot R_e \sqrt{\varepsilon_{екв}} \approx n \cdot \pi/2 \qquad (3.32)$$

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

$$\varepsilon_{екв} = \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}$$

Таблиця 3.2

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
				0550	-8,90	1,10

24	12	15	1,000	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
				1,075	-14,83	1,09
				1,100	-13,02	1,11
24	12	15	3,000	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
				3,150	-16,48	1,04
				3,225	-15,32	1,07
				3,300	-13,94	1,09
24	12	15	6,000	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
				6,150	-18,65	1,01
				6,300	-17,40	1,02

				6,450	-16,04	1,04
				6,600	-14,71	1,06
24	12	15	10,000	9,000	-14,78	0,97
				9,250	-17,17	0,99
				9500	-19,84	1,01
				9,950	-22,07	1,02
				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

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. 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. При розрахунковому визначені 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 товщині узгодження матеріалу.

Для багатьох матеріалів та умов застосування критичним є коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль. При цьому матеріали мають як діелектричні, так і магнітні властивості, які відомі. У цьому випадку для розрахунку товщини узгодження доцільно користуватися співвідношенням, наведеним у [104]:

$$t_m = \frac{nc}{4 f_m \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} \tag{3.33}$$

де t_m – товщина узгодження,

f_m – пікова частота поглинання електромагнітних хвиль,

ε_r, μ_r – модулі комплексних діелектричної та магнітної проникності,

с – швидкість світла,

$n = 1, 3, 5$.

Крім узгодження товщини додатковий ефект можна отримати за рахунок

узгодження магнітних і електричних властивостей матеріалу. Слід враховувати, що наведеним співвідношенням можна користуватися для частот узгодження, тобто частоти електромагнітного випромінювання максимальної амплітуди.

Як зазначалося вище, узгодження магнітних та електричних властивостей матеріалів досить складне. Принаймні виходячи з доступних джерел остаточне вирішення цього питання ще далеко від завершення. При цьому комплексні діелектричні й магнітні проникності композиційних матеріалів не є довідковими величинами і потребують визначення для кожного окремого зразка. Такі вимірювання досить складні і мають велику похибку. Тому у практичній діяльності доцільно крім узгодження товщини, закладати у захисний матеріал певний запас ефективності. Але при цьому слід враховувати, що при збільшенні об'ємного вмісту електропровідної субстанції підвищується коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль. Тому в інженерній практиці при розробленні композиційного матеріалу потрібної ефективності доцільно керуватися зміною електропровідності матеріалу. Виходячи з фундаментальних співвідношень електродинаміки суцільних співвідношень найбільш прийнятний баланс між відбивальними і поглинальними властивостями матеріалу відбувається на межі перколяційного ефекту – різкого підвищення електропровідності внаслідок збільшення вмісту електропровідної субстанції.

Висновки до розділу 3

1. Дослідження екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких частот будівельними матеріалами з регулярно розташованими провідними лінійними структурами, у вигляді арматури, свідчить, що вони мають властивості електромагнітних кристалів. Такі структури характеризуються наявністю частотних смуг прозорості і непрозорості у решти частотного діапазону. Визначення смуг прозорості з використанням *показника* $ka/2\pi$ (k – хвильове число, a – амплітуда електромагнітної хвилі) спрощує процес обирання будівельних

матеріалів необхідної ефективності, виходячи з фактичний амплітудно-частотних характеристик випромінювання, яке потребує екранування.

2. Дослідження захисних властивостей неоднорідних будівельних матеріалів на основі цементобетону (матриця) і базальтових волокон (арматура) показало, що такі структури мають недостатню ефективність у якості електромагнітного екрана. Це пояснюється тим, що діелектричні непровідні композиції знижують рівні електромагнітних випромінювань тільки за рахунок заломлення електромагнітних хвиль. Оскільки базальтові волокна є перспективним матеріалом для вироблення будівельної арматури, доцільним є нанесення на базальтові волокна або стрижні провідної субстанції. Це дозволить різко підвищити коефіцієнти екранування електромагнітних випромінювань, застосовувати математичний апарат для прогнозування захисних властивостей матеріалу, призначений для металевих регулярних структур.

3. Досліджено захисні властивості плаского неоднорідного облицювального матеріалу на основі стандартного лаку ХС (матриця) та карбонільного заліза FeC (наповнювач). Вміст наповнювача складав 14–15 % за об’ємом. Товщина матеріалу – 5 мм. Встановлено, що коефіцієнт пропускання матеріалу електромагнітних випромінювань ультрависоких частот не вищий за 0,40. Коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль не перевищує 0,25, що є кращим показником у порівнянні з відомими аналогами. Такий коефіцієнт відбиття робить матеріал на основі карбонільного заліза перспективним для вироблення електромагнітного камуфляжу.

4. Перфоровані структури з різними діаметрами або лінійними розмірами отворів різної товщини несучого матеріалу можна розглядати як систему хвилеводів, довжина яких відповідає товщині матеріалу. Для визначення коефіцієнтів екранування таких структур можна застосовувати співвідношення, які строго випливають з теорії хвилеводів. При цьому слід враховувати можливість проявлення резонансних явищ на отворах, які обумовлюють частоти (частотні смуги) різкого підвищення захисних властивостей та прозорості перфорованої

структури, що потрібно враховувати при виконання проектних робіт. За рахунок резонансних явищ можливо підвищити ефективність пласких гетерогенних структур – композиційних матеріалів з домішками мікророзмірів. Для цього необхідно врахувати електричну товщину матеріалу, яка повинна бути кратною чверті довжини падаючої електромагнітної хвилі.

Основні положення розділу 3 опубліковані автором у наукових працях [3, 5, 7]

РОЗДІЛ 4. ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ БЕЗПЕКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕОДНОРІДНИХ ЕКРАНУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

4.1. Загальні засади розроблення і впровадження неоднорідних матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань

Дослідження ефективності екранування електромагнітних випромінювань будівельними матеріалами з наявністю регулярних феромагнітних структур свідчить про наявність частотних смуг непрозорості та прозорості для випромінювань. Ці частотні смуги можна регулювати або кроком арматури, або зсувом окремих шарів один відносно одного. Якщо один шар арматури відносно іншого зсунути на половину кроку розташування арматури, то при фронтальному падінні електромагнітної хвилі фактичний крок екрануючої неоднорідності буде удвічі меншим. Аналогічним чином можна зсунути третій шар арматури відносно другого, тому ще більше зменшується зона прозорості структури для електромагнітного випромінювання. При цьому міцність будівельної конструкції не знижується. Таке регулювання дозволяє знизити електромагнітне навантаження на середовище будівель із одночасним забезпеченням стабільності функціонування мобільного зв’язку. Для цілей електромагнітної безпеки достатнім є 4–5 шарів арматури.

У процесі оцінювання захисних властивостей будівельних матеріалів слід враховувати частотну залежність магнітних проникностей феромагнітних складових як за поглинанням, так і за заломленням. Дослідження довели, що діелектричні будівельні матеріали з великою різницею коефіцієнтів заломлення електромагнітних хвиль основного матеріалу й базальтовими неоднорідностями не є достатньо ефективними електромагнітними екранами. Для підвищення захисних властивостей таких структур доцільно вкрити базальтові волокна провідною субстанцією – металом, вуглецем. Крім цілей електромагнітної безпеки це

підвищить сферу застосування базальтової арматури внаслідок захисту її поверхні від лужного середовища цементобетонів.

Застосування пласких неоднорідних структур із наповнювачем з карбонільного заліза значно підвищує поглинання електромагнітної енергії, порівняно з наповнювачами з магнетиту, графіту й графітизованої сажі. При цьому коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль нижчий за відомі аналоги (0,21–0,25) для частот, вищих за 20 ГГц. Для частот стандарту 5G він не перевищує 0,35. Такі показники дозволяють використовувати матеріал для облицювання внутрішніх поверхонь приміщень. Малі коефіцієнти відбиття дозволяють уникнути підвищення електромагнітного фону внаслідок відбиття й перевідбиття електромагнітних хвиль від внутрішніх джерел випромінювань. Додавання у плаский матеріал шару із вмістом нітриду бору блокує електромагнітні випромінювання інфрачервоного діапазону й сприяє вирішенню задач енергозбереження. Коефіцієнт теплопровідності цього покриття нижчий за поширені термоізоляційні матеріали, такі як корок, скловата.

Складність проєктування регулярних феромагнітних структур полягає у визначені захисних властивостей регулярних феромагнітних неоднорідностей без урахування їх реальних ефективних перерізів. Реальна арматура має ребристу поверхню різної рельєфності. У практичній діяльності слід оцінювати фактичні усереднені перерізи неоднорідностей. Ефективність екранування пласких неоднорідних структур з наповнювачем мікророзмірів залежить від його дисперсності. Тому у процесі проєктування матеріалу необхідне оцінювання ефективності захисту з урахуванням показників наповнювача.

Складність проєктування таких структур також полягає у застосуванні феромагнітних лінійних неоднорідностей фіксованих вихідних магнітних проникностей та визначення їх частотних змін. У реальних умовах експлуатації намагніченість сталевої арматури змінюється. Відбуваються два протилежних процеси – розмагнічування металу з часом та намагнічування арматури у геомагнітному полі. Ці процеси є непередбачуваними і залежать від орієнтації

будівлі, довжин сегментів арматури тощо. Це неможливо врахувати у процесі досліджень та виконанні проектних робіт. Тому при оцінюванні можливих захисних властивостей матеріалів доцільно закладати у проект певний запас коефіцієнтів екранування.

У процесі проєктування неоднорідних захисних структур і композиційних матеріалів слід враховувати багатофакторність залежності коефіцієнтів екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Для регулярних структур – це електрофізичні та магнітні властивості металевих елементів, арматури, сітки тощо, крок розташування екрануючих елементів та товщина конструкції. Особливо критичними є співвідношення магнітних та електрофізичних показників матриці та наповнювачів композиційних матеріалів. Діелектричні проникності матриць на основі цементобетонів, латексів, лаків класу ХС коливаються від 3,8 до 5,6. Але найбільш важливими є показники наповнювачів, наприклад, основні показники для карбонільного заліза, наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Електромагнітні параметри карбонільного заліза різних марок

Параметри	Р–10	Р–20	Р–100Ф–1	Р–100Ф–2
Відносна добротність, не менше	1,85	2,00	1,10	1,10
Ефективна магнітна проникність, не менше	2,90	2,95	1,60	1,60
Відносна початкова магнітна проникність	13,0–15,0	12,0–14,0	10,0–12,0	10,0–12,0

При цьому слід враховувати дисперсність наповнювачів, наприклад, економічно доцільно використовувати наповнювачі, які виробляються

промисловістю. Для карбонільного заліза це порошки дисперсністю від 6–8 до 22–25 мкм.

У свою чергу від дисперсності частинок наповнювача та його об'ємного вмісту залежить формування кіл електропровідності, що обумовлює захисні властивості матеріалу у високочастотних діапазонах електромагнітного спектра. При цьому магнітні та електрофізичні властивості матеріалів мають частотну залежність, тому у відповідні розрахунки та проєктні рішення необхідно закладати фактичні значення для певної частоти або частотної смуги. Для магнітних матеріалів втрати електромагнітної енергії обумовлюються вихровими електрострумами та втратами на гістерезис. Для карбонільного заліза коефіцієнт втрат на вихрові струми складає – 2,6–3,2, коефіцієнт втрат на гістерезис – 3,8–4,2. Дослідження свідчать, що в разі застосування електротехнічних сталей доцільно застосовувати сталі класу 121, найменш придатну для основного застосування – виготовлення осердь різного призначення. При виготовленні регулярних структур на основі базальтів слід враховувати часткове руйнування базальту лужними компонентами цементобетонів.

Також слід враховувати магнітні та електрофізичні властивості базальтів. Наприклад, в Україні існує родовище базальту, у якому частка залізовмісних сполук складає до 18 %. Це відкриває можливість за рахунок надання композитам високих коефіцієнтів поглинання електромагнітної енергії одночасно з мінімальною мінімізацією коефіцієнтів відбиття. Такі властивості важливі для просторових перерозподілів щільностей потоків енергії високочастотних електромагнітних випромінювань внаслідок відбиття електромагнітних хвиль. Досягти такого ефекту можливо за рахунок узгодження абсолютних магнітної та діелектричної проникності кінцевого матеріалу, який повинен бути наближений до показника повітря (хвильовий опір).

Оцінку імпедансних характеристик композиційних матеріалів можливо здійснити за співвідношеннями Максвела-Гарнета, Оделевського, Лорентца тощо. Слід враховувати, що усі ці формули є емпіричними, тому така оцінка дає досить

велику похибку. Це обумовлює необхідність попереднього випробування проєктованого матеріалу у лабораторних умовах. Тому у разі використання певного матеріалу для серійного вироблення будівельних та облицювальних матеріалів доцільно отримання залежності захисних властивостей композиції від дисперсності наповнювача, його об'ємного вмісту тощо. Це ж стосується частотних залежностей, відносних магнітної та діелектричної проникностей. Наявність таких даних у табличному або графічному вигляді спрощує процес проєктування композиційних матеріалів та знижує вартість розробки.

При визначенні пропорційного вмісту матеріалів матриці та наповнювача за об'ємом слід враховувати певні зміни цих пропорцій у процесі висихання або полімеризації матеріалу матриці. При висиханні за рахунок випаровування води або розчинника об'ємна доля матеріалу матриці зменшується. У процесі полімеризації певне зниження об'єму матеріалу також може відбуватися. Також у процесах полімеризації може змінюватися провідність матеріалу через розриви кіл провідності усередині матеріалу внаслідок релаксації внутрішніх напруженостей. Аналіз досліджень у цьому напрямі свідчить що такі процеси притаманні жорстким полімерам на основі епоксидних смол та їм подібним. У еластичних матеріалах такий ефект не проявляється. Зміни об'ємного складу багатокомпонентних композицій важко передбачити. Тому перед впровадженням технології виробництва доцільно провести серію лабораторних досліджень. Враховуючи складність проєктування захисних матеріалів потрібної ефективності необхідно отримати вихідні дані щодо змін габаритних розмірів окремих класів матеріалів (матеріалів на різних носіях) у табличному або графічному вигляді. У загальному випадку процес розроблення захисного матеріалу або конструкції може бути визначений за певною послідовністю. Враховуючи доцільність автоматизації проєктування захисних матеріалів або конструкцій дану схему необхідно перетворити у алгоритм.

Проєктування захисної конструкції будь-якої структури доцільно здійснювати за певним алгоритмом (рис. 4.1).

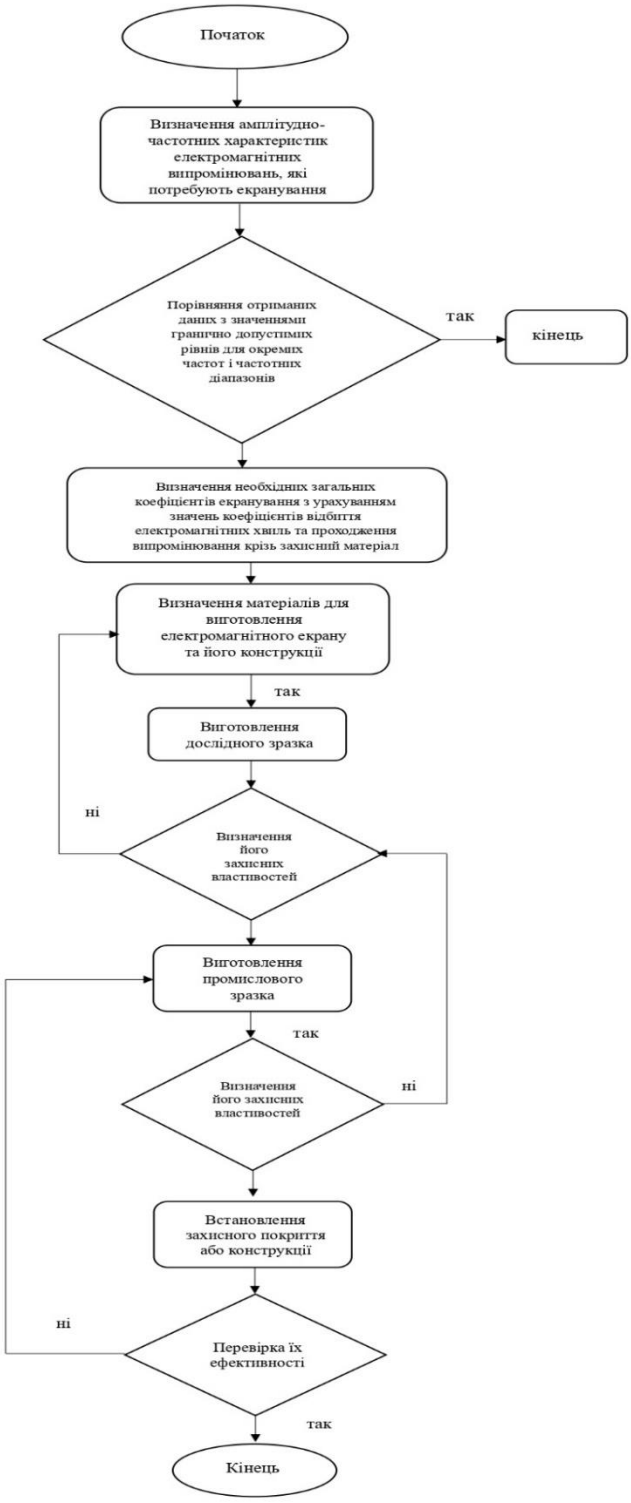


Рис. 4.1 Алгоритм розроблення і впровадження захисних матеріалів і конструкцій для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону

Застосування пропонованого алгоритму дозволяє раціоналізувати захисні властивості електромагнітних екранів у залежності від реальної електромагнітної обстановки на принципах розумної достатності. Тобто, зниження рівня електромагнітного поля у відповідності з чинними гранично допустимими рівнями із забезпеченням стабільного функціонування засобів бездротового зв'язку. Даний алгоритм знижує витрати часу й коштів на проєктні роботи й дозволяє врахувати усі критичні чинники впливу на ефективність екранування.

Перспективним напрямом подальших досліджень є обгрунтування та розроблення технологій надання базальтовим волокнам електропровідності, що забезпечить високі поглинальні властивості матеріалу. Доцільним є виконання комплексного дослідження. По-перше, дослідження залежності ефективності екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот. По-друге, дослідження блокування випромінювань інфрачервоного діапазону від дисперсності карбонільного заліза та нітриду бору.

Слід враховувати, що застосування розробленого алгоритму має певні обмеження. Крім високої ефективності, у реальних умовах експлуатації до екрануючого матеріалу або конструкції висуваються декілька вимог. Захисна конструкція повинна мати прийнятний життєвий цикл. Недоліком багатьох композиційних матеріалів є певна метастабільність. Тобто втрата електричних, механічних властивостей під впливом фізико-хімічних чинників. Повинна забезпечуватися гальванічна сумісність за умови використання різнорідних металів для запобігання електрохімічній корозії. Одним з головних чинників є забезпечення належних пружних модулів, якщо йдеться про матеріали, які є будівельними та облицювальними. При цьому, у разі застосування феромагнітних матеріалів необхідно враховувати значення статичної магнітної проникності й запобігання насиченості магнітного поля. Тобто наведені обмеження необхідно враховувати при обиранні як вихідних даних, так і вихідних матеріалів для впровадження наведеного алгоритму.

4.2. Електромагнітні екрани у комплексі заходів з безпеки фізичних факторів техногенного походження

Застосування електромагнітних екранів як окремої захисної конструкції доцільне тільки у окремих випадках. Це стосується блокування електромагнітного поля окремого технічного захисту, засобів індивідуального захисту, конструкцій для технічного захисту інформації.

З точки зору застосування екранувальних матеріалів і конструкцій у будівельній галузі монтаж захисного екрану як окремої одиниці конструкції будівлі і споруди недоцільний як з технічних, так і з економічних міркувань. Недоліком багатьох будівель є надмірне екранування електромагнітного поля. Використання занадто густої арматури та армуючих металевих сіток може мати два наслідки – зниження рівня геомагнітного поля нижче нормативних значень, що шкідливо для людей та повне або часткове блокування електромагнітних випромінювань усіх видів бездротового зв'язку. Останнє може бути вкрай шкідливе для людей. Відомо, що за низьких рівнів сигналів базових станцій мобільного зв'язку (менше 0,2–0,1 мкВт/см^2) різко підвищується випромінювання самого мобільного телефону (до 150–200 мкВт/см^2). Це є вбудованою функцією усіх мобільних телефонів для забезпечення стабільного зв'язку. Тому у процесі розроблення і впровадження засобів екранування електромагнітних випромінювань обов'язковим є раціоналізація (оптимізація) коефіцієнтів екранування з урахуванням викладених міркувань. Більшість композиційних матеріалів із застосуванням полімерних матриць мають можливість накопичувати електростатичний поверхневий заряд. Це може мати кілька несприятливих наслідків. Більшістю нормативних актів, зокрема для експлуатації засобів обчислювальної техніки, нормує електростатичний потенціал, який не перевищує 500 В. У той же час за рахунок трибоелектричного ефекту, навіть за руху сухого повітря, на полімерних поверхнях, можуть накопичуватися поверхневі заряди набагато вищих потенціалів. Крім того, наявність поверхневих електростатичних

зарядів сприяє нейтралізації іонів повітря, концентрації яких також нормуються (за європейськими нормами – більше 500 $см^{-3}$ обох знаків, за національними – негативних не менше 600 $см^{-3}$, позитивних не менше 400 $см^{-3}$).

У процесі проєктування електромагнітних екранів слід враховувати дещо різні підходи до екранування низькочастотних і високочастотних електромагнітних полів. При використанні феромагнітних матеріалів необхідно враховувати наступне:

- Феромагнітний матеріал повинен мати високу магнітну проникність. Бажано використовувати магнітом'які матеріали з початковою магнітною проникністю.
- Товщина екрана повинна бути достатньо великою щоб забезпечити максимальні магнітні опори матеріалу екрана. Слід враховувати, що товщина екрана за наявності отворів є довжиною хвилевода.
- Відстань між екраном й магнітопроводами інших елементів повинні бути найбільшими, щоб магнітний опір зовнішнього середовища був більший порівняно з магнітним опором екрана.

З підвищенням частоти екранованого електромагнітного поля зростає внесок вихрових струмів у екранування. Відбувається витіснення магнітних силових ліній до поверхневого шару. Тому підвищена магнітна провідність оболонки втрачає своє значення. Фактично за таких умов екран перетворюється з магнітного на електромагнітний. У цьому випадку більш ефективними можуть ставати немагнітні матеріали з високою електричною провідністю. При цьому у якості матеріалу екрана доцільно використовувати метали і сплави з високою електричною провідністю і малим питомим опором. Застосування тонкостінних поверхонь дозволяє знизити масогабаритні параметри екрана без втрати захисних властивостей. При обиранні товщин екрана з феромагнітного матеріалу не є однозначним. Раціональна товщина стінки екрана визначається як обраним матеріалом, так і частотою електромагнітного поля з урахуванням необхідної ефективності екранування.

Головною проблемою є те, що зі зростанням частоти електромагнітного поля магнітна проникність матеріалів знижується і має наслідки зниження екрануючих властивостей. При цьому для немагнітних матеріалів також змінюється й діелектрична проникність матеріалу. Слід враховувати, що матеріали з високою початковою магнітною проникністю більш швидко втрачають значення цього показника ніж матеріали з низькою початковою проникністю.

Форма оболонки відносно мало впливає на її екрануючі функції. Вирішальні значення мають тільки електрична провідність, магнітна проникність і товщина оболонки. Електромагнітний екран як правило є лінійною системою. Тому для нього виконується принцип взаємності. Місце розташування джерела не впливає на екрануючі властивості.

При застосуванні екранування у статичному режимі, якими є усі облицювальні та будівельні конструкції, необхідно враховувати обидві границі відбиття: діелектрик–екран та екран–діелектрик. За частот, нижче 10 000Гц, згасанням енергії у поперечному перерізі екрана можна нехтувати.

У будь-якому випадку, за можливості провідні конструкції, а також провідні неоднорідності непровідних конструкцій (наприклад арматура) повинні бути надійно заземлені.

На сьогодні актуальною проблемою є захист працюючих і населення від шуму. Доцільно об’єднати електромагнітний захист з шумозахистом. Застосування матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань у вигляді матриць з пінополімерів може значно знизити й рівні акустичного шуму, які жорстко нормуються як у виробничих, так і побутових умовах. Універсальність захисного матеріалу не тільки знижує масогабаритні параметри засобів захисту, а й може мати економічний ефект.

Найбільш ефективними матеріалами для зниження шуму є пористі матеріали та перфоровані конструкції. За наявності провідних або магнітних властивостей вони можуть бути одночасно використані для екранування електромагнітних полів та випромінювань. У загальному випадку якийсь з цих фізичних чинників

(електромагнітний або акустичний) є переважним. Це визначається співвідношенням їх фактичних значень й гранично допустимих. Акустичні властивостей перфорованих екранів оцінюються за їх опором продуванню. Існують співвідношення, які враховують діаметри отворів перфорації й їх густину розташування на поверхні. Аналогічні співвідношення існують для електромагнітних випромінювань. Тому у залежності від пріоритетності фактора визначивши ефективність екранування одного, визначають ефективність екранування іншого фактора. У разі незадоволеності екранування одного з фізичних чинників конструкція робиться двошаровою, що дозволяє екранувати як акустичні, так електромагнітні поля на прийнятному рівні.

Також актуальною проблемою є підвищення енергоефективності будівель. Застосування базальтових волокон малих діаметрів й високої густини розташування у поєднанні з екрануючими металевими і металовмісними домішками одночасно блокує інфрачервоні випромінювання й екранує електромагнітні випромінювання широкого частотного спектра.

4.3 Пропозиції щодо вдосконалення національної нормативно-правової бази з електромагнітної безпеки

Існують багато розбіжностей і невідповідностей як у окремих національних, так і їх розбіжності з міжнародними нормативами. У даному розділі розглядаються тільки проблеми, які прямо або опосередковано впливають на необхідність екранування електромагнітних випромінювань та забезпечення необхідних коефіцієнтів екранування, значення яких безпосередньо пов’язано з фактичною електромагнітною обстановкою та вимогами відповідних нормативних актів.

Головною задачею щодо вдосконалення нормативно-правової бази є узгодження національних санітарних норм з електромагнітної безпеки із міжнародними нормативами, а також узгодження чинних національних нормативів між собою. Існують значні розбіжності щодо гранично допустимих рівнів із

захисту населення від електромагнітних впливів [9] та міжнародними вимогами [11], які є обов'язковим додатком до Європейської директиви з електромагнітної безпеки [12]. Це ж стосується гранично допустимих рівнів електромагнітних полів у виробничих умовах. У більшості країн Європи гранично допустимі рівні електромагнітних випромінювань, частот мобільного зв'язку у кілька разів вище за вимоги національних санітарних норм. При цьому існує вимога зниження рівнів електромагнітних випромінювань у певних категоріях будівель. Враховуючи поступовий перехід до стандарту мобільного зв'язку 5G доцільно імплементувати таку вимогу до національних санітарних норм і правил. При цьому, слід враховувати, що частина гранично допустимих рівнів, особливо для наднизької частоти, у Європейських країнах більш жорсткі ніж у Україні, а що стосується високочастотних випромінювань, то вони менш жорсткі. Бажано вдосконалити і відповідні державні будівельні норми. В усіх нормах з цивільного та промислового будівництва міститься вимога щодо рівнів електромагнітних полів. Але усі посилання на нормативи, які вже багато років скасовані. Крім того, наприклад, у вимогах з проєктування електрообладнання будівель цивільного призначення існує вимога про гранично допустимі рівні електричних полів жодним чином не згадуються магнітні поля (магнітна складова електромагнітного поля промислової частоти) та електромагнітні випромінювання. У цьому ж нормативі існує дозвіл на застосування вбудованих трансформів сухого типу. Відомо, що усі трансформатори є джерелом магнітних полів промислової частоти. Але щодо безпеки цих трансформаторів, то існує вимога їх розміщення у технічних поверхах. Застосування екранування таких пристроїв добре опрацьовано. Але вимога щодо застосування екранів відсутня.

Умовою високої ефективності заходів і засобів нормалізації електромагнітної обстановки у виробничому та побутовому середовищі є коректне оцінювання електромагнітної обстановки. Особливо важливим це є на стадіях проєктування засобів захисту людей. У той же час визначення інтегральних значень електромагнітних полів та випромінювань у нормативах [9, 10] суттєво

відрізняються. Якщо у нормативі [9] розглядається відношення відповідних напруженостей електричних і магнітних полів щільностей потоків енергії до відповідних гранично допустимих рівнів для кожної частоти, або діапазону частот (сумарні відношення не повинні перевищувати одиниці), то у нормативі [10] розглядаються квадрати цих величин. Результати за обома методиками суттєво відрізняються, що дає різночитання. А за такими показниками, як питома поглинена енергія та питома поглинена потужність можна з'ясувати фізіологічний вплив електромагнітних випромінювань, але неможливо визначити необхідні коефіцієнти екранування випромінювань.

Застосування екранування є найбільш ефективним засобом забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів. Але прийнята в Україні методом підтвердження відповідні вимоги [14] не можуть бути виконані з огляду на реальні рівні електромагнітних полів наднизької частоти, що обумовлено застарілими конструкціями систем електроживлення. Це ж стосується виконання вимог щодо електромагнітних полів комп'ютерної техніки. Регламентовані рівні, які містяться в усіх міжнародних нормативах [19–21] ніяким чином не можуть бути витримані в Україні через складне електромагнітне оточення як у виробничих, так і у житлових будівлях. А відповідні норми в Україні відсутні. Найбільш універсальними нормами щодо рівнів електромагнітних полів, які регламентують увесь діапазон, у тому числі й значення геомагнітного поля, є норми, прийняті у Німеччині [25]. Ці норми фактично визнані в усіх країнах Європи, тому доцільно розглянути питання про їх застосування в Україні.

Окремого доповнення потребують національні санітарні норми у частині захисту людей від впливу електромагнітних полів екрануванням. Вимоги усіх нормативів практично повністю застарілі. У санітарних нормах [9] міститься рекомендація екранувати електромагнітні випромінювання залізобетонними конструкціями та металевими сітками. Відсутні будь-які рекомендації, наприклад у додатках до санітарних норм, які б надавали конкретні орієнтири фахівцям з електромагнітної безпеки. Також екранування електромагнітних полів і

випромінювань згадується у санітарних нормах щодо роботи з джерелами електромагнітних полів [10]. Ці норми рекомендують застосовувати магнітні та електромагнітні екрани, виготовлені з електротехнічної сталі, міді, алюмінію, їх сплавів, а також конструкції з них. Але електротехнічні сплави мають дуже широку номенклатуру. При цьому сталі найгірші за показниками щодо основного застосування у електротехнічній продукції є найкращими з точки зору екранування, принаймні низькочастотних магнітних полів. Сітчасті конструкції зі сталі є фактично монохромними. Але вимоги щодо врахування амплітудно-частотних характеристик електромагнітного випромінювання у процесі проєктування екрануючої конструкції відсутні. Це ж стосується виробів зі сплавів кольорових металів. Поза увагою залишається той факт, що усі металеві конструкції мають великі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. У сучасних умовах цей показник є вкрай критичним, тому відповідні норми повинні містити вимоги щодо відбивальних характеристик екранів.

Не дивлячись на численні дослідження й прикладні розробки щодо композиційних екрануючих матеріалів, їх застосування в Україні ніяким чином не формалізоване. У той же час використання композицій дозволяє оптимізувати коефіцієнти екранування електромагнітних випромінювань, мінімізувати коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль, що крім технічного результату, може мати й вагомий економічний ефект.

4.4. Впровадження результатів досліджень та їх ефективності

Результати досліджень було впроваджено у готельному комплексі ТОВ «Територіальна сервісна компанія».

За результатами електромагнітного моніторингу з використанням повірених приладів П3-50 та П3-31 було встановлено наближення та перевищення магнітних полів промислової частоти та електромагнітних полів частот бездротового зв’язку у певних зонах підприємства. Вимірювання здійснювалося у години

максимального навантаження на силову електромережу й максимальних кількостей підключень до засобів зв’язку. З метою зниження електромагнітних впливів на персонал і відвідувачів було застосовано екранування магнітних та електромагнітних полів. Зокрема, з використанням електротехнічних сталей класу 121 було здійснено екранування вбудованого силового трансформатора сухого типу та розподільчих щитів на поверхах будівлі. Контрольні вимірювання показали, що коефіцієнт екранування у напрямках перебування людей складали 4,3–4,7 за напруженістю магнітного поля промислової частоти. Напруженість магнітного поля частотою третьої гармоніки промислової частоти знижувалася у 2,3–5,6 разів у різні години доби у залежності від кількості електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками, які були ввімкнені у силову електромережу. З використанням композиційного полімерного матеріалу на основі карбонільного заліза було здійснено повне екранування сервера підприємства. У результаті взаємопроникнення електромагнітних полів і випромінювань ліквідовано повністю (на межі чутливості вимірювальних пристроїв). З урахуванням діаграм спрямованості було здійснено часове екранування джерел електромагнітних полів частот бездротового зв’язку. Вимірюванням встановлено, що щільності потоків енергії зменшилися з пікових 12–14 мкВт/см^2 до 0,2–0,3 мкВт/см^2, що залишає сигнал достатній для безперебійного функціонування засобів зв’язку. \

Контрольні вимірювання у цілодобовому циклі за різних електромагнітних навантажень на середовище внаслідок змін електронавантаження на силову електромережу та на засоби бездротового зв’язку свідчать про достатність впроваджених засобів захисту людей з точки зору електромагнітної безпеки (дод Б).

Також результати дослідження використовуються при підготовці здобувачів вищої освіти зі спеціальності Е2 Екологія та G2 Технології захисту навколишнього середовища та при підготовці докторів філософії зі спеціальності К10 Цивільна безпека (дод. В).

Висновки по розділу 4

1. Визначено концептуальні підход до проєктування інноваційх матеріалів і конструкцій для екранування електромагнітних полів і випромінювань широкого частотного діапазону. Встановлено, що проєктування таких матеріалів необхідно здійснювати з урахуванням обов'язкової мінімізації коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль, що обумовлено сталим зростанням робочих частот усі засобів бездротового зв'язку.

2. Розроблення матеріалів для екранування електромагнітних випромінювань та конструкцій з них доцільно здійснювати за певним алгоритмом. Реалізація розробленого алгоритму дозволяє проєктувати захисні матеріали і конструкції на принципах розумної достатності й прискорює виконання проєктних робіт. Передумовою для здійснення коректного проєктування матеріалів є коректне визначення електромагнітної обстановки у зонах, які плануються захистити екрануючими конструкціями.

3. Показано необхідність вдосконалення національних нормативних актів з електромагнітної безпеки. Головними напрямками такої роботи є забезпечення однозначного визначення сумарного електромагнітного навантаження на середовище за наявності багатьох джерел випромінювання. Узгодження гранично допустимих рівнів електромагнітних випромінювань усіх частотних діапазонів, як між окремими національними санітарними нормами і правилами, так і міжнародними нормативами. При плануванні заходів екранування електромагнітних випромінювань обов'язком є врахування вимог чинних нормативів з електромагнітної сумісності технічних засобів та санітарних норм з експлуатації засобів обчислювальної техніки.

4. Доцільно до чинних санітарних норм і правил та державних будівельних норм імплементувати сучасні вимоги до матеріалів, з яких виготовляються електромагнітні екрани, а також умови їх застосування у

залежності від амплітудно-частотних характеристик електромагнітних випромінювань, які підлягають екрануванню.

5. Впровадження результатів досліджень довели високу ефективність розроблених матеріалів та підходів до підвищення захисних властивостей будівельних та облицювальних матеріалів.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу доступних наукових публікацій та прикладних розробок встановлено, що недостатньо досліджено умови використання феромагнітних неоднорідностей будівельних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Не досліджено можливості застосування діелектричних неоднорідностей будівельних матеріалів для цілей електромагнітної безпеки. Потребують вдосконалення засади застосування неоднорідних матеріалів з екрануючими наповнювачами малої вартості, які мають низькі коефіцієнти відбиття електромагнітні хвиль та регульовані коефіцієнти екранування.

2. У процесі планування експериментальних робіт та проєктування захисних матеріалів і конструкцій слід враховувати, що існуючі співвідношення для розрахунку електрофізичних і магнітних показників композиційних матеріалів є емпіричними. Тому такі обчислення дають великі похибки й придатні тільки для приблизної оцінки необхідного вмісту екрануючого наповнювача. Для проведення досліджень екранування електромагнітних полів частотами, нижчими за 2 ГГц, доцільно використовувати геометрично замкнені захисні конструкції, що унеможливлює проникнення поля поза екраном внаслідок дифракційних явищ.

3. Встановлено, що будівельні матеріали з регулярно розташованими лінійними провідними структурами мають властивості електромагнітного кристалу з наявністю частотних смуг прозорості для електромагнітних хвиль та смуг непрозорості. Визначення таких смуг з використанням показника $ka/2\pi$ (k – хвильове число, a – амплітуда електромагнітної хвилі). Це спрощує процес забезпечення необхідної ефективності матеріалу, виходячи з амплітудно-частотних характеристик електромагнітних випромінювань, які потребують екранування. Показано, що смуги пропускання більшості армованих конструкцій відповідають показникам 0,23–0,28 та 0,75–1,10. Смуги ефективного відбиття – 0,22–0,3 та 0,8–1,0.

4. Дослідження ефективності екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот композиційними матеріалами з використанням карбонільного заліза свідчить, що за об'ємного вмісту наповнювача 14–15 % коефіцієнт пропускання електромагнітного випромінювання для товщин, більших за 5 мм, не перевищує 0,40, а коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль не перевищує 0,25. Цей показник кращий за відомі аналоги й дозволяє застосовувати матеріал у якості електромагнітного камуфляжу.

5. Встановлено, що захисні властивості неоднорідних будівельних матеріалів із застосуванням базальтової арматури недостатні. Для підвищення коефіцієнтів екранування таких матеріалів поверхні базальту необхідно покривати провідною субстанцією. Це дозволяє різко підвищити коефіцієнти екранування матеріалів і застосовувати для прогнозування їх захисних властивостей співвідношення, розроблені для металевих структур.

6. Перфоровані металеві структури з отворами круглої та прямокутної форми можна розглядати як систему хвилеводів з довжиною, що дорівнює товщині матеріалу. Відповідні розрахунки ефективності екранування електромагнітних випромінювань такими структурами строго випливають з теорії хвилеводів. При цьому слід враховувати можливості проявлення резонансних явищ на отворах, які обумовлюють частоти (частотні смуги) різкого підвищення захисних властивостей та появи смуг прозорості перфорованих структур.

7. Розроблення матеріалів і конструкцій для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону слід здійснювати за розробленим алгоритмом. Це дозволяє проєктувати засоби захисту на принципах розумної достатності й прискорює виконання проєктних робіт. Передумовою реалізації алгоритму є визначення амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів, які потребують екранування. Отримані кількісні залежності співвідношень параметрів отворів у суцільній структурі й коефіцієнтів екранування електромагнітних випромінювань. Визначено співвідношення

фізичних товщин захисних матеріалів з товщинами чвертьхвильового узгодження. Це надає змогу мінімізувати товщини електромагнітних екранів.

8. Обгрунтовано необхідність вдосконалення національних нормативно-правових актів з електромагнітної безпеки. Головними напрямами таких робіт є узгодження національних вимог і правил з міжнародними у частині гранично допустимих рівнів електромагнітних полів різних частотних діапазонів та уніфікацію вимог щодо визначення інтегрального електромагнітного навантаження на середовища за наявності множинних джерел електромагнітних полів. Доцільним є імплементація до національних нормативів переліку та умов застосування екрануючих матеріалів у залежності від амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів.

9. Результати дослідження впроваджено у готельному комплексі ТОВ «Територіальна сервісна компанія» та у навчальний процес у Київському національному університеті будівництва і архітектури при підготовці здобувачів вищої освіти зі спеціальності Е2 Екологія та G2 Технології захисту навколишнього середовища та при підготовці докторів філософії зі спеціальності К10 Цивільна безпека.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The International EMF Project. Progress Report, June 2015-2016. World Health Organization. 16 p. URL: https://www.who.int/peh-emf/project/EMF_Project/en/index2.html

2. Tian H, Zhu H, Gao C, Shi M, Yang D, Jin M, Wang F and Sui X (2023) System-level biological effects of extremely low-frequency electromagnetic fields: an in vivo experimental review. *Front. Neurosci*. 17:1247021. doi: 10.3389/fnins.2023.1247021

3. Wu T, Peng R, Zhang L and Li K (2022) Editorial: Human Exposure to New-Emerging Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields. Front. *Public Health* 10:894624. doi: 10.3389/fpubh.2022.894624

4. Hirata A, Diao Y, Onishi T, Sasaki K, Ahn S, Colombi D, et al. Assessment of human exposure to electromagnetic fields: review and future directions. *IEEE Trans Electromagn Compat*. (2021) 63:1619–30. doi: 10.1109/TEMC.2021.3109249

5. Hansson Mild, Kjell, Mats-Olof Mattsson, Peter Jeschke, Michel Israel, Mihaela Ivanova, and Tsvetelina Shalamanova. 2023. "Occupational Exposure to Electromagnetic Fields—Different from General Public Exposure and Laboratory Studies" *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20, no. 16: 6552. https://doi.org/10.3390/ijerph20166552

6. Решетняк М. В. Аналіз впливу неіонізуючого випромінювання на системи органів людини. *Вісник ХНТУ* №4(63), 2017 р. С. 27−32.

7. Неведомська Є. О. Вплив мобільного телефону на здоров’я (огляд вітчизняних та зарубіжних досліджень). *World Science. № 7(35),* Vol.4, 2018. С. 53−58.

8. Glyva, V., Khalmuradov, B., Kashperskyi, V., Panova, O., Biruk, Y. і Zozulia, S. 2021. Методологічний підхід до оцінювання ризиків впливу фізичних факторів техногенного походження в умовах невизначеності. *Системи управління, навігації та зв’язку. 1, 63, 123-125.* doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.123.

9. ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань [Чинний від 2017-12-22]: затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 01.08.1996 р. № 239. Київ, 2017. 28 с. (Державні санітарні норми України).

10. 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. (Державні санітарні норми України).

11. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). Health Physics, 118(5), 483–524. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210

12. 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 (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2013/35/oj (дата звернення: 16.05.2025).

13. Мінімальні вимоги до охорони здоров’я та безпеки працівників, які піддаються впливу електромагнітних полів. (Наказ МОЗ України від 13.01.2023р. № 81, зареєстровано у МЮ України 30.01.2023р. 184/39240 URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0184-23#Text

14. Про затвердження Технічного регламенту з електромагнітної сумісності обладнання. [Чинний від 2018-11-17]: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 р. № 1077. Київ, 2018.

15. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase. International Electrotechnical Commission. URL: https://www.iec.ch/emc/emc_prod/prod_emission.htm

16. EN 61439-5:2015. Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 5: Assemblies for power distribution in public networks. European standards. URL: https://www.en-standard.eu/une-en-61439-5-2015-low-voltage-switchgear-and-controlgear-assemblies-part-5-assemblies-for-power-distribution-in-public-networks

17. 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

18. 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. URL: http://uas.org.ua/wp-content/uploads/2019/04/en_30148901v020201a.pdf

19. MPR II. The Swedish government standard for maximum video terminal radiation. URL: https://www.computerlanguage.com/results.php?definition=TCO

20. ISO 9241-3:1992. Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) — Part 6: Environmental requirements. URL: https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:9241:-3:ed-1:v1:en

21. Council Directive 90/270/EEC of 29 May 1990 on the minimum safety and health requirements for work with display screen equipment (fifth individual Directive within the meaning of Article 16 (1) of Directive 89/391/EEC). Official Journal of the European Union. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/GA/ALL/?uri=CELEX:31990L0270

22. Халмурадов Б. Д., Левченко Л. О., Глива В. А., Перельот Т. М. Електромагнітна безпека та електромагнітна сумісність технічних засобів. *Системи обробки інформації*. 2015. Вип. 12 (137). С. 66–68.

23. Халмурадов Б. Д., Левченко Л. О., Глива В. А., Перельот Т. М. Проблеми узгодженості нормативної бази з електромагнітної сумісності та електромагнітної безпеки. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. № 4. С. 103–106.

24. Sukach S., Riznik D., Zachepa N., Chenchevoy V. Normalization of the Magnetic Fields of Electrical Equipment in Case of Unauthorized Influence on Critical Information Infrastructure Facilities. *Soft Target Protection, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Theoretical Basis and Practical Measures*. 2020. PP. 337–349. URL: https://www.springerprofessional.de/normalization-of-the-magnetic-fields-of-electrical-equipment-in-/17766772

25. Standard of Building Biology Testing Methods. SBM-2015/ Building biology evaluation guidelines for sleeping areas. Baubiologie Maes. Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN. GUIDELINES. 4 p. URL: https://buildingbiology.com/building-biology-standard/

26. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика. Зі змінами. Київ. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго», 2016.

27. Esmailzadeh S., Delavar M. A., Aleyassin A., Gholamian S. A., Ahmadi, A. Exposure to Electromagnetic Fields of High Voltage Overhead Power Lines and Female Infertility. *The international journal of occupational and environmental medicine*, 2019. № 10(1), P. 11–16. https://doi.org/10.15171/ijoem.2019.1429.

28. Amoon A., Crespi C., Ahlbom A. Proximity to overhead power lines and childhood leukaemia: an international pooled analysis. British Journal of Cancer. 2018. P. 364–373. https://doi.org/10.1038/s41416-018-0097-7.

29. Перельот Т.М. Моніторинг та нормалізація рівнів низькочастотних електромагнітних полів у виробничих умовах: дис. … канд. техн. наук: 05.26.01. Київ, 2017. 145 с.

30. Здановський В. Г., Глива В. А., Паньків Х. В. Дослідження рівня магнітних полів енергетичних об’єктів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2013. Вип. 25. С. 22–29.

31. Левченко Л. О., Перельот Т. М. Дослідження рівнів електромагнітних полів повітряних ліній електропередач та їх нормування. *Містобудування та територіальне планування.* 2014. Вип. 53.С. 275–279.

32. Здановський В. Г., Дармофал Е. А., Перельот Т. М. Електроструми витоку як джерела магнітних полів ненормативних рівнів та методи їх зниження. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 5 (142). С. 178–181.

33. Пристрій контролю гармонічного складу електричного струму промислової частоти: пат. 97546 Україна: МПК G01R29/08, G01R31/08, № 01409648; заявл. 03.09.2014; опубл. 25.03.2015. Бюл. № 6. 4 с.

34. Глива В.А. та ін. Джерела гармонік магнітного поля у будівлях і спорудах та мінімізація їх рівнів. *Проблеми охорони праці в Україні.* 2015. Вип. 29. С. 48–58.

35. Перельот Т.М. Гармоніки електричних струмів промислової частоти та їх вплив на електромагнітну обстановку у приміщеннях. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип. 64. С. 192−197.

36. Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Бараненко Е.В. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными загрузками. *Вісник приазовського державного технічного університету.* 2013. Вип. 26. С. 204–210.

37. Саєнко Ю.Л., Бараненко Т.К., Бараненко Е.Б. Зниження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік. *Електрифікація транспорту*. 2012. № 3. С. 78–83.

38. Паньків Х.В. Нормалізація фізичних факторів виробничого середовища енергетичних об’єктів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 Київ, 2016. 22 с.

39. Sotnyk, I.; Kurbatova, T.; Romaniuk, Y.; Prokopenko, O.; Gonchar, V.; Sayenko, Y.; Prause, G.; Sapiński, A. Determining the Optimal Directions of Investment

in Regional Renewable Energy Development. *Energies* 2022, 15, 3646. https://doi.org/10.3390/en15103646

40. Sayenko, Y.; Pawelek, R.; Baranenko, T. Analysis of Reactive Power in Electrical Networks Supplying Nonlinear Fast-Varying Loads. *Energies 2023,* 16, 8011. 10.20944/preprints202310.1706.v1

41. Глива В.А., Ходаковський О.В., Тихенко О.М., Панова О.В. Засоби керування електромагнітною обстановкою в умовах її часових та просторових змін. *Управління розвитком складних систем*. 2019. Вип. 39. С. 199−205.

42. Глива В.А., Тихенко О.М., Левченко Л.О., Колумбет В.П. Керування рівнями електромагнітних полів в умовах змінного енергонавантаження. Наукові праці ДонНТУ. Серія: «*Обчислювальна техніка та автоматизація*». 2019. № 1(32). С. 27−36.

43. Розов В. Ю., Реуцкий С. У., Пелевин Д. Е. и др. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока. *Технічна електродинаміка*. 2012. №1. С. 3–9.

44. Думанський В. Ю., Біткін С. В., Думанський Ю.Д. та ін. Охорона здоров’я населення та працівників від впливу електромагнітного поля, що створюється кабельною лінією 330 кВ та її підстанцією. *Гігієна населених місць*. 2013. Вип. 62. С. 154–166.

45. Думанський В. Ю., Біткін С. В., Уманський Ю. Д. та ін. Гігієнічна оцінка пріоритетних чинників, що створюються високовольтними (110-330 кВ) кабельними лініями електропередачі та їх обладнанням. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип. 63. С. 138–160.

46. Левченко Л. О., Перельот Т. М. Дослідження рівнів електромагнітних полів повітряних ліній електропередач та їх нормування. *Містобудування та територіальне планування.* 2014. Вип. 53.С. 275–279.

47. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов / В. Ю. Розов та ін. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 4. С. 56–61.

48. Шевченко С. Ю., Окунь А. А. Исследование электрических полей промышленной частоты типовых подстанций ВН в городской черте. *Гігієна населених місць*. 2011. Вип 58. С. 199−206.

49. Levchenko L., Glyva V., Burdeina N. Mathematical apparatus for modelling of the propagation the magnetic field electric machines with a given accuracy. *Сучасні інформаційні системи.* 2022. № 2. Т. 6. С. 5-9. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.2.01.

50. Levchenko L., Ausheva N., Karaeva N., Glyva V., Burdeina N. Calculation apparatus for modeling radio engineering and electrical engineering objects. AVIATION IN THE XXI-st CENTURY 2022. September 28, 2022 – September 30, 2022. National Aviation University. Kyiv. P. 4.2.6-4.2.10. URL: https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8525/7280

51. Koppel T, Ahonen M, Carlberg M, Hedendahl L.K, Hardell L. Radiofrequency radiation from nearby mobile phone base stations-a case comparison of one low and one high exposure apartment. *Oncol Lett.* 2019. № 18(5). PP. 5383–5391. https://doi.org/10.3892/ol.2019.10899.

52. Khalifa T., Alnabi A. Electromagnetic Pollution Emitted from Base Station. International Journal of Science and Research. *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4. P. 1125–132.

53. Chen Feng, Liu Yuanjian, Wang Pengfei. Study on the Propagation Characteristics of Radio Wave for Indoor Non-Line-of-Sight. *Journal of Computer and Communications*. 2015. Vol. 3. 40−43. https://doi.org/10.4236/ jcc.2015.33007

54. Тихенко О.М. Заходи і засоби захисту працюючих від впливу електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот: дис. … канд. техн. наук: 05.26.01. Київ, 2017. 133 с.

55. Glyva V., Tykhenko O., Tymoshenko O. Monitoring of electromagnetic environment at the civil aviation aerodromes. Proceedings the Eighth Word Congress

«Aviation in the XXI-st Century». Safety in Aviation And Space Tehnologies (October 10-12, 2018, Kyiv). Kyiv, 2018. PP. 7.30−7.32.

56. Козловський В.В., Ходаковський О.В., Тихенко О.М., Куцак А.С. Дослідження електромагнітної обстановки на аеродромах цивільної авіації та формування заходів з її нормалізації. *Наукоємні технології.* 2019. Т. 43, № 3. С. 289−294.

57. Тихенко О.М. Моніторинг зовнішніх впливів на електромагнітну обстановку виробничого середовища як складова розроблення та впровадження працеохоронних заходів. *Вісті Донецького гірничого інституту,* 2019. Вип. № 2(45). С. 110−115.

58. Маслов М.Ю. Содобаев Ю.М., Сподобаев М.Ю. Электромантная безопасность: критические характеристики сетей 5G. *Электросвязь*. 2019. № 4. С 53−58.

59. Галак С.С. Гігієнічна оцінка електромагнітного випромінювання, що створюється базовими станціями та мобільними телефонами стандарту DCS-1800. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип. 64. С. 171–182.

60. Getman, A. Development of the technique for improving the structure of a magnetic field in the aperture of a quadrupole electromagnet with a superconducting winding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. 5(5 (95). P. 6–12. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142163.

61. Ходаковський, О., Левченко, Л., Колумбет, В., Козачук, А. і Кужавський, Д. Розрахунковий апарат моделювання поширення електромагнітних полів різнорідних джерел. *Сучасні інформаційні системи.* 2021. 5, 1 (Чер. 2021), С. 34–38. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04

62. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пєлєвін Д.Є., Кундіус К.Д. Наближений метод розрахунку магнітного поля повітряних ліній електропередачі 330-750 кВ в зоні виконання робіт без зняття напруги. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2022. № 5. С. 71-77.

63. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Засади електромагнітного моніторингу міста в умовах підвищення електромагнітного навантаження на довкілля. *Екологічна безпека та природокористування.* 2015. № 1. С. 28-34.

64. Козловський В.В., Ходаковський О.В., Тихенко О.М., Куцак А.С. Дослідження електромагнітної обстановки на аеродромах цивільної авіації та формування заходів з її нормалізації. *Наукоємні технології*. 2019. Т. 43, № 3. С. 289−294.

65. Getman, A. Cylindrical harmonic analysis of the magnetic field in the aperture of the superconducting winding of an electromagnet. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 1(5 (91). P. 4–9. https://doi.org/ 10.15587/1729-4061.2018.123607.

66. Панова Е.В. Исследование геометрических критериев электромагнитных экранов. *Технологии техносферной безопасности*. 2014. Вып. № 1 (53). С. 1–12.

67. Глива. В.А., Левченко Л.О., Перельот Т.М. Просторові критерії екранування низькочастотних магнітних полів. *Управління розвитком складних систем*. 2015. Вип. 22. С. 158−164.

68. Кузнецов Б.І., Туренко А.М., Нікітіна Т.Б. та ін. Метод синтезу замкнених систем активного екранування магнітного поля повітряних ліній електропередачі. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 8–10.

69. Пристрій екранування магнітного поля лінійного струмонесучого джерела: пат. 118352 Україна: МПК H05K 7/00, G12B 17/02; заявл. 19.12.2016; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 4 с.

70. Панова О.В., Тихенко О.М., Ніколаєв К.Д., Ходаковський О.В., Сапельнікова О.Ю. Дослідження захисних властивостей металевих електромагнітних екранів та визначення умов їх максимальної ефективності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Вип. 5(57). С. 103−107.

71. Глива В.А., Панова О.В., Тихенко О.М., Левченко Л.О., Колумбет В.П. Дослідження амплітудно-частотних залежностей захисних властивостей магнітних

екранів на основі аморфних сплавів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. Вип. 6(58). С. 102−107.

72. Електромагнітний екран з вибірковим поглинанням: пат. 103339. Україна. МПК (2015.01) H05K 9/00 G12B 17/00. №201506225; заявл. 24.06.2015, опубл. 10.12.2015. Бюл.№ 23. 4 с.

73. 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. https://doi.org/10.15407/techned2018.04.029.

74. Singh J. Computer Generated Energy Effects on Users and Shielding Interference. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2015. Vol. 3. P. 10022–10027.

75. Коваленко В.В., Глива В.А., Тихенко О.М., Лук'яненко С.О. Розрахункові методи визначення захисних властивостей електромагнітних екранів у дальній зоні електромагнітного поля. *Системи обробки інформації*. 2016. № 7 (144). С. 55–57.

76. Costa F., Genovesi S., Monorchio A., Manara G. A Circuit-based Model for the Interpretation of Perfect Metamaterial Absorbers. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. № 61. P. 1201–1209.

77. Costa F., Genovesi S., Monorchio A., Manara G. Low-Cost Metamaterial Absorbers for Sub-GHz Wireless Systems. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2014. № 13. P. 27–30.

78. Коваленко В.В., Тихенко О.М., Колумбет В.П. Інноваційні підходи до підвищення ефективності екранування високочастотних електромагнітних випромінювань. *Системи обробки інформації.* 2016. № 3 (140). С. 238–240.

79. Sedlacik M., Mrlik M., Babayan V., Pavlinek V. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. *Composite Structures*. 2016. Vol. 135. P. 199–204.

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

81. Коваленко В.В., Тихенко О.М. Методологія визначення захисних властивостей електромагнітних екранів. *Теорія і практика будівництва.* 2015. Вип. 16. С. 11–14.

82. 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.

83. Kolcunová I., Zbojovský J., Pavlík M., Bucko S., Labun J., Hegedus M., Vavra M., Cimbala R., Kurimský J., Dolník B., Petráš J., Džmura J. Shielding Effectiveness of Electromagnetic Field by Specially Developed Shielding Coating. *Acta Physica Polonica, A*. May 2020, Vol. 137 Issue 5, p. 711-713. http://doi.org/10.12693/APhysPolA.137.711

84. Градієнтний електромагнітний екран Пат. 144619, Україна МПК G12B 17/00 (2020.01). № 2020 03224; заявл. 28.05.2020; опубл. 12.11.2020, Бюл. № 19. 4 с.

85. Бурдейна Н.Б., Бірук, Я.І., Ніколаєв К.Д. (2023). Розроблення матеріалів багатошарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій для екранування електромагнітних полів. *Екологічна безпека та природокористування,* 45 (1), 68–75. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.68-75 36

86. Спосіб виготовлення градієнтного композиційного електромагнітного екрана: пат. 153982, Україна: МПК 2023.01, G12B17/00 G12B17/02 (2006.01). № 202300789

87. 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.

88. 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 October 2019 Kyiv, Ukraine. Kyiv, 2019. С. 202−206.

89. Текстильний матеріал для екранування електромагнітного поля пат. 138019 Україна: МПК G12B 17/00; заявл. 23.05.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21. 3 с.

90. Багрій М.М., Левченко Л.О., Тихенко О.М., Колумбет В.П., Рєзнік 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.

91. Тихенко О.М., Багрій М.М., Левченко Л.О., Ходаковський О.В., Рєзнік Д.В. Розроблення та дослідження захисних властивостей металотекстильних електромагнітних екранів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. Покровськ. 2019. Вип. № 1(44). С. 100−106.

92. Панова О.В., Халмурадов Б.Д., Ходаковський О.В., Азнаурян І.О. Металополімерний матеріал на текстильній основі для захисту від електромагнітних впливів. Науково технічний збірник «*Містобудування та територіальне планування».* 2019. Вип. № 70, С.454–464.

93. 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.

94. 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.

95. 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.

96. 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

97. Панова О.В., Бірук Я. І., Бесараб О.М., Корміліцин Я.І. Дослідження новітніх покриттів з екрануючими властивостями власного виробництва *Містобудування та територіальне планування*: Наук.-техн. збірник / Головн. ред. М.М. Дьомін. – К., КНУБА, 2021. – Вип. 77. – С. 369 – 378

98. Бурдейна Н. Б., Бірук Я. І. (2022) Засоби підвищення ефективності рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. Т 4(70) – С. 138-141. – doi: 10.26906/SUNZ.2022.4.138

99. Панова О.В., Бірук Я.І. Засади розроблення рідких сумішей для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Всеукраїнський науково-технічний журнал «*Вісті донецького гірничого інституту*», Вип. 1(50) 2022. с. 108-113 https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-108-113

100. Бірук, Я.І. (2022). Designing finishing materials with a gradient of electrophysical properties. *Екологічна безпека та природокористування*, 43(3), 73–80. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.73-80

101. Glyva V., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Radomska M. The composite facing material for electromagnetic felds 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

102. ShuoLiu, Yaxi Cheng, Wanui Xiao et. al. Tuning Oxygen Vacancy Concentration in Defect-EngineeredBlack TiO 2 Nanomaterials for Synergistically

Enhanced Microwave AbsorptionPerformance. ACS Appl. Nano Mater. 2025 . Vol.8 , Issue45 . P.21938–21947. https://doi.org/10.1021/acsanm.5c03969

103. Xia, T.,Zhang, C., Oyler, N.A., & Chen, X. Hydrogenated TiO2 nanocrystals: a novelmicrowave absorbing material. Adv. Mater. 2013. 25(47). P. 6905-6910. https://doi.org/10.1002/adma.201303088

104. Zhang, H.,Zhao, Y., Yang, X., Zhao, G., Zhang, D., Huang, H., Yang, S., Wen, N., Javid,M., Fan, Z. & Pan, L. A facile synthesis of novel amorphous TiO2 nanorodsdecorated rGO hybrid composites with wide band microwave absorption. Nanomaterials.2020. 10(11). P.2141. https://doi.org/10.3390/nano10112141

105. Xu, J.,Qi, X., Luo, C., Qiao, J., Xie, R., Sun, Y., Zhong, W., Fu, Q. & Pan, C.Synthesis and enhanced microwave absorption properties: a strongly hydrogenatedTiO2 nanomaterial. Nanotechnology. 2017. 28(42). P. 425701. https://doi.org/10.1088/1361-6528/aa81ba

106. G. Krasnianskyi, V. Glyva, N. Burdeina, Y. Biruk, L. Levchenko, O. Tykhenko. 2024. Methodology For Designing Facing Building Materials with Electromagnetic Radiation Shielding Functions. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CONSERVATION SCIENCE*. Volume 15, Special Issue 1, 2024: 53-62. DOI: 10.36868/IJCS.2024.SI.05

107. G. Kochetov, D. Samchenko, O. Lastivka. Методологічні засади розроблення рідких сумішей для екранування електромагнітних полів. (2023). *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2 (72), https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.183

108. Касаткіна Н. В., Тихенко О. М., Панова О. В., Бірук Я. І. Підвищення ефективності композиційних електромагнітних екранів регулюванням морфології феромагнітного наповнювача. «*Системи управління навігації та зв'язку*», - 2020. Вип. № 3(61), С. 115-119. doi: 10.26906/SUNZ.2020.3.115

109. Бірук Я.І.. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів із застосуванням рідинних екрануючих матеріалів: дис. … доктор філософії: 263. Київ, 2024. 137 с.

110. Krivenko, P., Kovalchuk, O. (2020). Influence of type of alkaline activator on durability of alkali activated concrete using aggregates capable to alkali-silica reaction. *Key Engineering Materials*, 864, 180–188. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.864.180

111. Панова О. В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. … канд. техн. наук: 05.26.01. Київ, 2014. 151 с.

Додаток А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus)

1. 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

Статті у наукових фахових виданнях України

2. Biruk, Y., & Klymchuk, A. (2024). Засади проєктування неоднорідних електромагнітних екранів. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 3(77), 199-202. https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.3.199

3. Я. І. Бірук, А. В. Климчук (2025). Дослідження умов максимальної ефективності перфорованих електромагнітних екранів. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 1(79), 162-164, doi: 10.26906/SUNZ.2025.1.162

4. Бірук Я. І., Шаманський С. Й., Климчук А. В. Дослідження ефективності електромагнітних екранів резонансного типу. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2(80), 2025, с. 218-221, doi: 10.26906/SUNZ.2025.1.218-221

Публікації у інших виданнях України

5. Бірук Я. І., Климчук А. В. Неоднорідні широкосмугові матеріали для екранування електромагнітних полів. Тези доповідей міжнародної науково-методичної конференції «Захист населення, територій та об'єктів критичної

інфраструктури – освіта, наука, практика»: НАУ, Київ, Україна, Лечче, Італія, 23 - 24 травня 2024 року – С.28.https://dspace.nau.edu.ua/handle/NAU/63629

6. Y. Biruk, L. Zozulya, A. Klymchuk Means of increasing the efficiency of shielding electromagnetic fields by heterogeneous building materials. REPORTS of the 5th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, November 27-29, 2024, KYIV, p. 105

7. Я.І. Бірук, А.В. Климчук. Я.О. Галонько. Засоби нормалізації фізичних чинників середовища сховищ цивільного захисту. V Міжнародна науково-практична конференція «БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ: МАТЕРІАЛИ ТА КОНСТРУКЦІЇ, с.134-135. https://drive.google.com/drive/folders/1YLiRwHBMwHuCRTH22OXjKjeQqOx6b279?usp=sharing

8. Yana Biruk, Andrii Klymchuk, Serhii Zozulya, Georgiy Suraichenko. Innovative means of shielding wide-frequency-range electromagnetic fields. REPORTS of the 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ENERGY. RESOURCES. ECOLOGY, December 3-5, 2025, KYIV, p. 73-74

Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

ТОВ «Територіальна Сервісна Компанія»

Директор _____ Олександр ГІМПЛЮК

АКТ

впровадження результатів досліджень ефективності екранування електромагнітних полів неоднорідними захисними матеріалами

Цей акт складений на підтвердження того, що результати розроблення і дослідження ефективності екранування електромагнітних полів було впроваджено на підприємстві ТОВ «Територіальна Сервісна Компанія».

За результатами електромагнітного моніторингу з використанням повірених приладів ПЗ-50 та ПЗ-31 було встановлено наближення та перевищення магнітних полів промислової частоти та електромагнітних полів частот бездротового зв'язку у певних зонах підприємства. Вимірювання здійснювалося у години максимального навантаження на силову електромережу й максимальних кількостей підключень до засобів зв'язку. З метою зниження електромагнітних впливів на персонал і відвідувачів було застосовано екранування магнітних та електромагнітних полів. Зокрема, з використанням електротехнічних сталей класу 121 було здійснено екранування вбудованого силового трансформатора сухого типу та розподільчих щитів на поверхах будівлі. Контрольні вимірювання показали, що коефіцієнт екранування у напрямках перебування людей складали 4,3–4,7 за напруженістю магнітного поля промислової частоти. Напруженість магнітного поля частотою третьої гармоніки промислової частоти знижувалася у 2,3–5,6 разів у різні години доби у залежності від кількості електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками, які були ввімкнені у силову електромережу. З

використанням композиційного полімерного матеріалу на основі карбонільного заліза було здійснено повне екранування сервера підприємства. У результаті взаємопроникнення електромагнітних полів і випромінювань ліквідовано повністю (на межі чутливості вимірювальних пристроїв). З урахуванням діаграм спрямованості було здійснено часове екранування джерел електромагнітних полів частот бездротового зв'язку. Вимірюванням встановлено, що щільності потоків енергії зменшилися з пікових 12–14 мкВт/см² до 0,2–0,3 мкВт/см², що залишає сигнал достатній для безперебійного функціонування засобів зв'язку.

Впровадження здійснено на безоплатній основі, а цей акт не є підставою для висування економічних претензій.

Директор _____ Олександр ГІМПЛЮК

ТОВ «Територіальна Сервісна Компанія»

Додаток В

МОН
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

просп. Повітряних Сил, 31,
м. Київ, 03037
тел.: +38 (044) 248-32-65,
e-mail: knuba@knuba.edu.ua,
web: knuba.edu.ua
ЄДРПОУ 02070909

КНУБА

ДОВІДКА
про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційного дослідження Климчука Андрія Васильовича

Цією довідкою посвідчуємо, що результати дисертаційного дослідження **Климчука Андрія Васильовича** та тему «Захист населення та працюючих від впливу техногенних електромагнітних полів неоднорідними облицювальними матеріалами», поданого на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 263 Цивільна безпека, впроваджено у навчальний процес кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці і кафедри фізики факультету інженерних систем та екології Київського національного університету будівництва і архітектури.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес при викладанні курсу «Фізика. Фізика навколишнього середовища» спеціальностей G2 Технології захисту навколишнього середовища, E2 Екологія, та при викладанні курсу «Фізика» для здобувачів освіти спеціальностей G19 Будівництво та цивільна інженерія. Матеріали дисертаційного дослідження використовуються при підготовці докторів філософії за спеціальністю К10 Цивільна безпека при викладанні курсу «Цивільна безпека. Наукові та практичні аспекти реалізації».

На основі дисертаційного оновлено тематику лекційних і практичних занять.

Результати дослідження мають практичне значення для професійної підготовки фахівців у сфері цивільної безпеки будівництва і цивільної інженерії.

Проректор з НМР Андрій ШПАКОВ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ Ідентифікаційний код 02070909

№1774/52-21/3/26 від 23.06.2026