

Київський національний університет будівництва і архітектури
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БІРУК ЯНА ІГОРІВНА

УДК 537.87:669.162.12(045)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЗАХИСТ ПРАЦЮЮЧИХ ВІД ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ РІДИННИХ ЕКРАНУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ**

263 – Цивільна безпека

26 – Цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Я.І. Бірук

Науковий керівник: Бурдейна Наталія Борисівна,
кандидат педагогічних наук, доцент

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Бірук Я.І. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів із застосуванням рідинних екрануючих матеріалів. – 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, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної задачі підвищення електромагнітної безпеки працюючих шляхом визначення умов, за яких рідкі екрануючі матеріали проявляють свою максимальну ефективність, а також розроблення і реалізації матеріалів на рідинній основі та технологій, що ефективно екранують електромагнітні поля в широкому діапазоні частот.

Проаналізовано існуючі методи забезпечення електромагнітної безпеки працюючих. Визначено, що найбільш ефективним засобом захисту людей від електромагнітних впливів є екранування електромагнітних полів. Головними вимогами до захисних матеріалів є високі коефіцієнти загального екранування, малі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль, прийнятні масогабаритні параметри і придатність до облицювання поверхонь великих площ і складних конфігурацій.

Розроблено та досліджено захисні властивості рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів у широкому частотному діапазоні. Перевагами таких сумішей є можливість забезпечення потрібних коефіцієнтів поглинання і відбиття електромагнітних хвиль. Це дозволило регулюванням складу і кількістю нанесених шарів отримувати параметри матеріалів, необхідні у конкретній електромагнітній обстановці, та забезпечувати стабільну роботу засобів бездротового зв'язку.

Проведено дослідження щодо обґрунтування розроблення технологій.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

– *вперше* обґрунтовано застосування залізорудного концентрату у якості екрануючої субстанції рідких захисних сумішей на основі стандартних лакофарбових виробів. Це дозволило з ваговим вмістом залізорудного концентрату 30–60 % отримати коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти від 1,3 до 7,9; магнітного поля промислової частоти до 5,7; електричного поля промислової частоти до 8,6;

– *вперше* обґрунтовано технологію виготовлення, отримано та випробувано захисні властивості екрануючих матеріалів градієнтного типу на основі рідких композицій. Це дозволило отримати коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти 6,2–6,3 для двошарового покриття та 11–12 для тришарового покриття;

– *удосконалено* методологічні та технологічні засади створення рідких композицій. Додавання до залізорудного концентрату лускатого графіту з ваговим вмістом 5 % дозволяє підвищити коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти на 48–50 %, електричного поля промислової частоти – на 38–40 %;

– *набули подальшого розвитку* розрахункові методи визначення захисних властивостей композиційних захисних рідинних матеріалів, що дозволяє прогнозувати коефіцієнти екранування у залежності від амплітудно-частотних характеристик екранованих електромагнітних полів з ваговим вмістом екрануючого наповнювача у діелектричній матриці.

Практичне значення одержаних результатів підтверджено патентами на корисну модель. Патент 149126 Україна МПК 2021.01, G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01) «Спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей». Патент 153982 Україна МПК 2023.01, G12B 17/00 G12B 17/02 «Спосіб виготовлення градієнтного композиційного електромагнітного екрана».

Тестування розроблених захисних рідинних матеріалів було проведено у сертифікованій лабораторії з вивчення та нормування фізичних факторів

виробничого середовища Інституту медицини праці імені Ю. І. Кундієва НАМН України. Результати тестування збігаються з результатами дисертаційного дослідження у межах похибки вимірювань.

Результати дослідження були впроваджені у навчальний процес у КНУБА при навчанні фізики студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» та підготовці аспірантів зі спеціальності 263 «Цивільна безпека».

Ключові слова: електромагнітне поле, екранування, коефіцієнт екранування, коефіцієнт відбиття, захист працюючих, рідинні композиційні матеріали, електромагнітна безпека.

ABSTRACT

Biruk Y.I. Protection of workers from exposure to electromagnetic fields using liquid shielding materials.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 26 – "Civil Security", specialty 263 – "Civil Security" Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv, 2023.

The dissertation work is dedicated to solving the scientific and practical task of improving the electromagnetic safety of workers by determining the conditions under which liquid shielding materials show their maximum effectiveness, as well as the development and implementation of liquid-based materials and technologies that effectively shield electromagnetic fields in a wide range of frequencies.

The existing methods of ensuring the electromagnetic safety of workers are analyzed. It was determined that the most effective means of protecting people from electromagnetic influences is electromagnetic field shielding. The main requirements for protective materials are high coefficients of general shielding, low coefficients of reflection of electromagnetic waves, acceptable mass-dimensional parameters and suitability for facing surfaces of large areas and complex configurations.

The protective properties of liquid materials against the influence of electromagnetic fields in a wide frequency range have been developed and investigated.

The advantages of such mixtures are the ability to provide the necessary coefficients of absorption and reflection of electromagnetic waves. This made it possible to adjust the composition and number of layers to obtain the material parameters necessary in a specific electromagnetic environment to ensure stable operation of wireless communication devices.

A study was conducted on the justification of the development of technologies.

The scientific novelty of the work is that:

- *for the first time*, the use of iron ore concentrate as a shielding substance of liquid protective mixtures based on standard paint products was substantiated. This made it possible to obtain ultrahigh-frequency electromagnetic field shielding coefficients from 1.3 to 7.9 with a weight content of iron ore concentrate of 30–60%; industrial frequency magnetic field up to 5.7; industrial frequency electric field up to 8.6;

- *for the first time*, the manufacturing technology was substantiated, the protective properties of shielding materials of the gradient type based on liquid compositions were obtained and tested. This made it possible to obtain ultra-high frequency electromagnetic field shielding coefficients of 6.2–6.3 for a two-layer coating and 11–12 for a three-layer coating;

- *the methodological and technological principles* of creating liquid compositions have been improved. Adding flaky graphite with a weight content of 5% to the iron ore concentrate allows to increase the shielding coefficients of the ultra-high frequency electromagnetic field by 48–50%, the industrial frequency electric field by 38–40%;

- *calculation methods* for determining the protective properties of composite protective liquid materials have gained further development, which allows predicting the shielding coefficients depending on the amplitude-frequency characteristics of the shielded electromagnetic fields with the weight content of the shielding filler in the dielectric matrix.

The practical significance of the obtained results is confirmed by patents for a useful model. Patent 149126 Ukraine IPC 2021.01, G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01). The method of manufacturing an electromagnetic screen with a gradient of

electrophysical properties. Patent 153982 Ukraine IPC 2023.01, G12B 17/00 G12B 17/02. The method of manufacturing a gradient composite electromagnetic screen.

The testing of the developed liquid materials was carried out in the certified laboratory for the study and standardization of physical factors of the production environment of the State Institution «Kundiiev Institute of Occupational Health of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine». The test results coincide with the results of the dissertation research within the measurement error.

The results of the research were implemented in the educational process at KNUCA in the teaching of physics to students of the specialty 192 "Construction and civil engineering" and the training of graduate students in the specialty 263 "Civil safety".

Keywords: electromagnetic field, shielding, shielding coefficient, reflection coefficient, worker protection, liquid composite materials, electromagnetic safety.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(6-111), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>.

2. Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Nazarenko V., Burdeina N., Panova O., Bahrii M., Nikolaiev K., Biruk Y. Determining the dynamics of electromagnetic fields, air ionization, low-frequency sound and their normalization in premises for computer equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 3(10-117), pp. 47–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258939>.

Статті у наукових фахових виданнях України

3. 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»*, Збірник наукових праць. Полтава. 2020. Т. 3(61), С. 115-119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.

4. Панова О.В., Бурдейна Н.Б., Ніколаєв К.Д., Бірук Я.І. Планування та впровадження заходів з електромагнітної безпеки у промислових будівлях та спорудах. *Науково-технічний журнал «Вісті донецького гірничого інституту»*. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Покровськ. 2020. №2 (47). С. 155-161. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-155-161>.

5. Глива В.А., Кашперський В.Є., Панова О.В., Бірук Я.І., Зозуля С.В. Методологічний підхід до оцінювання ризиків впливу фізичних факторів техногенного походження в умовах невизначеності. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Збірник наукових праць. Полтава. 2021. Т. 1(63), С. 123-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.123>

6. Панова О.В., Бірук Я.І. Засади розроблення рідких сумішей для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону, *«Вісті донецького гірничого інституту»*. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Покровськ. 2022. № 1(50). С. 108-113, <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-108-113>

7. Biruk Y. Designing finishing materials with a gradient of electrophysical properties. *Екологічна безпека та природокористування*, 43(3), 2022 73–80. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.73-80>

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

9. Бурдейна, Н.Б., Бірук, Я.І., Ніколаєв, К.Д. Розроблення матеріалів

багатошарової структури градієнтного типу на основі рідких композицій для екранування електромагнітних полів. *Екологічна безпека та природокористування*, 45(1) 2023, с. 68–75. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.68-75>

Статті у інших виданнях України

10. Панова О.В., Бірук Я.І. Методологія визначення електромагнітного техногенного навантаження та шляхи їх удосконалення. *Містобудування та територіальне планування*, 2021, Вип. 76. – С. 205 – 217, DOI: 10.32347/2076-815x.2021.76.205-217

11. Панова О.В., Бірук Я. І., Бесараб О.М., Корміліцин Я.І. Дослідження новітніх покриттів з екрануючими властивостями власного виробництва. *Містобудування та територіальне планування*, 2021, Вип. 77. С. 369 – 378, <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.77.369-377>

12. Левченко Л.О., Осадчий Б.М., Панова О.В., Бірук Я.І. 2021. Електромагнітний екран градієнтного типу. *Науково-технічний інформаційно-аналітичний журнал «Новини енергетики»*. №4, 2021, С. 3-9.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

13. Панова О. В., Бірук Я. І. Залежність захисних властивостей композиційних електромагнітних матеріалів від морфології феромагнітного наповнювача. *Екологія. Ресурси. Енергія: тези доп. міжнар. наук.-прак. конференції*, м. Київ, 25-26 листопада 2020 р. Київ, 2020. С. 16–17.

14. Панова О. В., Бірук Я. І. Техногенні електромагнітні поля та випромінювання як фактор негативної дії на працюючих. *Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України: тези доп. I Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції*, м. Київ, 15 березня 2021 р. Київ, 2021. с. 25–26.

15. Бірук Я. І. Електромагнітний екран з градієнтом електрофізичних

властивостей. *Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України*: тези доп. III Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції, м. Київ, 13 жовтня 2021 р.. Київ, 2021. С.– 441.

16. Бірук Я.І. Застосування рідинних електромагнітних екранів для захисту працюючих. *56-та науково-практична конференція молодих вчених «Актуальні питання гігієни праці та професійної патології»*, 23 листопада 2021 р., Київ, 2021 р. с. 14-15

17. Матвеева І. В., Бірук Я. І., Азнаурян І. О. Рідкі захисні композиції для екранування електромагнітних випромінювань радіотехнічних об'єктів аеродромів цивільної авіації. *Авіація у XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології*: матеріали X Всесвітнього конгресу, м. Київ, 28-30 вересня 2022 р. Київ, 2022, с. 4.1.19–4.1.21.

18. Бурдейна Н. Б., Бірук Я. І. Методичні засади автоматизації проектування рідких композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів. *Проблеми інформатизації*: тези доп. X міжнар. наук-техн. конф., м. Черкаси 24- 25 листопада 2022 р.. Черкаси, 2022. с. 102.

19. Бурдейна Н. Б., Бірук Я. І. Використання рідких композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів промислової частоти, дуже високих та ультрависоких частот. *Екологія. Ресурси. Енергія*: тези доп. міжнар. наук.-прак. конференції, м. Київ, 23-25 листопада 2022 р. Київ, 2022. с. 82–83.

20. Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І. Екранування електромагнітних полів екологічно чистими багатошаровими рідкими композиційними матеріалами градієнтного типу. II Міжнародна науково-практична конференція «*Green Construction*» 13-14 квітня 2023 р. КНУБА, Київ 2023, с. 411-414.

Авторські свідоцтва, дипломи, патенти.

21. Спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей: пат. 149126, Україна: МПК 2021.01, G12B 17/00, G12B 17/02. № 202102561; заявл. 17.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42. 4 с.

22. Спосіб виготовлення градієнтного композиційного електромагнітного екрана: пат. 153982, Україна: МПК 2023.01, G12B 17/00 G12B 17/02, № 202 3 00789, заявл. 28.02.2023, опубл. 27.09.2023, Бюл.№ 39, 4 с.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	13
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ТА РОЗРОБОК ЩОДО ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ.....	20
1.1. Вплив електромагнітних полів техногенного походження на біологічні об'єкти.....	20
1.2. Аналіз нормативної бази з електромагнітної безпеки.....	21
1.3. Існуючі заходи і засоби захисту працюючих і населення від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону.....	24
1.4. Оцінка сучасного стану питання та постановка завдань досліджень.....	37
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І МЕТОДИКИ ВИМІРЮВАННЯ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	39
2.1. Особливості вимірювання рівнів електричних, магнітних та електромагнітних полів у виробничих та побутових умовах.....	39
2.2. Особливості визначення захисних властивостей коефіцієнтів екранування захисних матеріалів для екранування електромагнітних полів.....	42
2.3. Розрахункова оцінка захисних властивостей композиційних матеріалів у процесі їх розроблення.....	48
Висновки до розділу 2.....	52
РОЗДІЛ 3. ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МАКСИМАЛЬНИХ ЕФЕКТИВНОСТЕЙ.....	54
3.1. Матеріали та технології виготовлення захисних композицій.....	54
3.2. Визначення коефіцієнтів екранування однорідних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.....	62

3.3. Дослідження коефіцієнтів екранування матеріалів з градієнтом електрофізичних властивостей.....	74
3.4. Розрахункові методи прогнозування захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.....	79
Висновки до розділу 3.....	84
РОЗДІЛ 4. ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ ЯК СКЛАДОВА ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ БЕЗПЕКИ.....	86
4.1. Особливості розроблення заходів і засобів забезпечення електромагнітної безпеки працюючих.....	86
4.2. Електромагнітні екрани у комплексі заходів з безпеки фізичних факторів техногенного походження.....	93
4.3. Порядок визначення техногенного електромагнітного навантаження на середовище та розроблення організаційно-технічних заходів з його нормалізації.....	95
4.4. Пропозиції щодо вдосконалення національної нормативно-правової бази з електромагнітної безпеки.....	103
4.5. Впровадження результатів досліджень та їх ефективності.....	105
Висновки до розділу 4.....	108
ВИСНОВКИ.....	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113
ДОДАТОК А.....	134
ДОДАТОК Б.....	137

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ISO	– International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації
МОП	– Міжнародна організація праці
НВЧ	– Надвисокі частоти
ДСНіП	– Державні Санітарні Норми і Правила
ЕМВ	– Електромагнітне випромінювання
ЕМП	– Електромагнітне поле
ВООЗ	– Всесвітня організація охорони здоров'я
K_v	– Коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі
K_e	– Коефіцієнт екранування електромагнітного поля
K_n	– Коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії
ОЗБП	– Охорона здоров'я та безпеки праці
СУОП	– Система управління охороною праці
СУОПП	– Система управління охороною праці на підприємстві
ЗІЗ	– Засоби індивідуального захисту
УВЧ	– Ультрависокі частоти
ГДР	– Гранично допустимі рівні
НЗВЧ	– Надзвичайно високі частоти

ВСТУП

Актуальність теми. В останні роки, як в Україні, так і в усьому світі спостерігається стійке підвищення електромагнітного навантаження на виробниче, побутове середовище і довкілля в цілому. Це пояснюється підвищенням кількості та ущільненням розміщення електричного та електронного обладнання в будівлях і спорудах, підвищенням навантаження на силові мережі електроживлення, збільшенням інтенсивності та розширення частотного спектра усіх видів бездротового зв'язку. Це вимагає удосконалення комплексу організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки. Особливістю сучасного етапу розвитку галузі цивільної безпеки України є поступова імплементація загальноєвропейських нормативів у національну нормативну базу, зокрема Європейської директиви з електромагнітної безпеки працюючих і населення Directive 2013/35/EU. Це обумовлює необхідність удосконалення заходів і засобів захисту людей від електромагнітних впливів. Найефективнішим з них є екранування електромагнітних полів захисними матеріалами. В умовах підвищення частки високочастотних електромагнітних полів у загальне навантаження на середовище традиційні металеві матеріали мають суттєвий недолік – великі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль. У таких умовах найбільш ефективними є композиційні матеріали з малими коефіцієнтами відбиття та великими коефіцієнтами поглинання. Недоліками полімерних композитів є складність технологій вироблення, велика товщина, великі масогабаритні параметри та висока собівартість екрануючих компонентів, а також схильність до деградації у процесі експлуатації. Цих недоліків частково позбавлені захисні композиції на рідинній основі. Але існуючі захисні суміші призначені, в основному, для екранування електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. У більшості вони мають високу собівартість через значну вартість екрануючих наповнювачів. Нагальною потребою є розроблення, дослідження захисних властивостей і впровадження екрануючих композицій на рідких основах, ефективних у широкому частотному діапазоні. Перевагами таких сумішей є

можливість забезпечення потрібних коефіцієнтів поглинання і відбиття електромагнітних полів. Це дозволить регулюванням складу і кількістю шарів отримувати параметри, необхідні у конкретній електромагнітній обстановці із забезпеченням стабільної роботи засобів бездротового зв'язку. Наведе свідчить про необхідність проведення досліджень щодо обґрунтування розроблення технологій виготовлення і випробування інноваційних матеріалів на рідинній основі для захисту електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Це обумовлює тему дисертаційного дослідження як актуальне науково-прикладне завдання.

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», «Розроблення комплексу моделей багатокритеріальної еколого-економічної оцінки і оптимізації чинників впливу на довкілля авіаційних підприємств в Україні. № 0120U102030.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є забезпечення електромагнітної безпеки працюючих та населення шляхом екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Завдання:

- проаналізувати існуючі заходи та засоби забезпечення електромагнітної безпеки;
- проаналізувати ефективність існуючих екрануючих матеріалів, їх переваги та недоліки;
- обґрунтувати та розробити технологію виготовлення рідких екрануючих сумішей на основі стандартних лакофарбових матеріалів;

- дослідити загальні коефіцієнти екранування та внесок у захисні властивості відбиття рідких екрануючих матеріалів за їх різного складу та технологій виготовлення;

- розробити систему організаційно-технічних засобів із застосуванням екрануючих матеріалів у виробничих та побутових умовах.

Об’єкт дослідження – екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону композиційними захисними матеріалами.

Предмет дослідження – залежності ефективності екранування (коефіцієнтів поглинання електромагнітної енергії та коефіцієнтів відбиття електромагнітних хвиль) від амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів та від технологій виготовлення композиційних матеріалів.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- вперше обґрунтовано застосування залізорудного концентрату у якості екрануючої субстанції рідких захисних сумішей на основі стандартних лакофарбових виробів. Це дозволило з ваговим вмістом залізорудного концентрату 30–60 % отримати коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти від 1,3 до 7,9; магнітного поля промислової частоти до 5,7; електричного поля промислової частоти до 8,6;

- вперше обґрунтовано технологію виготовлення, отримано та випробувано захисні властивості екрануючих матеріалів градієнтного типу на основі рідких композицій. Це дозволило отримати коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти 6,2–6,3 для двошарового покриття та 11–12 для тришарового покриття;

- удосконалено методологічні та технологічні засади створення рідких композицій. Додавання до залізорудного концентрату лускатого графіту з ваговим вмістом 5 % дозволяє підвищити коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти на 48–50 %, електричного поля промислової частоти – на 38–40 %;

– набули подальшого розвитку розрахункові методи визначення захисних властивостей композиційних захисних рідинних матеріалів, що дозволяє прогнозувати коефіцієнти екранування у залежності від амплітудно-частотних характеристик екранованих електромагнітних полів з ваговим вмістом екрануючого наповнювача у діелектричній матриці.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблені рідкі композиції виготовляються зі стандартних компонентів, що знижує собівартість кінцевого продукту і робить його придатним для облицювання поверхонь великих площ та складних конфігурацій;

– керованість коефіцієнтів екранування рідких сумішей дозволяє знизити електромагнітне навантаження на середовище перебування людей із збереженням стабільної роботи засобів бездротового зв'язку;

– малі коефіцієнти відбиття дозволяють уникнути критичного перерозподілу електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот у приміщеннях і будівлях. Застосування рідких екрануючих сумішей дозволяє підвищити електромагнітну сумісність і стабільність роботи електричного та електронного обладнання, зокрема чутливої медичної діагностичної апаратури, електронного обладнання зв'язку, комп'ютерної техніки тощо.

Отримано патент 149126 Україна МПК 2021.01, G12B 17/00, G12B 17/02 (2006.01) «Спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей». Патент 15382 Україна МПК 2023.01, G12B 17/00 G12B 17/02 «Спосіб виготовлення градієнтного композиційного електромагнітного екрана».

Особистий внесок здобувача. Основні науково-практичні результати досліджень, наведені в дисертації, отримані автором особисто. В опублікованих працях [1], [6], [8] представлено ідеї щодо застосування вагового вмісту екрануючого наповнювача у діелектричній матриці; [2] – визначення необхідної ефективності екранів для зниження рівнів електромагнітних полів комп'ютерної техніки; [3], [9], [11], [12] – дослідження зразків захисних матеріалів для

екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону; [4], [5] – визначення специфіки оцінювання ризиків від впливу електромагнітних полів; [10] – ідеї щодо розроблення алгоритму оцінювання електромагнітного навантаження на підприємстві.

Апробація результатів дослідження.

Результати досліджень доповідалися на:

1. Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія». Україна, Київ, 25–26 листопада 2020 р.
2. I Міжнародній науково-практичній онлайн-конференції «Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України», Київ, 15 березня 2021 р.
3. III Міжнародній науково-практичній онлайн-конференції «Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України», Київ, 13 жовтня 2021 р.
4. 56-тій науково-практичній конференції молодих вчених «Актуальні питання гігієни праці та професійної патології», Київ, 23 листопада 2021 р.
5. X Всесвітньому конгресі "Авіація у XXI столітті" – «Безпека в авіації та космічні технології», Київ, 28–30 вересня 2022 р.
6. Десятій Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації», Черкаси, 24–25 листопада 2022 р.
7. Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія». Україна, Київ, 23–25 листопада 2022 р.
8. Міжнародній науково-практичній конференції «Green Construction», Київ, 13–14 квітня 2023 р.

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 22 наукових працях, серед яких 2 статті у наукометричній базі «SCOPUS», 7 статей у наукових фахових періодичних виданнях рекомендованих Міністерством освіти і науки України; 3 статті у інших виданнях України, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів наукових конференцій, 2 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 137 сторінок, з них: 112 сторінок основного тексту, список використаних джерел із 153 найменувань на 21 сторінці; 2 додатків на 4 сторінках.

РОЗДІЛ 1

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

1.1. Вплив електромагнітних полів техногенного походження на біологічні об'єкти

У програмних документах і доповідях міжнародних організацій, зокрема Всесвітньої організації охорони здоров'я наголошено, що електричні, магнітні та електромагнітні поля можуть викликати несприятливі зрушення у здоров'ї людей [1, 2]. У роботах [3–5] показано, що високі рівні щільності потоків енергії високочастотних полів за хронічної дії може призводити до уражень нервової та серцево-судинної систем, зокрема у віддалених наслідках появ ішемічної хвороби серця, розвиток атеросклерозу, хвороб Альцгеймера та Паркінсона, патології вагітності та вроджених вад дітей, батьки яких піддавалися електромагнітним впливам. У роботах [6, 7] показано можливість змін у центральній нервовій системі під впливом магнітного поля промислової частоти. Великі амплітуди електричних і магнітних полів викликають зміни рівнів гемоглобіну і негативні зрушення імунної системи. Працівники, які протягом робочих змін перебувають під впливом електричних та магнітних полів промислової частоти на енергетичних об'єктах мають статистично встановлені зміни артеріального тиску. У роботах [8, 9] надано дещо суперечливі дані щодо впливу на здоров'я людей електромагнітних полів визначених частот. Певні розбіжності даних спостерігаються у багатьох наукових дослідженнях, що крім іншого може пояснюватися синергетичними ефектами [10]. Тому, враховуючи певні невизначеності ВООЗ до отримання більш статистично достовірних значень рекомендувала до впровадження принцип ALAR (as low as reasonably – настільки низький, наскільки це розумно досяжно). Даний принцип застосовується до варіанту ALARP (настільки низького, наскільки це практично можливо) у розвинених країнах, який стверджує, що розумно досяжний рівень

ризик, настільки низький, наскільки практично досяжний, повинен бути встановлений з урахуванням суспільних факторів. Тобто, за технічної та економічної можливості ВООЗ рекомендує максимальне зниження впливу на людей електромагнітних полів усіх частотних діапазонів.

1.2. Аналіз нормативної бази з електромагнітної безпеки

Не дивлячись на рекомендації ВООЗ щодо впровадження принципу ALAR у реальних виробничих та побутових умовах необхідна регламентація гранично допустимих значень електромагнітних полів усіх діапазонів частотних смуг або окремих частот. В Україні у 2023 році прийняті вимоги Європейської директиви [11] з електромагнітної безпеки. Вони імплементовані у нормативно-правову базу України у вигляді мінімальних умов [12]. Але процес удосконалення нормативної бази потребує певного часу. Тому в Україні залишаються чинними інші санітарні норми з електромагнітної безпеки. Це пояснюється тим, що у додатку (обов'язковому) до директиви розглядаються гранично допустимі рівні електромагнітних полів як для працюючих, так і для населення. В Україні такі санітарні норми окремі. Так, у нормативі [13] регламентуються електромагнітні поля частот мобільного зв'язку (ГДР – 100 мкВт/см^2). Але у санітарних нормах для виробничих умов [14] граничні рівні набагато нижчі ($10\text{--}25 \text{ мкВт/см}^2$), і змін до цих нормативів навіть не планується. Перевагою нормативу [13] є те, що він вимагає при плануванні забудови та при розміщенні обладнання уникати перевипромінювання внаслідок відбиття. Це, зокрема обумовлює необхідність створення захисних матеріалів з малими коефіцієнтами відбиття. Щодо цих двох розглянутих санітарних норм то розбіжності існують навіть у частині розрахунку сумарного електромагнітного навантаження на середовище. Так у [13] сума відношень у кожній частоті або частотній смузі фактичних значень поля до граничних не повинна перевищувати одиниці. А у нормах [14] одиниці не повинна перевищувати сума відношень квадрата фактичного значення до квадрата

граничних значень. Очевидно, що такі підрахунки дають різні підсумкові значення. Існують значні розбіжності щодо визначення сумарного електричного навантаження на людину. Наприклад, в Україні в обох цих нормах енергетичне навантаження вимірюється в $(\text{В/м})^2 \cdot \text{год}$ та $(\text{А/м})^2 \cdot \text{год}$. Для вищих частот, оцінювання впливу на людей здійснюється за щільністю потоку енергії (Вт/м^2) та енергетичним навантаженням ($\text{мкВт} \cdot \text{год/см}^2$). У той час, як у додатку до Європейської директиви [15] навантаження на людей визначається в одиниці SA та SAR питомі поглинені потужності та питомі поглинені енергії (Вт/кг та Дж/кг).

Перевага того чи іншого нормування дискусійна. Наприклад, проблематичним є вимірювання приладами поглинутих доз. Існує багато метрологічних розбіжностей щодо визначення фактичних значень електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот з точки зору похибок у різних точках діаграм спрямованості випромінювачів [16]. Не дивлячись на те, що цим проблемам приділялося багато уваги змін не проведено [16–18]. Вимоги закладені у санітарні норми забудови населених пунктів [19] не внесено змін щодо допустимих рівнів і оцінювання навантажень на середовище. Відомо [20] що організація систем електроживлення критично впливає на рівні електромагнітних полів. Однак правила влаштування електроустановок [21] дозволяють крім основного захисного провідника (захисна нейтраль) використовувати природний заземлювач. Але за наявності двох заземлювачів автоматично підвищується електромагнітний фон. У державних будівельних нормах [22, 23] електромагнітна безпека згадується тільки у контексті відповідності напруженостей електричних полів, які повинні відповідати нормативу [14] магнітні поля та електромагнітні поля не згадуються. Не дивлячись на те, що у висотних будівлях передбачені вбудовані трансформатори екранування магнітного поля генероване ними не передбачається і не регламентується. В Україні у 2017 році документом [24] методом підтвердження набули чинності низка міжнародних стандартів з електромагнітної сумісності технічних засобів [25–31]. Їх вимоги досить жорсткі щодо емісійних властивостей і стійкостей до зовнішніх полів. Тому вони не

корелюють з чинними вимогами щодо рівнів електричних, магнітних та електромагнітних полів. Окремо слід звернути увагу на міжнародні нормативи щодо роботи з комп'ютерною технікою [32–35]. У багатьох випадках регламентовані рівні електромагнітних полів для користувачів засобів обчислювальної техніки недосяжні [36]. Тому приміщення з такими робочими місцями необхідно додатково екранувати. Але регламентація застосування електромагнітних полів у чинних нормативних актах незадовільна. Так у [13] крім необхідності застосування будівельних матеріалів з екранувальними властивостями рекомендується покриття заземленою металевією сіткою, що ніяким чином не захищає від магнітних полів промислової частоти. А розмір комірки сітки може бути таким, що пропускає високочастотне електромагнітне поле. У нормативі [14] щодо екранування електромагнітних полів є рекомендація застосовувати екранування джерел випромінювання відбивальними екранами. Щодо полів частотами 50 Гц та 1 кГц – 300 МГц рекомендується екранами виготовленими з алюмінію та його сплавів, міді та сплавів, пермалою та виготовлених з них сіток. Але усі ці матеріали мають високі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль і не захищають від впливу магнітного поля. Винятком є пермалой з великою відносною магнітною проникністю, але його захисні властивості критично залежать від деформацій [37, 38]. Деформація пермалою у 18 % у 20 разів знижує значення відносної магнітної проникності. Найбільш ефективні металеві матеріали – аморфні сплави не розглядаються. У чинних нормативах також не фігурують композиційні захисні матеріали будь-яких складів і конструкцій.

Наведене потребує визначення коефіцієнтів екранування сучасних захисних матеріалів, умов їх ефективного застосування та імплементацію вимог до них до чинної нормативної бази.

1.3 Існуючі заходи і засоби захисту працюючих і населення від впливу електромагнітних полів широкого частотного діапазону

Найбільш поширеними засобами зниження впливу на людей електромагнітних полів є захист відстанню і часом. Тобто, збільшення відстані між джерелом поля і людиною та обмеження часу перебування людей під впливом електромагнітного поля. Не дивлячись на впровадження енергозощаджувальних технологій, тобто зниження енергоспоживання технічних засобів яке автоматично призводить до зниження напруженостей електромагнітних полів. Такий підхід не вирішує проблеми. Це пояснюється збільшенням кількості електричного та електронного обладнання, залученого у технологічних процесах і побуті та зменшенням площі, яка припадає на один пристрій. В цілому енерговитрати будівель і споруд будь-якого призначення збільшуються. Обмеження часу перебування людей під впливом наднормативних напруженостей електромагнітних полів можливе тільки у специфічних виробничих умовах, що регламентується відповідними нормативами [14]. У побутових умовах такий підхід практично не можливий. Електромагнітні поля наднизької частоти та дуже високих і вищих частот мають різні джерела і закономірності поширення, тому дослідження щодо їх впливу на людей зазвичай виконуються окремо. Не дивлячись на велику кількість досліджень у цих напрямках результати не завжди задовільні та однозначні. У роботах [39, 40] досліджено рівні магнітних і електричних полів повітряних ліній електропередач, зокрема показано перевищення гранично допустимих рівнів повітряних ліній високої напруги за межами санітарно-захисних зон. Одним з заходів зниження впливу цих полів є конструктивне рішення щодо взаємного екранування магнітних полів окремих фаз і дротів у розщеплених фазах [41]. Це особливо важливо виходячи з підвищення впливу високовольтних ліній на людей і отримання нових даних щодо зрушень у здоров'ї [42, 43]. Такий підхід для повітряних ліній запропоновано у [44]. Проведене моделювання дозволяє знизити рівні електричних та магнітних полів повітряних ліній варіаціями діаметрів дротів,

кроку розчеплення, стріли провисання, взаємного розташування фаз тощо. В останні роки як в усьому світі, так і в Україні набули поширення підземні високовольтні кабельні лінії. Генеровані ними магнітні поля значно нижче за поля повітряних ліній, але у багатьох випадках над поверхнею землі є перевищення гранично допустимих значень [45, 46] регламентованим чинним нормативом [47]. Знизити рівні цих полів також можливо за рахунок конструктивних рішень – взаємного розташування фаз, заземлення оплітки тощо [48]. Перевагою дослідження є використання стандартного розрахункового апарату [47]. Ефективним засобом зниження магнітного поля кабельної лінії є двостороннє заземлення екранів кабелів. Значна увага щодо електромагнітної безпеки приділяється об'єктам енергетики та розподільчим пристроям. У дослідженнях [49, 50] надано експериментальні дані щодо електромагнітної безпеки об'єктів електрогенерації. Зокрема, показано перевищення гранично допустимих рівнів на робочих місцях навіть головних щитів керування. Це ж стосується відкритих розподільчих пристроїв [51]. Пропонується екранувати принаймні магнітну складову електромагнітного поля промислової частоти. Але таке екранування за умови геометричної незамкненості малоефективне. Особливістю сучасного етапу розвитку електротехніки та електроніки є нелінійність вольт-амперних характеристик сучасного обладнання. Це обумовлене застосуванням електронних систем керування електроприладом, застосування імпульсних блоків живлення тощо. У результаті у силовій мережі з'являються гармоніки електричного струму промислової частоти, кратні трьом. Дослідження показали, що магнітні поля, які генеруються електрострумами гармонік мають гігієнічно значущі рівні [52, 53]. У дослідженнях [54, 55] показано можливість керування електромагнітною обстановкою з урахуванням наявності гармонік та інтергармонік. Найефективнішим з них методом керування є придушення гармонік та інтергармонік електрострумів промислової частоти. Для цього попередньо визначається гармонічний склад електричного струму у діючій електромережі [56]. Також одним з джерел підвищення електромагнітного фону у приміщеннях є

електроструми витоку [57, 58]. У загальному випадку наявність таких струмів обумовлюється хибами у монтажі електромережі або експлуатаційними помилками. Але з точки зору електромагнітної безпеки таке явище необхідно попередньо реєструвати та вживати заходів [59]. В умовах модернізації або відновлення підприємств що є актуальним для України первинний монтаж обладнання доцільно здійснювати на основі оцінювання поширення електричних та магнітних полів. Це доцільно реалізовувати на основі моделювання поширення полів [60–62]. Первинною задачею є ідентифікація електромагнітного поля за усіма показниками та визначення методології моделювання [63, 64]. Найбільш прийнятними є чисельні методи моделювання [65, 66] щодо структур поля (особливо це стосується локалізованих у просторі джерел електричних та магнітних полів) то у роботах [67, 68] показано що будь-яке джерело магнітного поля може бути комбінацією джерел дипольного, квадрупольного полів тощо. Ці напрацювання узагальнені у роботі [69]. Такий підхід реалізовано у дослідженні [70] для повітряних ліній електропередач. Важливим аспектом є обирання зручного програмного забезпечення для зниження похибок моделювання. Найбільш поширеним професійним пакетом є пакет COMSOL [71]. Його застосування дозволяє з прийнятними похибками моделювати як внутрішні, так і зовнішні поля електротехнічного обладнання [72]. В останні десятиліття спостерігається значне навантаження на середовище будівель і довкілля з боку електромагнітних полів дуже високих, ультрависоких і надзвичайно високих частот. При цьому є тенденція до підвищення робочих частот усіх засобів бездротового зв'язку. Розвиток мобільної мережі вимушено призвів до підвищення гранично допустимих норм щодо щільностей потоків енергії частотно вільному зв'язку з 2,5 до 100 мкВт/см². Очевидним є що це значення буде зростати в умовах відновлення мереж в Україні то переходу на стандарт 5G. Наприклад у Німеччині цей показник складає 450 мкВт/см². Це викликає підвищену увагу до визначення електромагнітного навантаження на середовище та території з метою оптимізації цих впливів [73–76]. Особливостями цих впливів є неоднозначність даних щодо фактичних значень та

перерозподілів випромінювань [77–79]. Складність нормалізації рівнів електромагнітних полів у приміщенні є їх перерозподіл внаслідок відбиття та перевідбиття і вплив на стабільність роботи технічних засобів [80, 81]. На цей показник може впливати не тільки матеріали стін, покрівель будівель, а і стан поверхні землі [82, 83]. Значною мірою такий перерозподіл залежить від конструкцій і діаграм спрямованості джерел високочастотних полів [84, 85]. Саме такий перерозподіл є найбільшим і найвагомим чинником розроблення і впровадження інноваційних матеріалів для екранування електромагнітних полів. Як зазначалося у вступі найбільш ефективним методом зниження рівнів електричних, магнітних та електромагнітних полів є їх екранування захисними матеріалами. Перевагою екранування є можливість визначення гарантованого зниження поля з малою похибкою. Випробування матеріалів можливе у лабораторних умовах, що знижує загальні витрати на розроблення і впровадження організаційно-технічних заходів з електромагнітної безпеки. Металеві матеріали мають високі коефіцієнти екранування, але щодо високочастотних полів, то більшість внеску у цей коефіцієнт дають відбиття електромагнітних хвиль, що є наслідком перерозподілу інтенсивності випромінювань і погіршення електромагнітної обстановки у небажаних місцях [86, 87]. Захист від електромагнітних полів доцільно використовувати у засобах індивідуального захисту, ефективність яких легко визначити [88–90]. Ефективним засобом захисту є сітчасті захисні конструкції з урахуванням кроку сітки (розміру комірки) для високочастотних випромінювань, що реалізуються у цивільній авіації [91, 92], а також для екранування електромагнітного поля уздовж повітряних ліній електропередач [93]. Також металеві конструкції ефективні для екранування електромагнітних полів вбудованих трансформаторів що дозволяється для висотних будівель [94]. Але у більшості застосувань бажана мінімізація коефіцієнтів відбиття і керованість загального коефіцієнта екранування. Це можливе на основі виготовлення композиційних матеріалів різного складу і технологій виготовлення. У загальному випадку композиційні матеріали можуть

бути виготовлені на основі макро- і мікронеоднорідності [95, 96]. Але створення суцільної конструкції з макронеоднорідностями робить конструкцію монохромною щодо поля або з вузькою смугою ефективності. Більш універсальні металополімерні композиції [97–99]. Вони достатньо технологічні та ефективні, але їх ефективність обмежується дуже високими та вищими частотами [100, 101]. Можливо розробити матеріали ефективні як в області наднизьких частот, так і у високочастотній області [102, 103]. Їх перевагами є низька ціна через застосування, наприклад, залізородного пилу, але вони мають великі масогабаритні параметри. Останнім часом виконано багато розробок і досліджень щодо розроблення захисних нанокomпозитів [104–107]. За високих споживацьких якостей їх недоліком є велика вартість через складність технології отримання нанопоповнювача, наприклад, магнітної рідини. Крім того, складні композиції з дрібнодисперсною субстанцією мають схильність до деградації у процесі експлуатації [108, 109]. Економічно доцільним є застосування нанокomпозитів для вироблення засобів індивідуального захисту [110–112]. Просочування лляного полотна магнітною рідиною на основі феромагнітних наноструктур дозволяє отримати прийнятні коефіцієнти екранування як в області наднизьких, так і ультрависоких частот. Виготовлені з них засоби індивідуального захисту можливо використовувати в електротехнічній галузі та при обслуговуванні радіотехнічних об'єктів. Але такі матеріали не прийнятні для облицювання поверхонь будівель і окремих приміщень, що в умовах збільшення електромагнітного навантаження є актуальним. Для розроблення ефективних і зручних матеріалів у загальному випадку треба виконати декілька умов: раціональні коефіцієнти відбиття і поглинання електромагнітної енергії; прийнятна вартість компонентів композиції; проста технологія виготовлення та технологічність щодо нанесення на поверхні. Частково таким вимогам відповідають металополімерні композиції [113, 114]. Але такі матеріали мають значні пружні модулі та застосовуються в основному у вигляді панелей плиток. Це ускладнює облицювання поверхонь великих площ зі складною формою. Навіть металополімерні матеріали на текстильній основі

завтовшки до 1 мм не завжди зручні у практичному застосуванні. До того ж такими матеріалами складно оптимізувати коефіцієнти екранування полів різних джерел і частотних діапазонів, наприклад для забезпечення стабільного мобільного зв'язку та роботи внутрішніх точок доступу бездротового зв'язку [115]. Найбільш зручними у практичному застосуванні є захисні матеріали на основі рідкого носія (матриці) [116, 117]. Але певним недоліком цих композицій є висока ефективність тільки у високочастотній області електромагнітного спектра і велика вартість карбонових компонентів (наприклад графітизованої сажі), які до того ж не виробляються в Україні. У дослідженні [118] рідка композиція яка забезпечує досить широкий частотний діапазон ефективності й має малу товщину. Але її компоненти теж мають високу вартість що і робить доцільним застосуванням композиції у вирішенні локальних задач, наприклад технічного захисту інформації та забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів. У той же час можливість нанесення тонким шаром (або кількома шарами) на поверхню будь-якої площі та форми робить рідкі композиції дуже перспективними з точки зору захисту людей у виробничих та побутових умовах від електромагнітних впливів.

В електричних матеріалах поглинання пов'язане з їх комплексною діелектричною проникністю (ϵ) та тангенсом втрат ($\tan\delta$). Складна діелектрична проникність – це фізична властивість, яка описує взаємодію речовини з електромагнітними полями, і вона пов'язана зі структурними та фізико-хімічними властивостями.

$$\epsilon_r = \epsilon' + j\epsilon'' ,$$

Комплексна діелектрична проникність вимірює здатність матеріалу поглинати та зберігати потенційну електричну енергію і складається з реальної частини діелектричної проникності (ϵ'), що описує здатність матеріал для накопичення енергії, коли він піддається електричному полю і впливає на розподіл електричного поля та фазу хвиль, що проходять крізь матеріал, та уявну діелектричну проникність (ϵ'') частина, яка впливає як на поглинання, так і на

ослаблення енергії та описує здатність розсіювати енергію у відповідь на прикладене електричне поле за допомогою різних механізмів поляризації, які зазвичай призводять до виробництва тепла.

Тангенс $\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ вказує на здатність матеріалу перетворювати енергію в тепло.

Для отримання хорошого розсіювання енергії за допомогою ефекту Джоуля необхідно, щоб екрани мали хорошу теплопровідність. Коли мікрохвилі проникають і поширюються крізь діелектричний матеріал, внутрішнє поле, створене в ураженому об'ємі, викликає поступальний рух вільних або зв'язаних зарядів, таких як електрони чи іони, і обертає комплекси зарядів, такі як диполі. Сили інерції, пружності та тертя чинять опір цим індукованим рухам і викликають втрати, наслідком яких є об'ємне нагрівання.

$$\mu_r = \mu' + j\mu'',$$

де μ' – це проникність,

μ'' – опис магнітних втрат.

Аналогічний тангенс магнітних втрат $\tan \delta_\mu$, також можна визначити як:

$$\tan \delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'},$$

Для магнітних матеріалів тангенс втрат може бути виражений через три основні фактори:

$$\tan \delta_h = \tan \delta_h + \tan \delta_e \tan \delta_r,$$

де $\tan \delta_h$, $\tan \delta_e$, $\tan \delta_r$ – це гістерезис, вихровий струм та тангенс "залишкових" втрат відповідно.

В результаті гістерезису енергія в магнітному матеріалі розсіюється у вигляді тепла через петлю В-Н.

Для матеріалів з високою провідністю, таких як метали, або для дуже великих зразків, де глибина шкіри менша за розміри зразка, вплив вихрових струмів на магнітне поле перестає бути незначним. У цій ситуації збуджується широкий діапазон спінових хвиль, а не тільки рівномірна прецесія, в результаті чого в металах часто домінує процес вихрових струмів.

Третій член рівняння

$$SE = 20 \log \left(\frac{\eta}{4\eta_0} \right) + 20 \log \left(e^{\frac{d}{\delta}} \right) + 20 \log \left(1 - e^{\frac{-2d}{\delta}} \right), \quad (1.1)$$

пов'язаний із множинними відображеннями. Коефіцієнт SE_{MR} рівняння $SE = SE_R + SE_A + SE_{MR}$ як правило, важливий лише тоді, коли метали тонкі та на низьких частотах (тобто нижче приблизно 20 кГц). Їх негативним внеском у глобальний захист (SE_{MR}) можна знехтувати, коли товщина екрана більша, ніж глибина проникнення хвилі (δ) або коли (SE_A) вище 10 дБ відповідно до теорії Шелкунова. Однак якщо екран є тоншим за глибину шкіри, вплив багаторазового відбиття буде значним для зменшення загального екранування електромагнітних перешкод. Збільшуючи частоту, струм у провіднику все більше і більше тече на поверхні провідника.

Як правило, полімерні композити містять електропровідні наповнювачі, такі як металеві або магнітні наночастинки, матеріали на основі вуглецю (вуглецеві нанотрубки (CNT), графен (Gr), сажа та графіт), про які останнім часом найчастіше повідомляють через їхню легкість і хорошу електромагнітну чутливість. Екранування від електромагнітних перешкод композитного екрануючого матеріалу залежить головним чином від співвідношення сторін наповнювачів, власної провідності наповнювача, діелектричної проникності, магнітних властивостей і фізичної геометрії.

Як загальну тенденцію можна спостерігати, що додавання вуглецевих нанотрубок збільшує провідність і ефективність екранування в композитах при тому самому значенні частоти. Для отримання 20 дБ (мінімально прийнятної ефективності екранування від електромагнітних перешкод) необхідна мінімальна провідність щонайменше 1 См/м. Варто зазначити, що товщина зразка є важливим фактором, який слід враховувати, оскільки більш товсті зразки матимуть вищу ефективність екранування від електромагнітних перешкод, як показано в рівнянні 1.1

Багатошарові ламіновані композити демонструють вищу здатність до поглинання, ніж масивні композити, завдяки внутрішнім відбиттям, що відбуваються між межами кожного шару. Цей ефект можна порівняти з ефектом на екранах Солсбері.

Використовувані методи обробки сильно впливають на ефективність екранування від електромагнітних перешкод та провідність. У цьому відношенні у роботі [119] порівнюють різні технології обробки та роблять висновок, що найкращим методом обробки для отримання найвищого значення ефективності екранування від електромагнітних перешкод є змішування розплаву. Цей прийом кращий, ніж обробка розчину, тоді як цей спосіб кращий, ніж мокре перемішування. Причина, по якій змішування розплаву, здається, дає кращі результати порівняно з іншими методами, пов'язана з тим, що вуглецеві нанотрубки локалізовані на зовнішній поверхні великих частинок полімеру.

Іншим фактором, що впливає на ефективність екранування від електромагнітних перешкод, є довжина CNT. У зв'язку з цим з'ясовано, що чим довші CNT, тим краща провідність і, отже, і краща ефективність екранування від електромагнітних перешкод. Це пов'язано з вищим співвідношенням сторін (L/d), виявленим у довшій CNT. Вони виявили, що поріг просочування, відбувається при менших вагових частках із збільшенням довготи вуглецевих нанотрубок.

Основними типами вуглецевих нанотрубок є однострунні вуглецеві нанотрубки (SWCNT) та багатостінні вуглецеві нанотрубки (MWCNT). Тип CNT

також, схоже, впливає на параметри ефективності екранування від електромагнітних перешкод, оскільки більша кількість дефектів, присутніх у MWCNT збільшує їх діелектричну проникність. Це робить MWCNT вигідним для ефективності екранування від електромагнітних перешкод, де основним захисним механізмом є поглинання [120].

Вирівнювання нанотрубок є ще одним фактором, який має великий вплив на електричні властивості композитів та їх поріг перколяції. Коли нанотрубки мають високу орієнтацію та вирівняні, існує менше контактів між трубками, і, як наслідок, знижується електропровідність і збільшуються пороги перколяції порівняно з хаотично орієнтованими вуглецевими нанотрубками.

Крім того, вплив типу наповнювача досліджували різні автори шляхом додавання різних легуючих матеріалів до одних і тих же полімерних матриць. Як приклад, Bhattacharya et al. продемонстрували вищу ефективність графенових листів порівняно з вуглецевими нанотрубками при диспергуванні в поліуретані (8 дБ проти 5 дБ при 10 мас % вуглецевого наповнювача). В іншій роботі Chen et al. повідомили про електропровідність та EMI SE поліанілінових композитів, що містять SWCNT, графітові нанолісти (GNS) або гібридні наповнювачі. Композити були отримані шляхом полімеризації. Провідність композитів становила 14 См/м і 930 См/м при додаванні 1 мас % SWCNT та GNS відповідно. Тоді як гібридний композит з 1 мас % SWCNT/GNS демонструє дуже високе значення провідності (1620 См/м). Значення SET становили 19,4, 24,3 і 27 дБ для зразків з 1 мас % SWCNT та GNS відповідно, що робить останній чудовим кандидатом як матеріал для екранування ЕМ. Як обговорювалося вище, збільшення провідності передбачає збільшення як втрат на відбиття та поглинання. Розглянемо таке рівняння, яке описує коефіцієнт відбиття на межі розділу:

$$r = \frac{\eta_M - \eta_0}{\eta_M + \eta_0}.$$

де r - коефіцієнт відбиття,

η - імпеданс середовища, що поширюється.

Коефіцієнт відбиття падає до нуля, коли $\eta_M = \eta_0$, тобто коли імпеданс у першому шарі матеріалу відповідає імпедансу падаючого середовища. У цьому контексті, в наш час пористі матеріали широко використовуються для мінімізації невідповідності імпедансу та коефіцієнта відбиття. Для досягнення цієї мети потрібна буде високопориста зовнішня поверхня з розміром пор, як падаюче випромінювання. В принципі, коли випромінювання взаємодіє з поверхнею пористого провідного матеріалу, воно стає розподіленим між порами та їх стінками.

Основна частина відбитого випромінювання виникатиме через відбиття, що виникають на стінках пор, оскільки відбиттями від внутрішньої частини пор можна нехтувати. Тому пристосування частки та розміру пор, що утворюються на поверхні провідної сполуки, допоможе модулювати явище електромагнітного відбиття. Мінімізуючи відбиття, більша частка випромінювання буде проникати в матеріал, будучи в змозі розсіювати його шляхом поглинання.

Для подальшого зменшення відбиття полімерних композитів, про які йшлося вище, придатними кандидатами є полімерні композитні піни. Ці сполуки можуть бути легко утворені різними техніками: надкритичне сушіння або розширення CO_2 , використання хімічних піноутворювачів, індукція процесів поділу фаз тощо. Було синтезовано пористі композити, використовуючи техніку піноутворювача (AIBN) і отримуючи розміри пор від 40 до 170 мкм. Доведено, що CNT були ефективнішими, ніж нановолокна, завдяки високому співвідношенню сторін: меншій кількості цих трубок достатньо, щоб отримати необхідну величину для комерційного екрануючого матеріалу (20 дБ).

Томассен та ін. широко працювали над мінімізацією відбиттів у діапазоні частот К-діапазону з використанням піни CNT/полімеру, розширеної методом надкритичного CO_2 . У своїй першій роботі вони приготували нанокомпозитні піни з полікапролактону (PCL) з MWCNT як наповнювачами. Для приготування композитів було використано дві техніки: змішування розплаву та спільне

осадження. Зібрані результати провідності та ефективності екранування від електромагнітних перешкод показують, що остання є більш ефективною, ніж перша, оскільки вихідна довжина CNT була краще збережена методом спільного осадження. Крім того, зразки представляли значення SET до 80 дБ в діапазоні К при дуже низькому вмісті MWCNT (0,25 об.%). Згодом вони використовували техніку полімеризації осаду для приготування пінок MWCNT/PMMA. Цей метод дозволив отримати кращі дисперсії MWCNT, покращуючи таким чином провідність та значення ефективності екранування від електромагнітних перешкод. Крім того, поглинена потужність була вищою за 90% для композитів із лише 2 мас % MWCNT, отриманих методом осадження-полімеризації. В іншій роботі композити MWCNT/PC були приготовані екструзією розплаву та стиснення та розширені на надкритичний CO₂; вони виявили, що обмежуючи час дифузії CO₂ всередині матеріалу, можна було отримати піни з градієнтною морфологією, здатні поглинути до 90% інциденту випромінювання.

Графен також використовувався як провідний наповнювач. Наприклад, Zhang et al. повідомили, про приготування композитів графен/PMMA методом змішування розчину з використанням надкритичного CO₂ як піноутворювача. Багато інших методів використовувались для приготування пористих графено-полімерних композитних майданчиків. Поліамідні композитні піни із відновленим оксидом графену (rGO) виготовлені за допомогою тріступеневого методу: полімеризації на місці, поділ фаз, не викликаний розчинниками, та термічне імітування [121]. Подібним чином, пористі композити PS/графен були приготовані з використанням комбінації лиття під тиском під високим тиском та вилуговування солі. Більш того, легкі мікроклітинні пінополіетилеміди (PEI)/графен синтезовані з використанням водної індукованої парою фазової сепарації (WVIPS). Однак, у порівнянні з наповнювачами з вуглецевих нанотрубок, для отримання систем з полімеру/графену з хорошими значеннями ефективності екранування від електромагнітних перешкод потрібні більші кількості графенового наповнювача. Ці результати свідчать про те, що CNT ефективніші, ніж графен, завдяки високому

співвідношенню сторін, кращій взаємодії з матрицею, нижчому порогу протікання та вищим значенням провідності.

Для поглинання в діапазоні високих частот (у діапазоні ГГц) магнітні металеві матеріали вважалися хорошими кандидатами, оскільки екранування повинно задовольняти умову узгодження імпедансу $\frac{\mu_r}{\epsilon_r} = 1$, що робить магнітні та діелектричні властивості необхідними для хорошого поглинача. Проте, відносна комплексна проникність магнітних металевих матеріалів зменшується через вихрові струми, викликані електромагнітними хвилями. Таким чином, може бути краще використовувати ізольовані металеві частинки, розміри яких менші за глибину скін-шкіри електромагнітних хвиль. Мікрохвильове поглинання магнітних наночастинок спричинене феромагнітним резонансом, який є прецесією намагніченості (M) навколо поля анізотропії. У випадку феромагнітного матеріалу з однією магнітною анізотропією напрямком намагніченості обмежений навколо легкої магнітної осі. Суперпарамагнітні наночастинки мають невелике значення коерцитивної сили, що покращує проникність і, отже, магнітні втрати. При введенні в матеріал магнітних наночастинок збільшується як комплексна проникність, так і комплексна проникність. Збільшення першої зумовлено існуванням множинних діелектричних релаксацій у магнітних нанокомпозитах. Таким чином, ефективність узгодження імпедансу цих композитів є поліпшена, що збільшує здатність поглинання. З цієї причини магнітні наночастинки були включені до композитів, щоб покращити ефективність екранування. Незважаючи на те, що деякі дослідження проводилися з використанням лише магнітних частинок у полімерних матрицях, більшість досліджень зосереджено на перевірці надзвичайної комбінації та синергічного ефекту між вуглецевими компонентами та магнітними наночастинами.

Загалом, слід зазначити, що включення магнітних наночастинок значно посилює поляризацію та магнітні втрати, що, у свою чергу, призводить до гарного екранування. Міжфазна поляризація в магнітних кластерах сприяє механізму

екранування з домінуванням поглинання, який було пояснено за допомогою моделі ланцюга резисторного конденсатора. Поєднання провідних наповнювачів і магнітних наночастинок в електричному контакті, здається

я, має синергетичний ефект на ефективність екранування, даючи вищі значення, ніж композити без магнітних наночастинок. Нарешті, слід зазначити, що декорування нанопровідних наповнювачів магнітними наночастинами може бути придатним шляхом для отримання матеріалів з покращеними екрануючими властивостями.

1.4. Оцінка сучасного стану питання та постановка завдань досліджень

На основі проведеного аналізу сучасного стану галузі електромагнітної безпеки встановлено, що в умовах підвищення електромагнітного навантаження на виробниче і побутове середовище та довкілля в цілому і розширення частотного спектра електромагнітних полів найбільш ефективним засобом захисту людей від електромагнітних впливів є екранування електромагнітних полів. Головними вимогами до захисних матеріалів є високі коефіцієнти загального екранування, малі коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль, прийнятні масогабаритні параметри і придатність до облицювання поверхонь великих площ і складних конфігурацій. Таким вимогам задовільняють рідкі захисні композиції. Для забезпечення виконання викладених вище умов у процесі проектування таких сумішей бажано застосовувати стандартні компоненти малої вартості, тобто серійні матриці (лакофарбові вироби або полімери) та захисні наповнювачі, які у великих обсягах виробляються у промисловості. На сьогодні потребують розроблення рідкі матеріали прийнятної ефективності у широкому частотному діапазоні, які можна наносити на поверхні у необхідну кількість шарів, що забезпечує потрібні коефіцієнти екранування. Потребують досліджень залежності коефіцієнтів екранування від вагового вмісту екрануючого наповнювача. Специфікою композиційних матеріалів є відсутність довідкових даних щодо їх

магнітних та електрофізичних властивостей, які обумовлюють значення коефіцієнта загального екранування і відбиття. Тому потребують вдосконалення методи розрахункового оцінювання цих параметрів з метою спрощення і зниження вартості проектування рідких захисних матеріалів з потрібними функціональними властивостями. Виходячи з проведеного аналізу були визначені мета, завдання, об'єкт і предмет дослідження.

Основні положення розділу 1 опубліковані автором у наукових працях [3].

РОЗДІЛ 2

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

2.1. Особливості вимірювання рівнів електричних, магнітних та електромагнітних полів у виробничих та побутових умовах

Усі сучасні вимірювачі напруженості електричних і магнітних полів щільностей потоків енергії електромагнітних полів високих частот мають широкі діапазони вимірювання щодо вимірюваних частот та їх амплітудних значень. При цьому усі прилади, які дозволено використовувати у дослідженнях розраховані на застосування у виробничих умовах. Це означає, що вони призначені в основному для визначення вимірювання рівнів полів достатньо високих значень, наприклад біля турбогенераторів потужного електроприводу, трансформаторних підстанцій тощо. Вимірювачі щільностей потоків енергії призначені в основному для вимірювання значень з боку потужних випромінювачів (радіолокаційного обладнання, радіорелейного зв'язку, базових станцій мобільного зв'язку тощо). Тобто визначаються межі перевищення гранично допустимих значень для людей. У цьому випадку рівні полів високі, а похибка вимірювань мінімальна. Але визначення фактичних значень електричних, магнітних та електромагнітних полів у місцях постійного або тимчасового перебування людей здійснюється для амплітудних значень значно нижчих за значення у безпосередній близькості до джерел поля, тому похибка вимірювань збільшується. Головною особливістю вимірювання рівнів полів у місцях перебування людей є необхідність керуватися максимальною абсолютною похибкою вимірювання. Слід враховувати, що покази приладів для вимірювання дипольною антеною залежить від її орієнтації відносно ліній напруженості. Тобто необхідним є обирання орієнтації максимальним напруженням поля, або попереднє визначення просторової структури поля. Більшість вимірювачів магнітної складової електромагнітного поля є

трикоординатними, тобто покази приладу автоматично усереднюються за даними трьох ортогонально розташованих вимірювальних котушок. Це ж стосується вимірювання щільностей потоків енергії. Для деяких приладів теж критична орієнтація антени, але у цьому випадку є відповідна вказівка на корпусі. Ще однією особливістю вимірювання рівнів електромагнітних полів у сучасних умовах є великі імовірності наявності гармонік електромагнітних полів наднизької частоти та різних частот ультрависокого діапазону, які автоматично вимірюються приладом. Джерела таких полів можуть бути не враховані, що дає хибні результати щодо об'єкта, який обстежується. Тому на попередньому етапі досліджень доцільно принаймні на якісному рівні визначити спектральні склади полів у наднизькочастотній та високочастотній частині електромагнітного спектра. Головною особливістю електромагнітних полів наднизьких частот (в основному 50 Гц, під впливом яких люди перебувають практично цілодобово) є те, що вони весь час знаходяться у ближній зоні електромагнітного поля і превалююча складова цього поля (магнітна чи електрична) наразі часу не передбачувана від одного джерела. Головною складовою методики вимірювання є окреме вимірювання електричної та магнітної складових над низькочастотного електромагнітного поля. При цьому, слід враховувати просторові поширення складових поля від локалізованих у просторі та розосереджених джерел, наприклад електричних машин та лінії електропередач. Сумарною напруженістю електричного та магнітного поля у кожній точці згідно чинних нормативів визначається як:

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2 + (E_z)^2},$$

а модуль вектора напруженості магнітного поля H :

$$H = \sqrt{(H_x)^2 + (H_y)^2 + (H_z)^2}.$$

Значення магнітної індукції B визначається із співвідношення:

$$B = \mu \mu_0 H,$$

де $\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна стала.

Для частот нижче 300 МГц вимірювання напруженості поля проводяться окремо для кожного джерела, коли інші джерела вимкнені. При наявності джерел, що працюють в діапазоні частот з однаковим ГДР, інтегральна напруженість поля в кожній точці вимірювання розраховується за такою формулою:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2},$$

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}.$$

Для джерел, що створюють електромагнітні поля в діапазоні частот, в якому встановлені різні ГДР, повинні бути виконані такі вимоги:

$$\frac{E_1^2}{ГДР_1^2} + \frac{E_2^2}{ГДР_2^2} + \dots + \frac{E_n^2}{ГДР_n^2} + \frac{H_1^2}{ГДР_1^2} + \frac{H_2^2}{ГДР_2^2} + \dots + \frac{H_n^2}{ГДР_n^2} \leq 1.$$

де E і H – виміряні значення напруженості електричного та магнітного поля;
ГДР – гранично допустимі рівні відповідних частотних діапазонів.

Практично здійснити такі вимірювання у реальних умовах складно. Оскільки, навіть в окремій будівлі завжди можуть бути не враховані джерела, тому у практичній роботі завжди необхідно визначати фонові значення полів наднизької частоти. Щодо визначення інтегрального значення електромагнітних полів з частотами вищими за 300 МГц, то згідно чинних нормативів враховується внесок кожного з них:

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n,$$

Якщо джерела працюють у частотних діапазонах, для яких встановлені різні ГДР застосовується співвідношення:

$$\frac{W_1}{ГДР_1} + \frac{W_2}{ГДР_2} + \dots + \frac{W_n}{ГДР_n} \leq 1,$$

де W_n – виміряні значення щільності потоків енергії полів;

$ГДР_n$ – гранично допустимі рівні відповідних частотних діапазонів.

При цьому слід враховувати, що порівняння фактичних інтегральних значень напруженостей полів у нормативах [13, 14] відрізняється і це питання є дискусійним.

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

Головною особливістю визначення коефіцієнтів екранування є необхідність гарантованого забезпечення відсутності проникнення поля, яке екранується поза екрануючої конструкції, тобто розміри або форми екрана виготовленого з тестованого матеріалу повинні бути такими, щоб електричне, магнітне або електромагнітне поле якимось чином не оминало захисний матеріал і не реєструвалася вимірювальним приладом. У більшості сучасних вимірювальних приладах це реалізується у резонансних хвилеводах із застосуванням генератора поля та його детектора на двох кінцях хвилеводу. Але у цьому випадку, розміри зразка повинні бути дуже малими, що не завжди прийнятно для композиційних матеріалів складного складу через можливі неоднорідності. Тому для матеріалів призначені для облицювання великих площ доцільно скористатися методами прямих вимірювань з врахуванням можливих дифракційних явищ. Як показано у

розділі 1 головною метою розроблення композиційних матеріалів для екранування електричних, магнітних і електромагнітних полів є зменшення внеску відбиття електромагнітних хвиль у загальний коефіцієнт екранування. Це вкрай важливо для екранування електромагнітних полів дуже високих і вищих частот. Для визначення коефіцієнтів екранування електричних і магнітних складових електромагнітних полів наднизьких частот захисний екран повинен бути геометрично замкнений, при цьому вимірювальна антена повинна бути вміщена у середину екрануючої конструкції.

Методи та методики визначення захисних властивостей матеріалів для екранування електромагнітних полів. Вимірювання значень електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти здійснювалося вимірювачем напруженості електричного та магнітного поля ПЗ-50 згідно інструкції експлуатації [122] технічні характеристики наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Основні технічні характеристики приладу ПЗ-50

Характеристики	Значення
Діапазон частот	48-52 Гц
Діапазон вимірювання:	
Напруженості електричного поля	0,01–100 кВ/м
Напруженості магнітного поля	0,1–1800 А/м
Межі вимірювання:	
Напруженості електричного поля	0,2; 2; 20 і 200 кВ/м
Напруженості магнітного поля	0,2,2,20,200,2000 А/м
Межі допустимої відносної основної похибки вимірювання напруженості електричного поля	$\pm[15+0,2[E_{\Pi}/E_X]]1) \%$
Межі допустимої відносної основної похибки вимірювання напруженості магнітного поля	$\pm[15+0,2[H_{\Pi}/H_X]]2) \%$
Робочі умови експлуатації:	

температура навколишнього повітря	+5 – +40 С
відносна вологість при температурі навколишнього повітря +25 ° С	до 90 %
атмосферний тиск	70÷106,7 кПа

У процесі вимірювань вважалося, що похибка вимірювань максимальна. (2,5 дБ). Тому здійснювалися серії вимірювань (10–15 у кожній). У протокол заносилися усереднені дані. Це стосується як електричної, так і магнітної складових електромагнітного поля. Захисний екран мав кубічну форму розмірами 0,2×0,2×0,2 м.



Рис. 2.1. Захисний екран для вимірювання ефективності захисту від електричної та магнітної складової електромагнітного поля наднизької частоти

Вимірювальна антена вміщувалася усередину конструкції, а вимірювальний кабель виводився крізь технологічний отвір, який щільно зачинявся і підключався до вимірювального приладу. Для вимірювання коефіцієнтів екранування електромагнітних полів, які нормуються за щільністю потоку енергії (вище

300 МГц) застосовувався вимірювач напруженості електричних та магнітних полів ПЗ-31 згідно з інструкцією експлуатації [123]. Технічні характеристики приладу наведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Основні технічні характеристики приладу ПЗ-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 ЩПЕ та напруженості Е і Н поля визначеної частоти		2,7 дБ

У процесі вимірювань керувалися основною похибкою у 2,7 дБ через відносно малі щільності потоків енергії. Для вимірювання загального коефіцієнта екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти також використовувалися захисні конструкції кубічної форми розмірами 0,2×0,2×0,2 м. Для захисту від високочастотних полів важливим є внесок у загальний коефіцієнт екранування захист за рахунок відбиття електромагнітних хвиль. Для зниження ефекту перевідбиття хвиль і підвищення рівнів полів у небажаних зонах коефіцієнти відбиття слід мінімізувати у процесі розроблення захисних матеріалів.

Для визначення коефіцієнтів відбиття розроблених матеріалів застосовувався метод прямих вимірювань. Для цього у суцільному металізованому листі робився отвір, який перекривався зразком захисного матеріалу. Антена вимірювального приладу розташовувалася між джерелом поля і металізованим листом. Різниця показів приладів за наявності захисного матеріалу в отворі і його відсутності показувала внесок відбиття у коефіцієнт екранування.



Рис. 2.2. Стенд для визначення коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль

Вимірювання робилися для високочастотного поля частотами 2,45 ГГц. (0,12 м) Розміри листа гарантували непроникнення поля повз металізованого листа внаслідок дифракційних явищ. Фонові значення під час вимірювань не перевищували $0,08\text{--}0,10$ мкВт/см³. Для вимірювання можливості накопичення електростатичних зарядів на поверхні композиційного матеріалу використовувався вимірювач ІЕЗ-П [124].

Таблиця 2.3

Основні технічні характеристики приладу ІЕЗ-П

Характеристики	Значення
Діапазон вимірювань:	
напруженості поля	40 В/см – 200 В/см; 200 В/см – 1000 В/см; 1000 В/см – 5000 В/см
поверхневої щільності заряду	$0,4 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5$ Кл/м ²
Основна похибка вимірювань	5 %

Основні технічні характеристики приладу ВЕ-метр наведено у таблиці 2.4

Таблиця 2.4

Технічні характеристики приладу ВЕ-метр

Характеристика	Значення
Частотний діапазон від 5 Гц–400 кГц	
піддіапазон 1	5 Гц–2 кГц
піддіапазон 2	2 кГц–400 кГц
піддіапазон 3	45 Гц–55 Гц
піддіапазон 4	5 Гц–2 кГц за винятком смуги частот від 45 до 55 Гц
Діапазон вимірювання ефективного значення напруженості електричного поля	
піддіапазон 1	5 В/м–1000 В/м
піддіапазон 2	0,5 В/м–40 В/м
піддіапазоні 3	5 В/м–1000 В/м;
піддіапазон 4	5 В/м–1000 В/м
Діапазон вимірювання ефективного значення напруженості магнітного	

поля (магнітної індукції)	
піддіапазон 1	80 мА/м–8 А/м (100 нТл–10 мкТл)
піддіапазоні 2	4 мА/м–400 мА/м (5 нТл–500 нТл)
піддіапазон 3	80 мА/м–8 А/м (100 нТл–10 мкТл)
піддіапазон 4	80 мА/м–8 А/м (100 нТл –10 мкТл)

Необхідність вимірювання накопичення електростатичного заряду пояснюється тим, що у разі покриття захисним матеріалом поверхонь стін, стель тощо схильність матеріалу до накопичення поверхневого електростатичного заряду має мати наслідком деіонізацію повітря у приміщенні через осідання іонів протилежного знаку на поверхню.

2.3. Розрахункова оцінка захисних властивостей композиційних матеріалів у процесі їх розроблення

Процес розроблення і виготовлення композиційних матеріалів, у тому числі та на рідинній основі вимагає виготовлення великої кількості зразків на різних матрицях із різним вмістом екрануючої субстанції. Для прискорення проведення досліджень і розроблення практично значущої технології виготовлення захисних матеріалів доцільне попереднє розрахункове оцінювання ефективності матеріалу за тих чи інших умов. Ці розрахунки базуються на фундаментальних співвідношеннях електродинаміки суцільних середовищ. Для низькочастотної області електромагнітного спектра, тобто зниження напруженості поля у тілі матеріалу застосовується співвідношення:

$$H_1 = H_0^{(-\lambda d)},$$

$$E_1 = E_0^{(-\lambda d)},$$

де H_0 , E_0 – напруженості магнітного та електричного полів у повітрі;

H_1, E_1 – напруженості полів у товщі металу;

d – товщина матеріалу;

λ – коефіцієнт згасання поля.

$$\lambda = \sqrt{\pi f \mu \sigma},$$

де f – частота екранованого поля;

μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу;

σ – питома провідність матеріалу.

Наведене свідчить, що фактично захисні властивості матеріалу залежать від електрофізичних та магнітних властивостей матеріалів. Особливістю композитів є те, що ці властивості необхідно визначати експериментально або певним чином розраховувати через відсутність таких даних у довідковій літературі, що буде розглянуто у наступному розділі. Наприклад, діелектрична проникність є частотно залежною.

$$\varepsilon(\omega) = i \frac{4\pi\sigma}{\omega},$$

де ω – циклічна частота електромагнітного поля.

Вважаючи, що $\mu=1$, що характерно для багатьох композицій

$$n^2 - \varkappa + 2in\varkappa = \varepsilon' + i\varepsilon'',$$

де n – коефіцієнт заломлення електромагнітної хвилі у матеріалі;

\varkappa - коефіцієнт згасання поля у матеріалі;

ε' - дійсна, ε'' - уявна складові комплексної діелектричної проникності.

Для матеріалів, у яких $\sigma > 0$, тобто матеріал має провідність принаймні на рівні напівпровідників для дальньої зони поля уявна складова відносної магнітної проникності набагато більша за дійсну і визначається як :

$$\varepsilon'' = \frac{4\pi\delta}{\omega} ,$$

Нехтуючи ε' порівняно з, ε'' відповідно до відомих співвідношень:

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}} ,$$

$$\varkappa = \sqrt{\frac{-\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}}{2}} ,$$

маємо: $n = \varkappa = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\omega}} ,$

При цьому виконується фундаментальне співвідношення $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$.

Зазвичай для електромагнітних екранів використовують еквівалентну глибину проникнення δ височастотного поля у товщу матеріалу екрана:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} ,$$

Це глибина, на якій поле знижується у $e=2,7$ рази (8,7 дБ).

Фактичну товщину екрана обирають у залежності від потрібного коефіцієнта екранування. Наприклад, за зниження рівня поля у 10 разів еквівалентна глибина складає $2,3\delta$. Доцільно оцінювати як поглинання електромагнітної енергії, так і відбиття електромагнітних хвиль. Коефіцієнт відбиття у загальному випадку визначається опором поверхневого шару матеріалу, його наближення до хвильового опору повітря (377 Ом) знижує Z_0 .

При цьому:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \text{ а } Z = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}},$$

де σ – провідність матеріалу екрана

Z_0, μ_0 – електрична та магнітна сталі

μ, ϵ - магнітна та діелектрична проникності

Коефіцієнт відбиття матеріалу визначається як:

$$K_{\text{відб.}} = 20 \lg \left(\frac{Z_0}{4Z} \right), \text{ дБ,}$$

А коефіцієнт поглинання як:

$$K_{\text{погл.}} = 20 \lg e^{\frac{\Delta}{\delta}}, \text{ дБ,}$$

де Δ – товщина екрана.

Для прогнозування магнітних властивостей матеріалу що розробляється, доцільно визначити коефіцієнти екранування за даних умов. Для цього кубічний екран розглядали у сферичному наближенні, а ефективний коефіцієнт екранування визначався як:

$$K_{\text{еф}} = \frac{(2\mu_{\text{еф}} + 1)(\mu_{\text{еф}} - 2) - 2(\mu_{\text{еф}} - 1)^2 a^3/b^3}{9\mu_{\text{еф}}}.$$

де a і b відповідно внутрішні та зовнішні радіуси екранів.

Маючи експериментальні дані щодо коефіцієнтів екранування екранів відомої конфігурації можна отримати залежність електрофізичних властивостей

матеріалу від його вмісту і товщини. Це спрощує процес проєктування захисних матеріалів і конструкцій.

Висновки до розділу 2

1. Для коректного проєктування захисних матеріалів і конструкцій необхідно застосовувати вимірювальну апаратуру, розраховану на вимірювання напруженостей електричних та магнітних складових електромагнітного поля низької частоти та щільностей потоків енергії електромагнітних полів дуже високих і вищих частот малих інтенсивностей, притаманних полям постійного чи тимчасового перебування людей. Тому похибку вимірювань слід обирати максимальною для даних умов.

2. Для отримання коефіцієнтів екранування електричної та магнітної складових електромагнітного поля наднизької частоти необхідно застосовувати геометрично замкнені екрануючі конструкції, виготовлені із протестованого матеріалу. Це обумовлено квазістаціонарністю низькочастотних полів і унеможливорює проникнення полів поза екрануючою конструкцією.

3. Для визначення захисних властивостей матеріалів, при екрануванні електромагнітних полів дуже високих і вищих частот, необхідно визначати загальний коефіцієнт екранування і коефіцієнт екранування за рахунок відбиття електромагнітних хвиль. Це обумовлено необхідністю мінімізувати відбиття електромагнітних хвиль у небажаних напрямках. Випробування виконувалися із застосуванням радіонепрозорої екрануючої конструкції з отвором, який відповідає розмірам тестованого зразка. При розташуванні вимірювальної антени за екрануючою конструкцією вимірюється загальний коефіцієнт екранування, при розташуванні антени між джерелом поля і екрануючою конструкцією, тобто перед зразком – визначається коефіцієнт відбиття. Потік електромагнітної енергії, обумовлений відбиттям електромагнітних хвиль, визначається за різницею показів приладу за відсутності зразка у отворі та його наявності.

4. Для зменшення обсягів експериментальних робіт, на попередньому етапі досліджень, доцільно було оцінювати коефіцієнти екранування, виходячи з геометричних характеристик, електрофізичних та магнітних властивостей матеріалу. Особливістю композиційних матеріалів є відсутність довідкових даних про ці величини. Для спрощення наступного проєктування захисних матеріалів з потрібними коефіцієнтами екранування доцільно було визначити стандартні показники матеріалу.

Основні положення розділу 2 опубліковані автором у наукових працях [5], [10], [11].

РОЗДІЛ 3

ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МАКСИМАЛЬНИХ ЕФЕКТИВНОСТЕЙ

3.1. Матеріали та технології виготовлення захисних композицій

Для виготовлення рідких захисних композицій було максимально використано компоненти які серійно виробляються в Україні і є екологічно безпечними. У якості матриць використовувалися стандартні фарби. Для зручного нанесення захисного матеріалу на поверхні у якості матриці було обрано уже готові фарби двох типів. Перша - акрилова водно-дисперсійна фарба VD-AK-22W ($\rho=1,03$ г/см³), друга - геополімерна фарба МК 3/18-9.20 ($\rho=1,15$ г/см³).

У якості екрануючого наповнювача використовувався дрібнодисперсний концентрат залізної руди, отриманий методом флотації на Полтавському гірничозбагачувальному комбінаті зі вмістом Fe – 68 –72 %, Fe₃O₄ – 20–22 % ($\rho=6,24$ г/см³). Також у якості наповнювача використовувалася пігментна суміш GreyX виробництва LTD «Українська мінеральна компанія» вмістом Al₂O₃ – 50 %, TiO₂ – 25 %, Fe₂O₃ – 10 %.

Характеристики наповнювача GreyX показано у таблиці 3.1

Таблиця 3.1

Основні характеристики наповнювача GreyX

№	Назва показника та одиниці виміру	GreyX
1	масова частка оксиду алюмінію Al ₂ O ₃ ,%, не менше	50,0
2	масова частка діоксиду титану TiO ₂ , %, не менше	25,0
3	масова частка оксиду заліза Fe ₂ O ₃ , %, не менше	10,0
4	вологість, %, не більше	1,0
5	гранулометричний склад	

	d50, мкм	5 (± 1)
	d97, мкм	12 (± 2)
	d100, мкм	20 (± 2)
6	твердість по Моосу	6
7	істинна густина, кг/м ³	4007
8	насіпна густина, кг/м ³	1600–1700
9	маслоємність, %	11,6

Відомо [125], що ефективність екранування залежить від дисперсності наповнювача, тому було виконаної гранулометричний аналіз сумішей стандартним методом седиментації. Середній розмір частинок залізородного концентрату після подрібнення складав 22–23 мкм, суміші GreyX – 8–9 мкм. Екрануючі суміші виготовлялися перемішуванням фарби з потрібною кількістю наповнювача у лабораторному диссольтвері. Було виготовлено три типи екрануючої захисної суміші:

- водно-дисперсійна фарба з додаванням залізородного концентрату з ваговим вмістом 15, 30, 45, 60 % (матеріал № 1);
- геополімерна фарба з додаванням залізородного концентрату з ваговим вмістом 15, 30, 45, 60 % (матеріал № 2);
- геополімерна фарба з додаванням суміші залізородного концентрату та GreyX у пропорції 1:1 з ваговим вмістом 15, 30, 45, 60 % (матеріал № 3).

Усі отримані матеріали наносилися на поверхні.

Для підвищення коефіцієнтів екранування в ультрависокій частині спектра у матриці додавався графіт.

Таблиця 3.2

Графіт лускатий малозольний ГСМ

№	Назва	Факт
1	масова частка вуглецю, % не менше	92,0

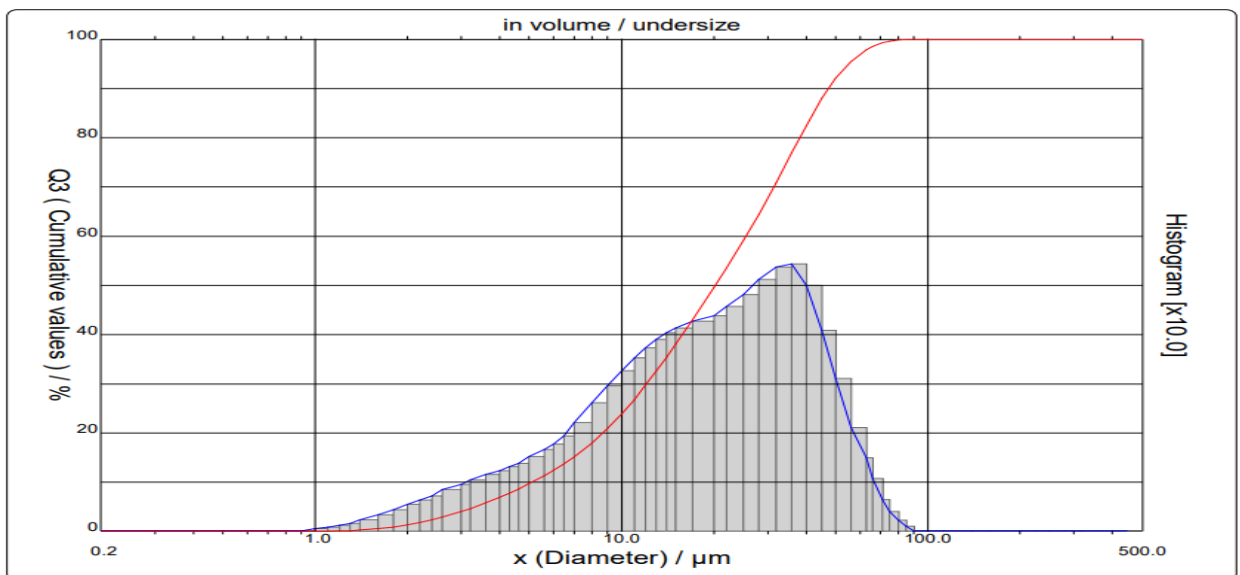
2	масова частка золи, % не більше	6,5
3	масова частка сірки, % не більше	0,05
4	масова частка внутрішньої вологи, % не більше	3,0
5	залишок на ситі, з сіткою № 0160 (160 мкм), %	90,0

Таблиця 3.3

Розподіл розміру частин

Рідина CILAS 990 Діапазон: 0,20 мкм – 500 мкм / 70 класів

Sample ref.	: 3	Ultrasounds	: 0	s (+during)
Sample Name	:	Obscuration/residual	: 14 % / 3.80 %	
Sample type	:	Diameter at 10%	: 5.10	µm
Comments	:	Diameter at 50%	: 20.20	µm
Liquid	: Water	Diameter at 90%	: 47.33	µm
Dispersing agent	: мило	Mean diameter	: 23.81	µm
Operator	:	Fraunhofer		
Company	: Lacover	Density/Factor	-----	
Location	:	Specific surface	-----	
Date : 11.09.2020	Time : 16:01:59	Automatic dilution	: No / No	
Index meas.	: 1579	Meas./Rins.	: 60s/60s/3	
Database name	: CilasDB1	SOP name	: Наповнювачі	



Variance	: 307.873 μm^2	Ultrasounds	: 0 s (+during)
Std deviation	: 17.546 μm	Obscuration/residual	: 14 % / 3.80 %
Coef. variance	: 0.747 %	Diameter at 10%	: 5.10 μm
Mode	: 38.000 μm	Diameter at 50%	: 20.20 μm
Span	: 2.091	Diameter at 90%	: 47.33 μm
Geometric mean	: 16.901 μm	Mean diameter	: 23.81 μm
Arithmetic mean	: 23.499 μm	Fraunhofer	
Quadratic square mean	: 29.327 μm	Density/Factor	-----
Log mean (F&W)	: 5.775 μm	Specific surface	-----
Log Std deviation (F&W)	: 1.240 μm	Automatic dilution	: No / No
Log skewness (F&W)	: 0.230	Meas./Rins.	: 60s/60s/3
Log curtosis (F&W)	: 0.954	SOP name	: Наповнювачі

Класи стандартів в обсязі/низькому розмірі

x	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
x	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20	2.40	2.60	3.00
Q3	0.10	0.18	0.28	0.56	0.92	1.35	1.84	2.36	2.90	4.05
q3	0.07	0.10	0.14	0.22	0.32	0.43	0.54	0.62	0.70	0.84
x	3.20	3.60	4.00	4.30	4.60	5.00	5.60	6.00	6.50	7.00
Q3	4.63	5.79	6.94	7.78	8.62	9.71	11.34	12.43	13.78	15.15
q3	0.94	1.03	1.14	1.21	1.30	1.36	1.50	1.65	1.76	1.93
x	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	17.00	20.00
Q3	17.96	20.89	23.86	26.83	29.76	32.61	35.37	38.03	42.97	49.59
q3	2.20	2.60	2.94	3.25	3.51	3.71	3.89	4.02	4.12	4.25
x	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	40.00	45.00	50.00	56.00	63.00
Q3	53.58	59.16	64.37	70.90	76.94	82.41	88.03	92.14	95.50	97.86
q3	4.37	4.55	4.80	5.10	5.35	5.42	4.98	4.07	3.09	2.09
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	100.0	112.0	140.0	160.0
Q3	98.52	99.26	99.59	99.83	99.95	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	1.48	1.06	0.63	0.39	0.21	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
x	180.0	200.0	224.0	250.0	280.0	315.0	355.0	400.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diameter / μm Q3 : cumulative value / % q3 : density distribution

Також у якості матриці використовується рідкий латекс заводського виготовлення. Перевагою латексу у даному випадку харчового, є висока технологічність у застосуванні, можливість застосовувати суміш у рідкому стані. Латекс можливо застосовувати для виготовлення універсальних поверхонь для захисту від електромагнітних полів та шумів. Крім того, перевагою латексу є незначна електризація поверхні у результаті трибоелектричного ефекту та під впливом випромінювань.

Густина латексу складає $1,49\text{--}1,50\text{ кг/м}^3$, густина магнетиту у твердому вигляді і складає $5,24\text{--}5,25\text{ кг/м}^3$, але у насипному вигляді $1,78\text{--}1,20\text{ кг/м}^3$.

Складність розробки рідких сумішей полягає у тому, що відомі співвідношення для оцінки електрофізичних і магнітних властивостей оперують показниками діелектричної проникності, магнітної проникності компонентів та об'ємним вмістом наповнювача у діелектричній матриці. Обов'язковим є врахування фактичної густини наповнювача у твердому вигляді для перерахування вагового вмісту наповнювача у об'ємний. Довідкові дані щодо електрофізичних і магнітних властивостей обраних матеріалів суперечливі та надані для певної частоти. Так, відносна діелектрична проникність латексу у більшості джерел складає ~ 24 за частоти 500 МГц . Водночас для частот $10^4\text{--}10^8\text{ Гц}$ приводяться дані щодо діелектричної проникності від 30 до 40 (для пінолатексу $4\text{--}10$).

Діелектричні проникності магнетиту складають $4\text{--}5$ за частоти 100 МГц , а графіту $12\text{--}15$. При цьому тангенс кута втрат для латексів у доступній літературі змінюється від 2 до 250 (пінолатекс $1,5\text{--}85$), що викликає сумніви. Визначення магнітних та електрофізичних властивостей вихідних матеріалів складна і трудомістка задача. Тому для визначення фактичних захисних властивостей виготовлялися серії зразків у яких вміст екрануючої компоненти враховував різні можливих компонентів.

Вважається що для більшості латексів пікові (резонансні) значення тангенса кута втрат перебувають у межах 10^5 Гц , що у практичній роботі не дає ніяких переваг з огляду на те, що у більшості екранування потребують електромагнітні

поля наднизьких частот (промислової та її гармонік) та ультрависоких і вищих частот 1,8– 5,1 ГГц.

Змішування матеріалів матриці з наповнювачем здійснювалося у лабораторному змішувачі – диссольтвері. Технічні характеристики наведені у таблиці.

Таблиця. 3.4

Основні характеристики диссольтвера

№	Параметр	Показники
1.	Ефективний об'єм змішувальної камери, см ³	100
2.	Номінальна вміщувальність змішувача см ³	64±1
3.	Тип ротора	Чотириматний
4.	Регулювання швидкості	Безступеневий
5.	Фрикція	1:1,5
6.	Частота обертання швидкохідного ротора	20...80
7.	Нагрів системи	ТЕНи
8.	Температура роторів і стінок камери, °С	25...200
9.	Потужність, кВт	1,7
10.	Електричний струм живлення змінний: – напруга, В – частота, Гц	220/380 50

Враховуючи велику в'язкість латексу порівняно з фарбами суміш залізородного пилу та латексу у необхідних пропорціях піддавалася ультразвуковій обробці. Для цього застосовувався генератор потужністю 80 Вт, амплітуда ультразвукових коливань становила 45 мкм. Частота ультразвукових коливань – 23 кГц.

Матеріали наносилися на замкнені поверхні розмірами 0,2×0,2×0,2 м.



Рис. 3.1. Макети потрібної конфігурації для покриття захисними матеріалами

Недоліком оціночного визначення електрофізичних властивостей проєктованого матеріалу є дисперсія електрофізичних значень (частотні залежності), тобто, наприклад зміна співвідношення уявної та дійсної складових комплексної діелектричної проникності. Усі співвідношення містять емпіричні коефіцієнти, які визначаються експериментально. Це стосується як окремих матеріалів, так і технології виготовлення. Це означає необхідність збільшення потрібної концентрації наповнювача у кінцевому виробі порівняно з теоретичними розрахунками. Так, для визначення комплексної (еквівалентної) діелектричної проникності за формулою Дебая введені емпіричні коефіцієнти α .

$$\varepsilon_{\text{екв}} = \varepsilon_{\text{м}} + \frac{D\alpha_1\alpha_2}{1 + \left(\frac{\lambda_{\text{р}}}{\lambda}\right)^{1-\alpha_3}},$$

де $\varepsilon_{\text{м}}$ – відносна діелектрична проникність матриці,

λ – довжина електромагнітної хвилі у вільному просторі;

D – діаметр релаксації.

Коефіцієнт α_1 приблизно враховує напрямок електричного поля відносно орієнтації наповнювача. Він складає для неупорядкованого розташування - 0,33, для орієнтації подовжених частинок уздовж вектора напруженості електричного поля – 0,5 – 1,0.

Коефіцієнт α_2 для вмісту наповнювача менше 0,3 за об'ємом приблизно складає 0,5. Найбільш критичним коефіцієнтом є коефіцієнт α_3 , який враховує дисперсність еквівалентної діелектричної проникності. Зазвичай цей коефіцієнт складає 0,16–0,17. Для спрощення приблизного визначення співвідношення реальної і уявної діелектричної проникності можливо застосувати діаграму Коула-Коула.

Вона надає можливість візуалізувати зміну еквівалентної діелектричної проникності у діапазоні частот електромагнітного поля для екранування яких проектується матеріал.

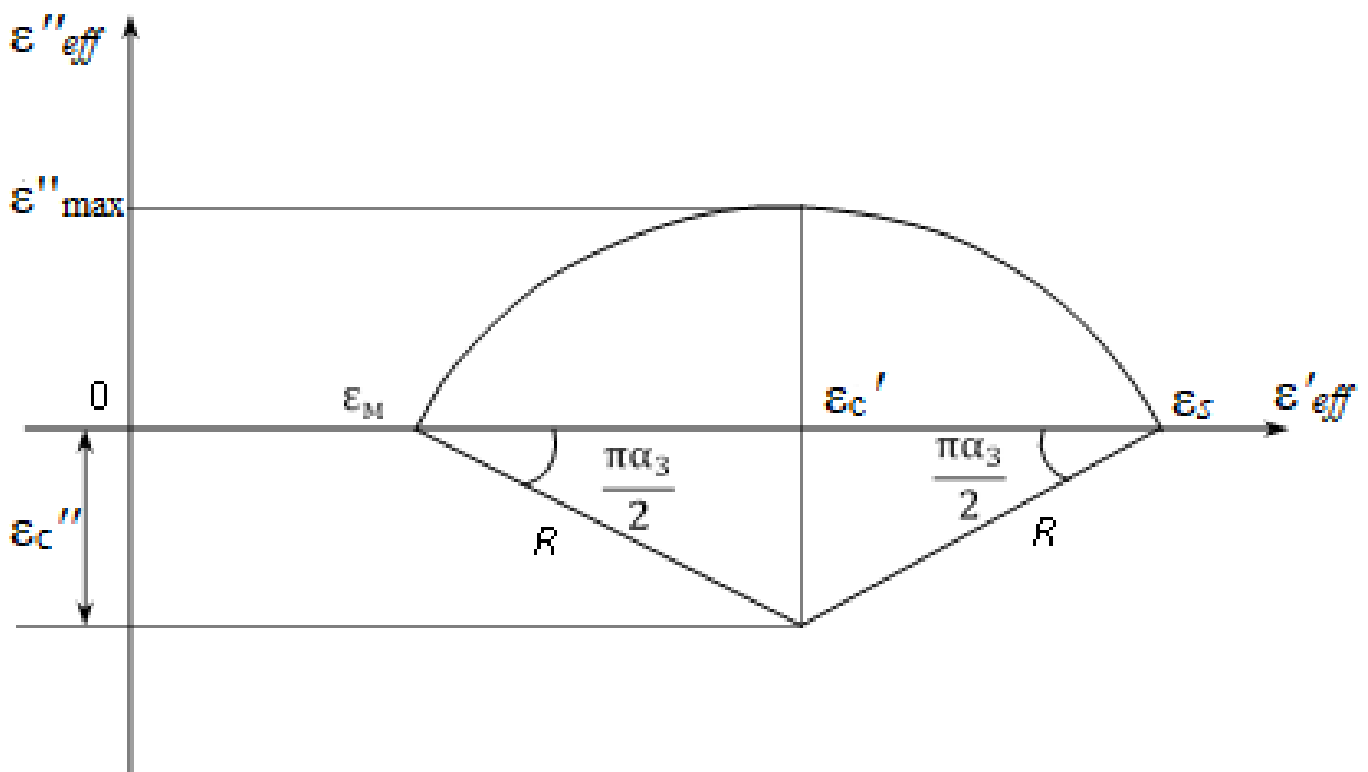


Рис. 3.2. Діаграма Коула -Коула для спектра комплексної діелектричної проникності

де ε_M – діелектрична проникність матеріалу матриці,
 ε_S – діелектрична проникність наповнення матриці у статичному режимі,
 ε_c' та ε_c'' – координати центра дуги кола діаграми Коула-Коула.

Діаграма відображає той факт, що уявна складова ефективної діелектричної проникності зростає зі зростанням довжини хвилі. Вона досягає максимуму за збігу довжини хвилі і резонансні частоти поглинання. У подальшому зі зростанням довжини хвилі вона знижується. Це ж саме стосується зміни величини $(\sqrt{\varepsilon})''$, рівної $(\sqrt{\varepsilon \cdot \mu})''$ для немагнітних матеріалів.

Через це рівень поглинання електромагнітних хвиль в матеріалі шару товщиною d , обумовленим множником $e^{\frac{2\pi d}{\lambda}(\sqrt{\varepsilon \cdot \mu})''}$, з ростом довжини хвилі при $\lambda \leq \lambda_p$ змінюється незначно, а при подальшому зростанні λ швидко знижується. Тому, необхідно так вибирати довжину волокна при заданому його діаметрі та питомому опорі, щоб величина λ_p була не меншою за максимальну довжину хвилі заданого діапазону довжин хвиль.

3.2. Визначення коефіцієнтів екранування однорідних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону

Результати вимірювання коефіцієнтів екранування електричного поля промислової частоти напруженістю 178–180 В/м розробленими матеріалами наведено у табл. 3.5 та на рис. 3.3.

Суміш № 1 – водно-дисперсійна фарба з додаванням залізородного концентрату з ваговим вмістом 15 %, 30 %, 45% та 60 %.

Суміш № 2 – геополімерна фарба з додаванням залізородного концентрату з ваговим вмістом 15 %, 30 %, 45% та 60 %.

Суміш № 3 – геополімерна фарба з додаванням суміші залізорудного концентрату та GreyX у пропорції 1:1 з ваговим вмістом 15 %, 30 %, 45% та 60 %.

Таблиця 3.5

Коефіцієнти екранування K_S електричного поля промислової частоти*

Зразок матеріалу	K_S			
	15 %	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,1–1,2	1,3–1,4	1,6–1,7	2,8–2,9
№ 2	1,1–1,2	1,6–1,7	2,9–3,0	5,2–5,3
№ 3	1,3–1,4	1,8–1,9	4,2–4,3	8,5–8,6

*Коефіцієнт екранування $K_S = E_f/E_S$, де E_f – напруженість електричного поля джерела, E_S – напруженість електричного поля у зоні, захищеній екраном.

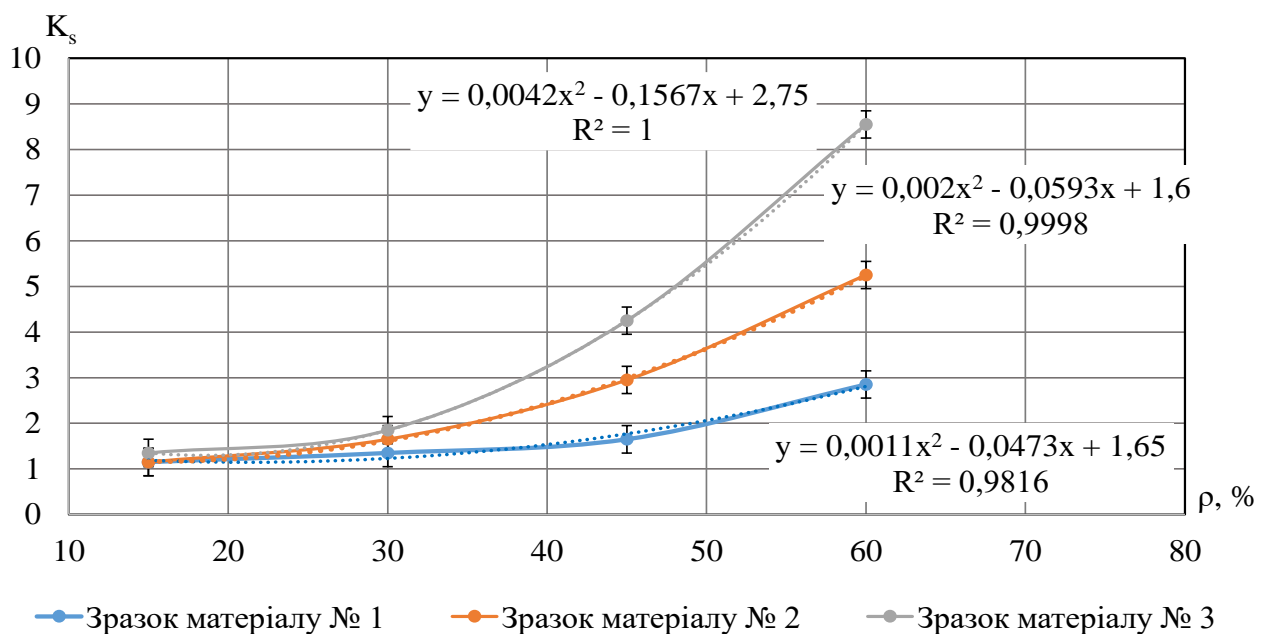


Рис. 3.3. Залежність коефіцієнтів екранування K_S електричного поля промислової частоти від вмісту екрануючої субстанції

Результати вимірювання коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти індукцією 280–285 мкТл наведено у табл. 3.6 та на рис. 3.4.

Таблиця 3.6

Коефіцієнти екранування K_S магнітного поля промислової частоти

Зразок матеріалу	K_S			
	15 %	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,2–1,3	1,5–1,6	2,5–2,6	3,7–3,8
№ 2	1,4–1,5	1,9–2,0	3,8–3,9	7,7–7,8
№ 3	1,2–1,3	1,6–1,7	2,8–2,9	5,6–5,7

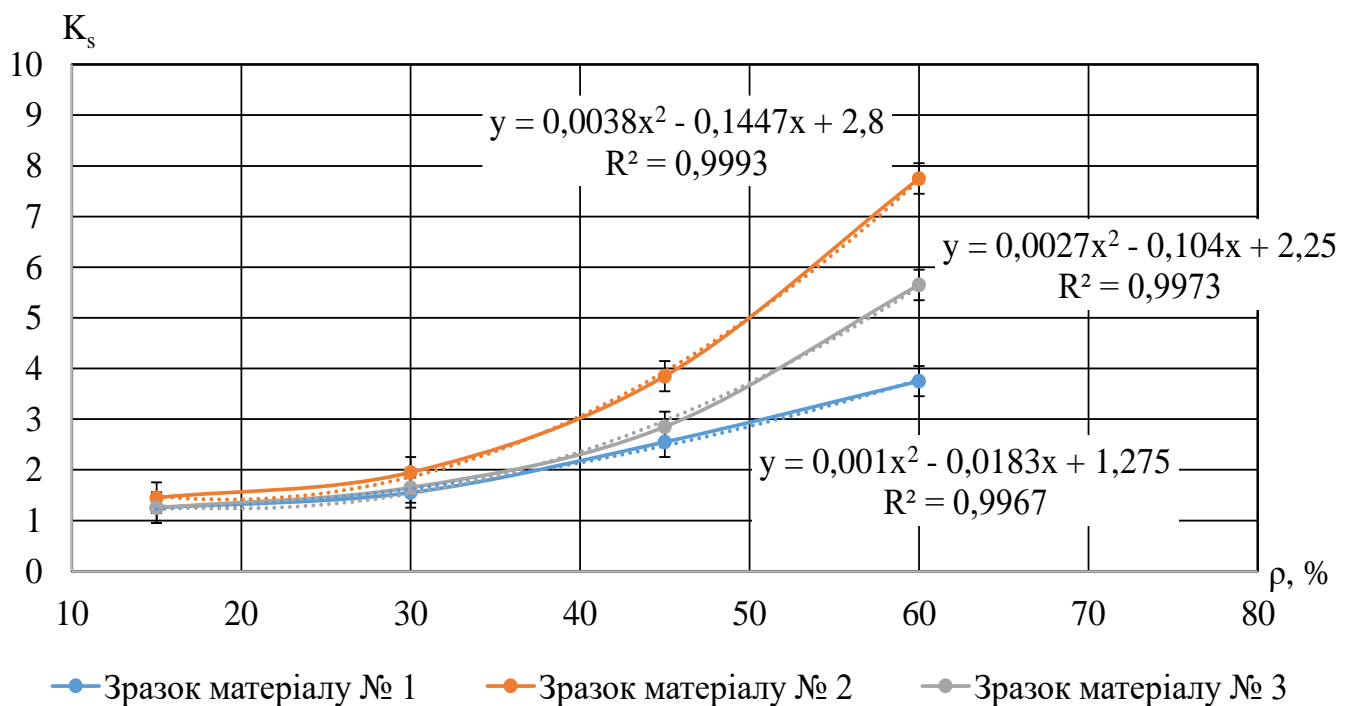


Рис. 3.4. Залежність коефіцієнтів екранування K_S магнітного поля промислової частоти від вмісту екрануючої субстанції

Результати вимірювань коефіцієнтів екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц щільністю потоку енергії 178–182 мкВт/см² наведено у таблиці 3.7 та на рис. 3.5.

Таблиця 3.7

Коефіцієнти екранування K_S електромагнітного поля ультрависокої частоти

Зразок матеріалу	K_S			
	15 %	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,2–1,3	1,3–1,4	1,8–1,9	4,0–4,1
№ 2	1,3–1,4	1,6–1,7	2,9–3,0	5,5–5,6
№ 3	1,7–1,8	2,3–2,4	4,0–4,1	7,8–7,9

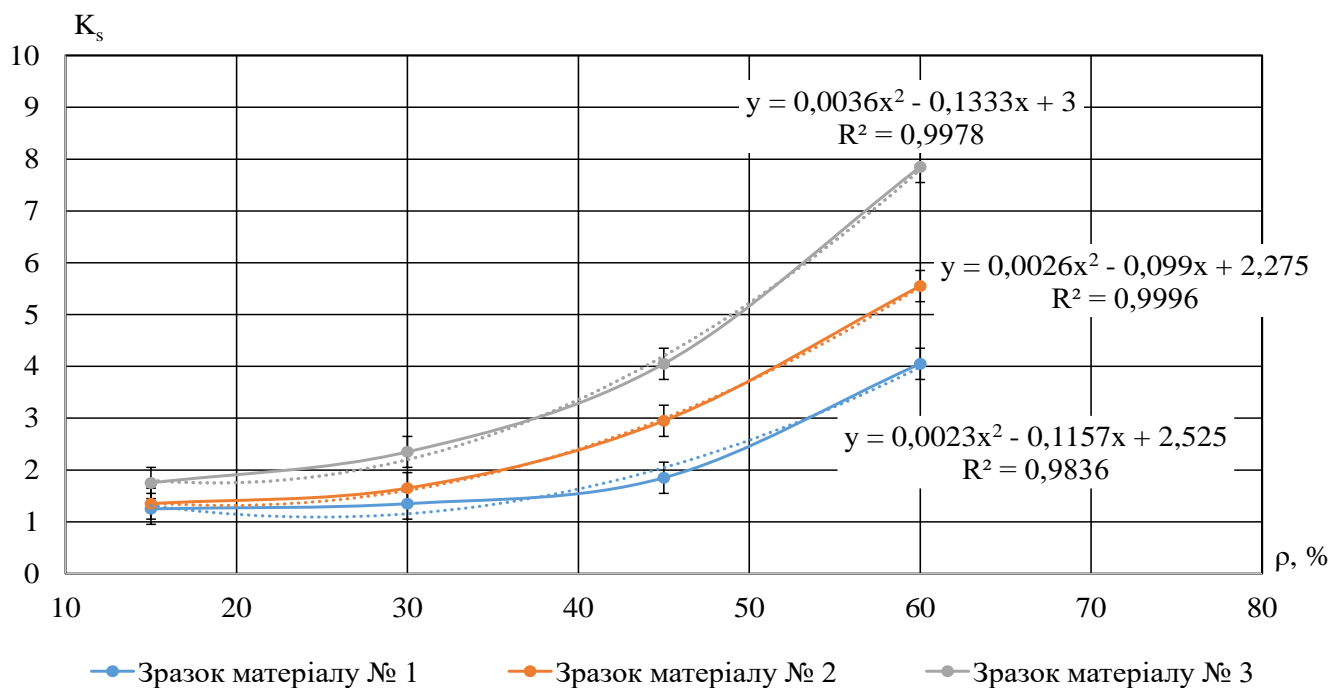


Рис. 3.5. Залежність коефіцієнтів екранування K_S електромагнітного поля ультрависокої частоти від вмісту екрануючої субстанції

Коефіцієнти відбиття, виміряні за методикою, описаною у [125], наведено у таблиці 3.8 і на рисунку 3.6.

Таблиця 3.8

Коефіцієнти відбиття K_r електромагнітного поля ультрависокої частоти*

Зразок матеріалу	K_r			
	15 %	30 %	45 %	60 %
№ 1	–	–	0,10–0,15	0,22–0,23
№ 2	–	–	0,15–0,18	0,28–0,29
№ 3	–	–	0,22–0,24	0,32–0,34

Примітка: *Ефект відбиття для концентрацій наповнювача 15, 30 % – за межами чутливості вимірювального приладу

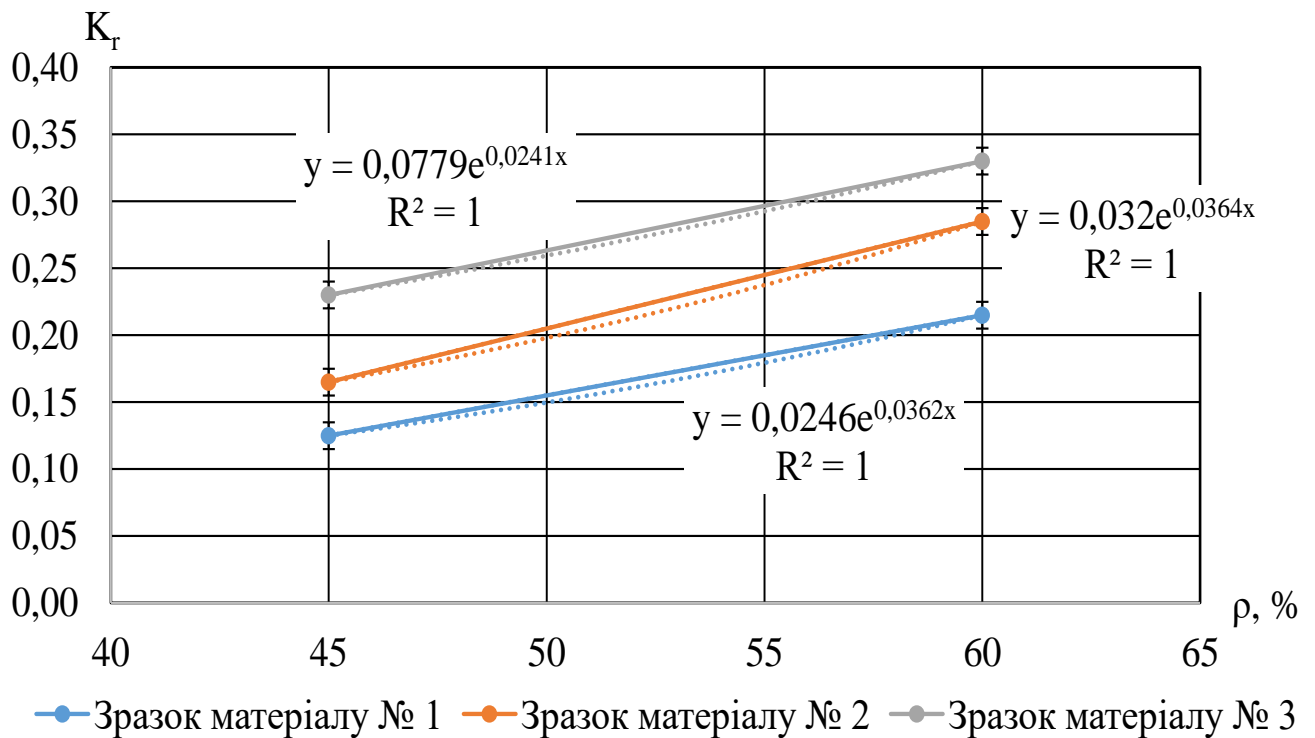


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнтів відбиття K_r електромагнітного поля ультрависокої частоти від вмісту екрануючої субстанції

Отримані коефіцієнти кореляції свідчать про достовірність результатів. Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати аналітичні функції залежності коефіцієнта екранування від вмісту екрануючого матеріалу.

Щоб отримати потрібні коефіцієнти екранування електромагнітного поля низькочастотного і високочастотного діапазону необхідно щоб ці функції у процесі проектування захисного матеріалу мали можливість однозначно визначити вміст екрануючого наповнювача у діелектричній матриці.

З отриманих результатів випливає, що запропоновані матеріали придатні для захисту людей від електромагнітних впливів у виробничих та побутових умовах, принаймні з ваговим вмістом екрануючої субстанції більше 45 %. Оскільки густина металовмісного наповнювача і фарб які використовувалися різні, то вміст наповнювачів за об'ємом є набагато меншим ніж вміст за вагою. Отже наповнювач не впливає суттєво на зчеплення фарби з поверхнею на яку вона наноситься. А це є важливим для практичного застосування отриманих екрануючих матеріалів.

Аналіз результатів вимірювань, наведених у табл. 3.5–3.7, свідчить, що загальні коефіцієнти екранування з ваговим вмістом наповнювача 45 % і 60 % цілком прийнятні для практичного застосування розроблених сумішей. Найнижчі коефіцієнти екранування матеріалу на основі водно-дисперсної фарби пояснюються частковим окисленням наповнювача водою. Цей процес не здійснюється при таких концентраціях залізорудного концентрату у геополімерній фарбі. Відомо, що захисні властивості значною мірою залежать від провідності матеріалу. Тому за наявності контакту між окремими частинками провідність у сумішах № 2 та № 3 більша через відсутність окислення та більшу провідність матеріалу GreyX порівняно з концентратом руди. Крім того, його дисперсність вища, що спрощує утворення ланцюгів провідності.

Перерахунок концентрацій наповнювача за вагою у об'ємну концентрацію, свідчать, що ваговим концентраціям 45 % і 60 % відповідають об'ємні 15 % та 28 %. За таких концентрацій досягається поріг провідності і відбувається значне підвищення коефіцієнтів екранування.

Факт можливого досягнення перколяційного ефекту на межі 60 % наповнення потребує додаткового уточнення. Крім того, необхідно дослідити вплив поверхні нанесення суміші. У попередньому випадку, екрануюча суміш

наносилася на дерев'яну поверхню. На наступному етапі суміш наносилася на картон.

Результати випробувань наведені у таблицях 3.9–3.12.

Таблиця 3.9

Коефіцієнти екранування електричної складової електромагнітного поля промислової частоти за різного вмісту екрануючої субстанції

Матеріал	Коефіцієнти екранування	
	60 %	70 %
Водно-дисперсійна фарба	2,4–2,5	2,6–2,7
Геополімерна фарба	5,0–5,1	5,2–5,3
Геополімерна фарба і пігмент	8,6–8,7	9,0–9,1

Таблиця 3.10

Коефіцієнти екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти за різного вмісту екрануючої субстанції

Матеріал	Коефіцієнти екранування	
	60 %	70 %
Водно-дисперсійна фарба	3,4–3,5	4,5–4,6
Геополімерна фарба	7,9–8,0	8,9–9,0
Геополімерна фарба і пігмент	5,7–5,8	6,1–6,2

Таблиця 3.11

Коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти за різного вмісту екрануючої субстанції

Матеріал	Коефіцієнти екранування	
	60 %	70 %
Водно-дисперсійна фарба	3,7–3,8	4,4–4,5
Геополімерна фарба	5,7–5,8	6,4–6,5
Геополімерна фарба і пігмент	4,1–4,2	8,4–8,5

Таблиця 3.12

Коефіцієнти відбиття електромагнітного поля ультрависокої частоти за різного вмісту екрануючої субстанції

Матеріал	Коефіцієнти відбиття	
	60 %	70 %
Водно-дисперсійна фарба	0,20–0,21	0,23–0,24
Геополімерна фарба	0,16–0,17	0,21–0,22
Геополімерна фарба і пігмент	0,32–0,33	0,37–0,38

Наведені у таблицях дані свідчать, що за того ж вмісту залізорудного концентрату 60 % коефіцієнти екранування на картоні дещо знизилися. З великою ймовірністю можна зробити висновок що це обумовлено зменшенням компактності розташування екрануючих частинок при нанесенні суміші на картон. В той самий час підвищення концентрації екрануючих частинок на 10% значно підвищує коефіцієнти екранування як низькочастотного, так і високочастотного полів. Тобто, можна дійти висновку, що це обумовлено підвищенням провідності. Негативним явищем є підвищення коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль, що цілком очікувано. Також слід враховувати, що за таких концентрацій екрануючої субстанції захисна суміш має властивості рідкої шпаклівки.

Наведені вище дані електромагнітних полів найбільш поширених частот і джерел. Але, найбільш масовим технічним засобом що використовується у виробничому і навчальному процесі є персональні комп'ютери різних типів. Для усієї комп'ютерної техніки існують контрольні смуги частот, для яких встановлені гранично допустимі рівні електричних і магнітних полів. Це смуги 5 Гц–2000 Гц та 2 кГц–400 кГц. Тому було досліджено необхідність екранування окремих компонентів персонального комп'ютера та зниження рівнів полів у приміщеннях де вони експлуатуються. Дослідження показали, що часткові системні блоки персонального комп'ютера у низькочастотній області наближаються до гранично

допустимих рівнів, (табл. 3.13) а магнітні поля джерел безперебійного живлення значно перевищують їх (табл. 3.14).

Таблиця 3.13

Значення електричних та магнітних полів системних блоків персональних комп'ютерів у смузі частот 5 Гц–2 кГц

Потужність, Вт	E , В/м	B , нТ
450	1–3	28–35
650	4–7	58–84
850	9–11	114–186
1200	18–22	220–245

Таблиця 3.14

Рівні магнітних полів джерел безперебійного живлення у смузі частот 5 Гц –2 кГц

Потужність, Вт	B , нТ	
	фронтальна зона	бокова зона
600	110–130	120–150
1050	750–1100	710–1350
1600	1850–2200	1630–2250

Враховуючи окреме розташування цих агрегатів на робочому місці їх доцільно заекранувати.

Для екранування джерел безперебійного живлення було застосовано металополімерний матеріал завтовшки до 1 мм з вмістом концентрату залізної руди 45–50 %.

Таблиця 3.15

Ефективність екранування джерела безперебійного живлення комп'ютера
металополімерними матеріалами

Фронтальна зона		Бокова зона	
Вихідне	Екрановане	Вихідне	Екрановане
130	35	150	38
1100	210	1350	230
2200	240	2250	255

Як видно з отриманих результатів екрановане поле відповідає нормам Європейським стандартам MPR II (250 нТл). Для деяких застосувань коефіцієнти екранування, наведені у таблицях 3.13–3.15 є недостатніми, тобто потребують підвищення ефективності захисту, бажано без втрати технологічності застосування рідкої суміші. Теоретичні міркування свідчать, що найбільш прийнятним способом є підвищення провідності матеріалу, що можливо за рахунок додавання графіту достатньої провідності.

Для проведення дослідження у якості матриці обрано дисперсійну фарбу, у яку додається наповнювач. У таблиці 3.15 вона має як матриця найгірші показники, але водно-дисперсійні фарби дуже поширені, тому зручні у засосуванні та мають низьку вартість. Як наповнювачі використовували концентрат залізної руди з переважним ваговим вмістом магнетиту до 75–80 % та ливарний лускатий графіт. Оскільки вони у достатніх кількостях виробляються в Україні. Для того, щоб дослідити екрануючі властивості матеріалів вимірювання здійснювалися у діапазоні наднизьких частот для електричної складової та промислової частоти 50 Гц для магнітної складової електромагнітного поля.

Вимірювання проводилися за допомогою каліброваного вимірювача напруженостей електричного та магнітного поля ПЗ-50. Основна похибка вимірювань не перевищувала 1 дБ. Визначення щільності потоку енергії електромагнітного поля ультрависокої частоти здійснювалися з використанням

каліброваного приладу ПЗ-31 на частоті 2,45 ГГц. При цьому максимальна основна похибка вимірювань не перевищувала 2,7 дБ.

Для вимірювання коефіцієнтів екранування використовувався замкнений екран розмірами (0,2×0,2×0,2) м, вимірювальна антена вміщувалася усередину через технологічний отвір. Товщина захисного шару дорівнювала 60–70 мкм.

Коефіцієнт екранування дорівнює відношенню напруженості поля або щільності потоку енергії перед екраном до напруженості поля або щільності потоку енергії у захищеній зоні.

Вимірювання зміни напруженостей електричної, магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти та щільності потоку енергії внаслідок її екранування здійснювалося послідовно.

Результати екранування електричної складової електромагнітного поля промислової частоти від вагового вмісту наповнювача наведено на рисунку 3.7.

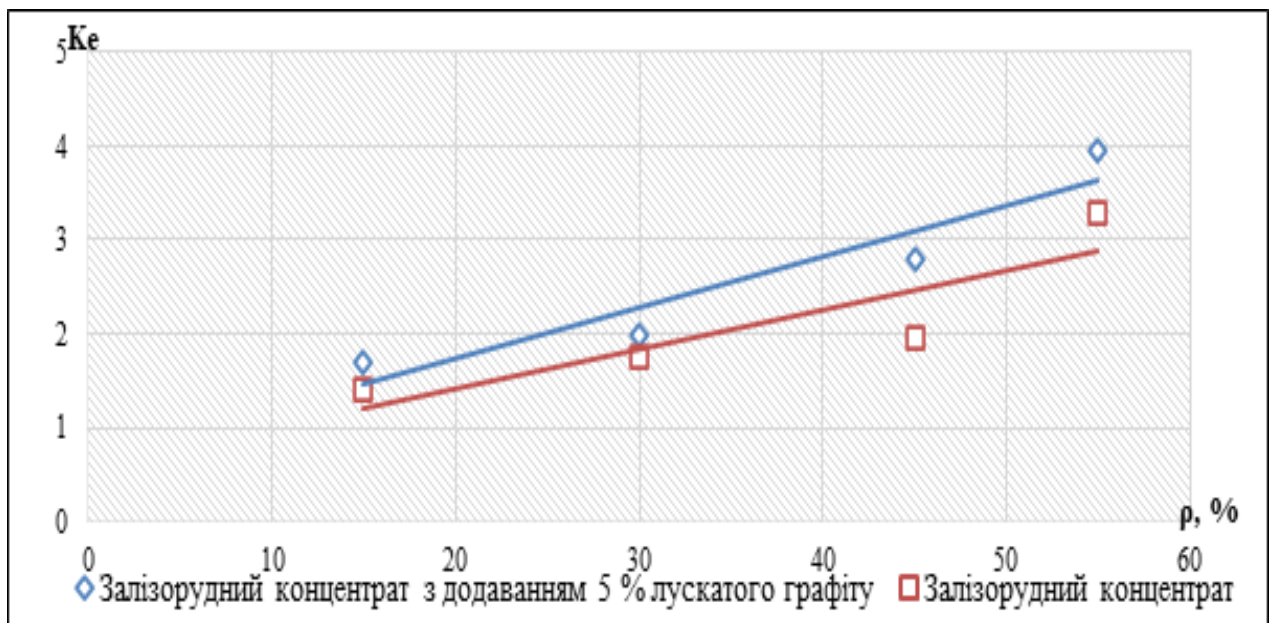


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнтів екранування електричного поля промислової частоти (K_e) від вагового вмісту наповнювача (ρ , %)

Аналогічні вимірювання проводилися щодо магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти, рисунку 3.8.

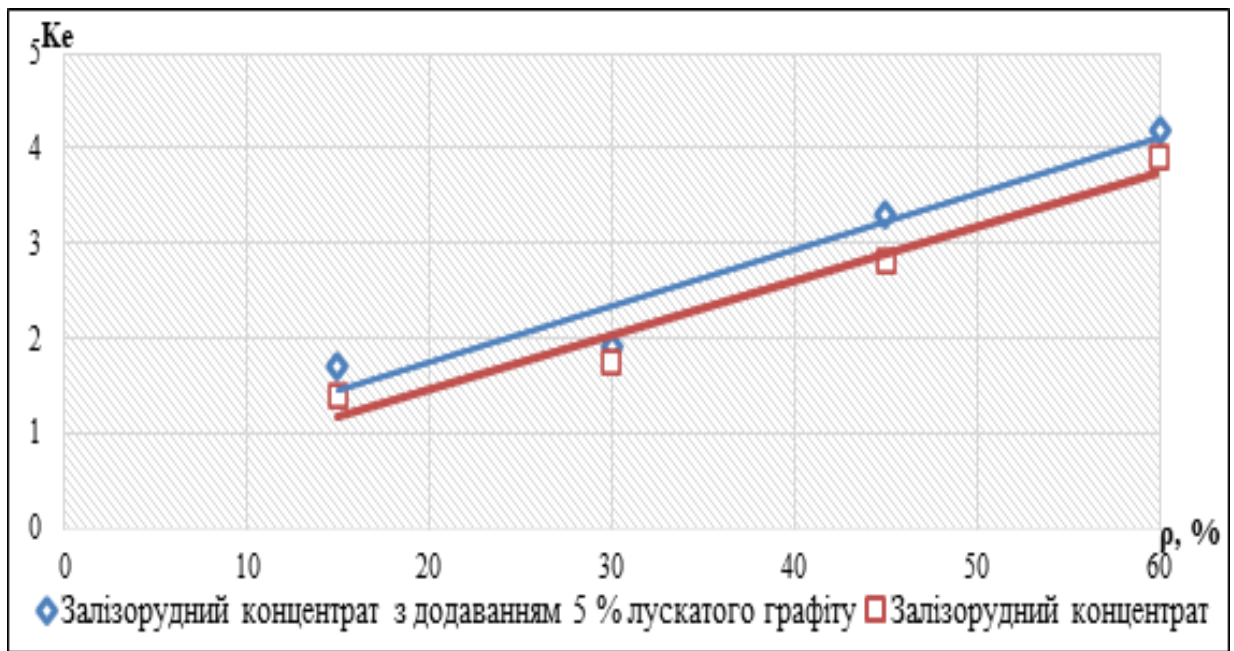


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти (K_e) від вагового вмісту наповнювача ($\rho, \%$)

Результати екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц наведено на рисунку 3.9.

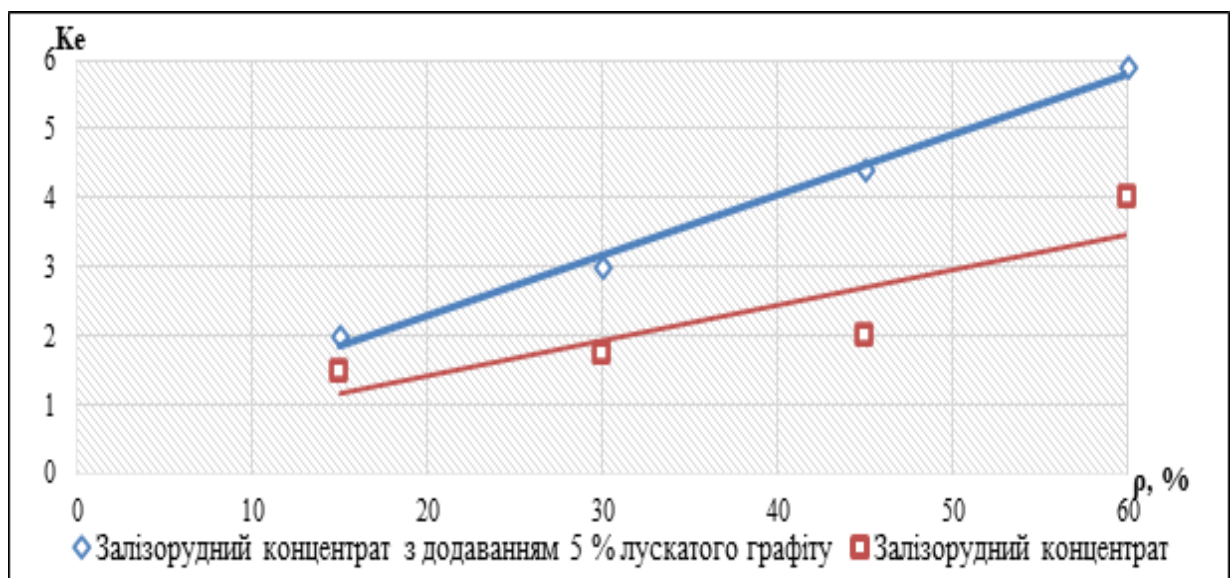


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнтів екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти (K_e) від вагового вмісту наповнювача ($\rho, \%$)

З результатів, поданих на рис. 3.7–3.9, можна зробити висновки, що додавання навіть невеликої кількості лускатого графіту суттєво збільшує коефіцієнти екранування низькочастотного електричного та високочастотного електромагнітного полів. Зрозуміло, це пов'язано з підвищенням провідності матеріалу (питома провідність даного графіту – $1,0 \cdot 10^{-2}$ – $2,0 \cdot 10^{-2}$ См/м), а основного наповнювача – магнетиту – порядку 10^{-4} См/м. Вплив графіту на напруженості магнітного поля майже відсутній, через те, що цей параметр обумовлений лише магнітними властивостями компонентів матеріалу. Отримані результати можна пояснити з точки зору фундаментальних положень електродинаміки суцільних середовищ.

Слід зазначити що з ваговим вмістом 5 % лускатого графіту не впливає на адгезійні властивості суміші та перспективним напрямом підвищення ефективності є збільшення його концентрації. Але при цьому необхідно контролювати зміну реологічних і адгезійних властивостей суміші.

3.3. Дослідження коефіцієнтів екранування матеріалів з градієнтом електрофізичних властивостей

Відомо, що загальний коефіцієнт екранування залежить від відбивальних і поглинальних властивостей захисного матеріалу. Для високочастотних полів високі коефіцієнти відбиття, з точки зору захисту людей, є небажаними. Як зазначалося вище, для мінімізації коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль потрібно наблизити хвильовий опір (імпеданс) поверхневого шару матеріалу до показника повітря (377 Ом). Такий показник відповідає однаковим чисельним значенням магнітної та діелектричної проникностей. Але в цьому випадку не забезпечуються високі коефіцієнти поглинання електромагнітної енергії, принаймні у широкому частотному діапазоні. Для поглинання магнітної складової електромагнітного поля наднизької частоти необхідні високі значення магнітної проникності. Для захисту від високочастотних полів необхідна висока провідність

матеріалу, що автоматично веде до підвищення коефіцієнту відбиття. Для узгодження вимог мінімізації відбиття і збільшення поглинання електромагнітної енергії доцільно розробити структуру з градієнтом електрофізичних та магнітних властивостей. Поверхневий шар буде забезпечувати мінімально досяжний коефіцієнт відбиття – внутрішні високі поглинальні властивості матеріалу.

Застосування композиційних матеріалів (металополімерів) дозволяє розв'язати завдання одночасного зменшення рівнів електричних та магнітних полів наднизьких частот – промислової та її гармонік. Велика кількість полімерів мають суттєві відносні діелектричні проникності. Наприклад, латекс, який застосовувався в якості матриці має $\epsilon \approx 24$, що автоматично забезпечує високі коефіцієнти відбиття. Водночас залізорудний пил, який звикористовувався в якості екрануючого наповнювача, має $\epsilon \approx 1,5$. Дослідження свідчать, що під час термічної обробки металолатексного матеріалу в приповерхневому шарі відбувається накопичення металовмістких залізорудних частинок. Таким чином, знизити коефіцієнт відбиття матеріалом можна через створення градієнту концентрації частинок наповнювача під час нагрівання і вулканізації поверхневого шару (рис. 3.10).

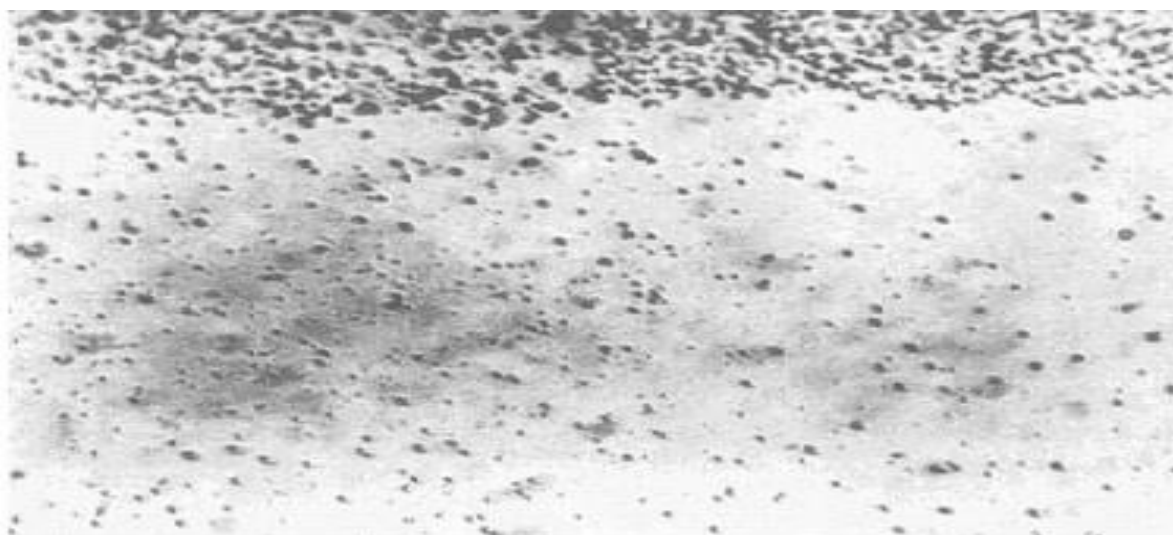


Рис. 3.10. Переріз термообробленого зразка металополімерного матеріалу

З рисунку видно, що тонкий приповерхневий шар, насичений в основному залізорудними частинками, наближає діелектричну проникність для таких композицій до мінімально можливих значень. Через вміст заліза та його оксидів металополімерний композит має високі екранувальні властивості низькочастотних електричних та магнітних полів. Результати експериментів та теоретичні виведення вказують, що можна отримати захисний матеріал градієнтного типу без нанесення окремих шарів з металополімерної суміші. Для цього потрібно створити градієнт концентрації екрануючої субстанції по всій товщині полімерної матриці. Це здійснюється шляхом внесення залізорудного пилу різної дисперсності і з різною вагою окремих частинок, які мають різну швидкість осідання у рідкій суміші (рис. 3.11).

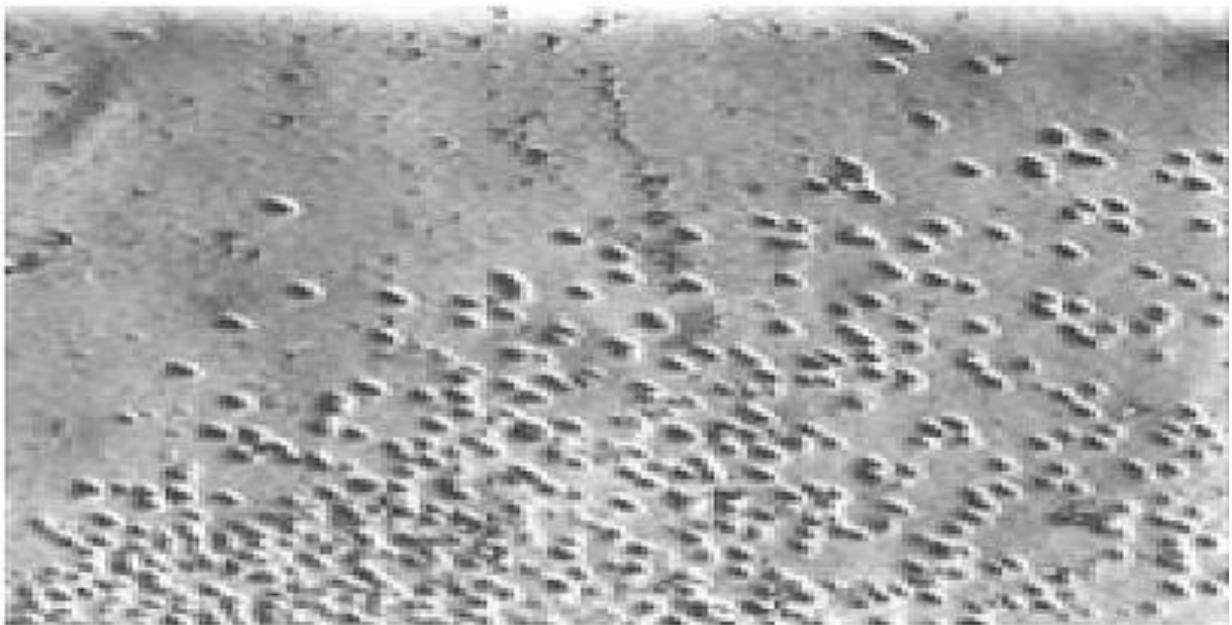


Рис. 3.11. Градієнт концентрації залізорудних частинок у полімерній матриці

Запропонований метод дозволяє використовувати градієнтний матеріал без металевої підкладки. Таке можна здійснити способом оброблення готової вихідної суміші, наливої на пласку поверхню, постійним неоднорідним магнітним полем. Це створить градієнт екрануючих частинок з ущільненням у нижній частині

розчину, під яким розташовані магніти. Доцільно використовувати наповнювач з вищими магнітними властивостями, наприклад, залізорудний концентрат, що має дисперсність 150–200 мкм і гарно перемішується з рідким полімером. Але одночасне отримання верхнього насиченого залізорудним пилом шару та поступове ущільнення розподілу частинок у напрямку нижньої сторони матеріалу досить складне, тому в кожному випадку необхідно вибрати пріоритетний фактор впливу на електромагнітну обстановку і обрати конструктивні рішення щодо впровадження екранування.

Аналогічний ефект можна отримати у інший спосіб. Для цього було виготовлено серію рідких екрануючих сумішей на основі стандартних сертифікованих фарб (матриця) та дрібнодисперсного магнетиту (екрануючий наповнювач). Результати випробувань захисних властивостей таких сумішей наведено у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16

Коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти

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

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

Випробування щодо внеску у загальний коефіцієнт екранування відбиття електромагнітних хвиль наведено у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17

Коефіцієнти відбиття електромагнітного поля ультрависокої частоти

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

На наступному етапі на поверхню наносилися послідовно 2–3 шари сумішей. Нижній шар мав концентрацію екрануючої субстанції 60 %, верхній 30–45 % (таб. 3.18).

Таблиця 3.18

Коефіцієнти екранування та відбиття багатошарових покриттів

Тип покриття	Коефіцієнти екранування	Коефіцієнти відбиття
Двошарове покриття на основі водно-дисперсної фарби (45, 60 %)	6,2–6,3	0,10–0,15
Тришарове покриття на основі геополімерної фарби (30, 45, 60 %)	11–12	0,15–0,16

Значне підвищення ефективності тришарової структури порівняно з сумарною ефективністю шарів можна пояснити додатковим розсіюванням електромагнітних хвиль на границях розділу шарів.

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

Для визначення ефективності матеріалу слід попередньо обчислити електрофізичні та магнітні властивості кінцевого матеріалу.

3.4. Розрахункові методи прогнозування захисних властивостей композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону

Для розрахунків з проектування захисних конструкцій потрібної ефективності необхідні кількісні значення магнітних та електрофізичних характеристик матеріалів – ефективних магнітної та діелектричної проникностей, а також питомої провідності. Але для композиційних матеріалів ці дані відсутні. Тому їх доцільно розрахувати, виходячи з параметрів компонентів композиції та співвідношення їх вмісту у матеріалі.

Припустимо, що частинки наповнювача однакові за розміром та формою і розподілені у діелектричній матриці рівномірно. Вважаємо, що об'ємний коефіцієнт заповнення матриці екрануючими частинками невеликий, тобто частинки не впливають одна на одну. У цьому випадку можна використати співвідношення Лорентца для магнітної проникності магнітодіелектриків:

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

де μ – ефективна магнітна проникність магнітодіелектрика,

μ_m – магнітна проникність наповнювача,

v_m – об'ємний вміст наповнювача у матеріалі.

У більшості випадків при виготовленні композиції зручно змінювати ваговий вміст наповнювача (як у даній роботі), що обумовлено його порошкоподібним

станом та високою дисперсністю.

Для перерахунків слід користуватися співвідношенням:

$$\frac{V_m}{V_d} = \frac{k\rho_d}{\rho_m},$$

де V_m , V_d – об’єми наповнювача та діелектрика; ρ_m , ρ_d – густина наповнювача та діелектрика;

$k = \frac{P_m}{P_d}$ – відношення ваги наповнювача та діелектрика.

Для визначення ефективної діелектричної проникності композиції ε доцільно скористатися співвідношенням Максвелла-Гарнета, яка справедлива для $v_m < 1/3$:

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

ε_d , ε_m – діелектричні проникності матриці та наповнювача,

v_m – об’ємна доля наповнювача у діелектричній матриці.

Матеріали матриці та наповнювача поширені, тому їх діелектричні проникності відомі. У разі потреби, ці величини можна виміряти стандартними приладами.

Для розрахунку ефективної діелектричної проникності багатокомпонентної статистичної гетеросистеми з врахуванням фактору деполяризації для сферичних і еліпсоподібних включень доцільно використовувати наступні співвідношення.

Фактор поля для сферичних включень має вигляд:

$$\Theta_i = \frac{3\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_{eff}},$$

Використовуючи загальну формулу, отримаємо так звану формулу Бругемана, також відому як наближення ефективного середовища:

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

Дана формула може бути узагальнена на випадок еліпсоїдальної форми ввімкнень, що дає такзвану, загальну формулу Бругемана:

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

Фактор деполаризації L_i визначає локальне електричне поле в області i -тої фази:

Для сфери:

$$L_x = L_y = L_z = 1/3,$$

Для циліндра:

$$L_{\parallel} = 0, L_{\perp} = 1/2, L_{\parallel} + 2L_{\perp} = 1,$$

Критерієм протікання (перколяції) є співвідношення:

$$\vartheta_{m_i} \geq 1/3,$$

При досягненні критерію протікання стає можливим неперервний контакт ввімкнення даної фази, тобто частини фази є зв'язаними.

Для двокомпонентного композита обидві фази зв'язані, якщо:

$$\frac{1}{3} \leq \vartheta_{m_i} \leq \frac{2}{3},$$

Таким чином різке підвищення захисних властивостей відбувається за об'ємного вмісту екрануючого наповнювача більше 1/3.

У багатьох випадках частинки наповнювача не можна вважати сферичними, тому для визначення ефективної діелектричної проникності композиції доцільно скористатися формулою Оделевського:

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

де $\varepsilon_d, \varepsilon_m$ – діелектричні проникності матриці та наповнювача,
 ν_m – об'ємний вміст наповнювача,
 ν_k – критичний об'ємний вміст наповнювача, за якого екрануючі частинки контактують між собою,

F – коефіцієнт деполяризації:

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

де l – середня довжина частинки,

d – середній діаметр.

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

Показник ν_k є дуже важливим для проектування композиційних матеріалів. Як показано у [118], різке підвищення коефіцієнта екранування спостерігається за

досягнення порогу протікання електричного струму (формується ланцюг провідності при контакті частинок наповнювача). Це узгоджується з положеннями електродинаміки суцільних середовищ.

Розраховавши ефективні значення магнітної та діелектричної проникностей, можна визначити усі параметри, які потрібні для проєктування захисного матеріалу. Виходячи зі співвідношення

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'',$$

та враховуючи, що у діапазоні наднизьких та низьких частот уявна частина комплексної діелектричної проникності ε'' набагато більша за ε' , якою можна знехтувати

$$\varepsilon = \varepsilon'' = \frac{4\pi\sigma}{\omega},$$

де σ – питома провідність матеріалу,

ω – колова частота електромагнітного поля.

Це співвідношення надає можливість визначити питому провідність матеріалу. З отриманих даних можна визначити еквівалентну глибину проникнення поля у матеріал (глибина, на якій поле знижується у $e=2,7$ разів).

Наприклад, для електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот еквівалентна глибина проникнення δ визначається як:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_a\sigma}},$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність, $\mu_a = \mu_0\mu$

Якщо, наприклад, поле потрібно зменшити у 10 разів, то товщина захисного екрана не повинна бути меншою за $2,3\delta$.

Отримані дані надають можливість попередньо оцінити співвідношення основних параметрів захисного композиційного матеріалу, прискорити і знизити

вартість проектних робіт.

Висновки до розділу 3

1. Для виготовлення рідких екрануючих композицій від електромагнітних полів прийнятними є стандартні акрилові водно-дисперсійні та геополімерні фарби. Для виготовлення металополімерного матеріалу застосовувався рідкий латекс.

2. У якості екрануючих наповнювачів використовувався дрібнодисперсний залізорудний концентрат та пігментний наповнювач GreyX. Дисперсійний аналіз наповнювачів показав, що переважною фракцією залізорудного концентрату є частинки розмірами 45–50 мкм. Наповнювач GreyX має переважну фракцію 90–100 мкм. Додатково застосовувався лускатий графіт, який виробляється серійно.

3. Дослідження захисних властивостей композиції на основі водно-дисперсійної фарби показали, що з ваговим вмістом залізорудного концентрату 15–60 % коефіцієнти екранування електричного поля промислової частоти складуть – 1,1–2,9; магнітного поля промислової частоти 1,2–3,8; електромагнітного поля ультрависокої частоти 2,45 ГГц – 1,2–4,1. Для геополімерної фарби з таким же вмістом залізорудного концентрату коефіцієнти екранування складають: по електричному полю промислової частоти – 1,1–5,3; магнітному полю промислової частоти – 1,4–7,8; електромагнітному полю ультрависокої частоти – 1,3–5,6. Для геополімерної фарби з вмістом GreyX та залізорудного концентрату у пропорції 1:1 при тому ж ваговому вмісті коефіцієнти екранування складають: по електричному полю промислової частоти – 1,3–8,6; по магнітному полю промислової частоти – 1,2–5,7; електромагнітному полю ультрависокої частоти – 1,7–7,9. При цьому коефіцієнти відбиття електромагнітного поля ультрависокої частоти склали: для водно-дисперсійної фарби при ваговому вмісті залізорудного концентрату 15–60 % – 0,1–0,23; для

геополімерної фарби – 0,15–0,29; геополімерної з вмістом GreyX – 0,22–0,34. Визначено фізичні механізми розбіжностей захисних властивостей. Головним з них є зміна провідності матеріалів на межі перколяційного ефекту.

4. Додавання у екрануючу композицію лускатого графіту з ваговим вмістом 5 % підвищує ефективність матеріалу. Коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти зростають на 48–52 % за однакового вмісту залізородного концентрату. Коефіцієнти екранування електричного поля промислової частоти – на 38–40 %. Коефіцієнти екранування магнітного поля здійснюються у межах похибки вимірювань, що пояснюється відсутністю у графіту магнітних властивостей.

5. Обґрунтовано і досліджено захисні властивості матеріалів з градієнтом електрофізичних властивостей. Двошарове покриття з ваговим вмістом залізородного концентрату 45 % у зовнішньому шарі та у внутрішньому шарі 60 % має коефіцієнти відбиття 0,10–0,15, коефіцієнти екранування 6,2–6,3. Для тришарового покриття ці показники складають 0,15–0,16, 11–12 відповідно. Значне підвищення коефіцієнта екранування порівняно з одношаровими покриттями пояснюється додатковим розсіюванням електромагнітних хвиль на границях шарів.

6. Вдосконалені розрахункові методи прогнозування електрофізичних і магнітних властивостей на основі вагових вмістів наповнювача у діелектричній матриці спрощують процес проектування захисних рідинних матеріалів з потрібними коефіцієнтами відбиття та загального екранування.

Основні положення розділу 3 опубліковані автором у наукових працях [1], [2], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

РОЗДІЛ 4. ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ШИРОКОГО ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ ЯК СКЛАДОВА ОРГАНІЗАЦІЙНО - ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ БЕЗПЕКИ

4.1. Особливості розроблення заходів і засобів забезпечення електромагнітної безпеки працюючих

Основним найбільш сучасним підходом до проєктування заходів і засобів безпеки у будь-якій галузі промисловості та факторів шкідливого та небезпечного впливу на людей є ризик – орієнтований підхід.

Мінімізація ризиків для здоров'я людей у виробничих та побутових умовах майже в усіх сферах діяльності базується на статистичних даних щодо кількості та причин смертельних випадків, травмування, професійних захворювань тощо. Але щодо фізичних факторів техногенного походження, таких як електромагнітні поля, потрібні дані «доза–ефект» або відсутні, або неоднозначні. Саме тому ВООЗ розповсюдило принцип ALAR на неіонізуючі поля та випромінювання й вимагає мінімізувати електромагнітні впливи на людей до технічно досяжних рівнів. Це обумовлює неможливість визначити ризики стандартними методами через невизначеність причинно-наслідкових зав'язків. В той же час у міжнародних, так і у національних нормативних актах з електромагнітної безпеки наведено гранично допустимі рівні електричних, магнітних та електромагнітних полів для усіх частотних діапазонів. Національними нормативами є [128, 14], міжнародний – обов'язковий додаток [15] до загальноєвропейської директиви [11]. Зважаючи на те, що це є єдині кількісні дані, доцільно розглянути можливості визначення ризиків впливу електромагнітних полів, виходячи з чинних гранично допустимих рівнів та кількісно визначити ступені технічного значення параметрів полів до гарантовано безпечних рівнів.

Ризик завжди пов'язаний з імовірністю несприятливих подій та їх наслідками. Його розрахункова залежність здійснюється, як правило, у мультиплікативній формі, яка дозволяє оцінити величину очікуваного наслідку:

$$R = \{ \langle S_i, P_i, X_i \rangle \}, \quad i=1, 2, \dots, n$$

де R – ризик, що оцінюється;

S_i – сценарій несприятливої події,

P_i – імовірність того, що несприятлива подія станеться,

X_i – можливі наслідки несприятливої події, якщо вона настане за імовірним сценарієм.

Для індивідуального ризику:

$$R_i = P_a P_{b/a},$$

де P_a – імовірність несприятливої події,

$P_{b/a}$ – імовірність наслідку (наприклад, професійного захворювання або смертельного випадку).

R_i можна вважати властивістю зони (фактору впливу у цій зоні), у межах якої існує імовірність несприятливої події. Ця імовірність обумовлена потенційно небезпечним фактором впливу. Різні види ризику визначаються різними способами. Найбільш поширеними є розбіжність між добровільними і недобровільними ризиками. Якщо ризик є добровільним, для його визначення зручно використовувати чинник β :

$$R_i = \beta * 10^{-4}, \quad (4.1)$$

Коефіцієнт $\beta=10$ – для повної свободи вибору, тоді $R_i=10^{-3}$, що відповідає максимальному ліміту прийняттого ризику.

Зазвичай працюючі, принаймні на енергонасичених підприємствах, обізнані про наявність електромагнітних виливів. Тому будемо орієнтуватися на значення $R_i=10^{-3}-10^{-4}$.

Хоча гранично допустимі рівні електричних магнітних та електромагнітних полів за визначенням є такі, що не викликають негативних змін здоров'я людини, встановлено, що нормативно визначені значення є такими, що ми можемо дозволити запровадити з технічних, економічних та певної частини гігієнічних міркувань. Вимога ВООЗ мінімізувати електромагнітні впливи до технічно досяжних пояснюється невизначеністю цих впливів, що підтверджено багатьма дослідженнями медиків та гігієністів. Про це, зокрема, свідчать значні розбіжності у значеннях ГДР у різних країнах та методики та критерії їх визначення. Тому ГДР електромагнітних впливів можна вважати компромісними і мінімально прийнятними на поточному етапі розвитку техніки й клінічних досліджень. Потребує з'ясування межа, нижче якої технічне зниження напруженостей електричних, магнітних полів наднизьких і проміжних частот та щільностей потоків енергії мікрохвильових випромінювань не має сенсу.

Згідно [128] безпечні для людей умови щодо впливу електромагнітних полів повинні відповідати умові:

$$\frac{E_1}{E_{1\text{ГДР}}} + \frac{E_2}{E_{2\text{ГДР}}} + \dots + \frac{E_n}{E_{n\text{ГДР}}} + \frac{H_1}{H_{1\text{ГДР}}} + \frac{H_2}{H_{2\text{ГДР}}} + \frac{H_n}{H_{n\text{ГДР}}} \dots + \frac{W_1}{W_{1\text{ГДР}}} + \frac{W_2}{W_{2\text{ГДР}}} + \dots + \frac{W_n}{W_{n\text{ГДР}}} \leq 1,$$

де $E_1, E_2, E_n, H_1, H_2, H_n, W_1, W_2, W_n$ – виміряні показники напруженостей полів та щільностей потоків енергії, з індексом ГДР – гранично допустимі рівні для визначених частот та рівні для визначених частот та частотних діапазонів.

У будь-якому випадку:

$$\frac{E}{E_{ГДР}} < 1, \quad \frac{H}{H_{ГДР}} < 1, \quad \frac{W}{W_{ГДР}} < 1.$$

Гранично допустимі напруженості електричних та магнітних полів промислової частоти у виробничих умовах складають відповідно 5000 В/м та 1400 А/м.

Якщо згідно (4.1) застосувати коефіцієнт 10^{-4} , то отримуємо значення 0,5 В/м та 0,14 А/м.

Як свідчать обстеження електромагнітної обстановки у багатьох будівлях, такі рівні полів притаманні більшості побутових приміщень зі стандартними мережами електроживлення та переліком електричного та електронного обладнання. Тобто, ці напруженості полів є мінімально можливими у будь-якій споруді, і є орієнтиром для зниження їх рівнів за рахунок організаційно-технічних заходів (наприклад, екранування).

Але у нормативній базі існує суттєва суперечність. У санітарних нормах [14] порівняння фактичних і гранично допустимих напруженостей електричних і магнітних полів здійснюється співвідношеннями:

$$\frac{E^2}{E_{ГДР}^2} \leq 1, \quad \frac{H^2}{H_{ГДР}^2} \leq 1.$$

У цьому випадку застосування коефіцієнт 10^{-4} дає значення 50 В/м та 14 А/м. Але такі рівні полів для більшості приміщень не можна вважати прийнятними. Наприклад, вони значно перевищують гранично допустимі значення для експлуатації комп'ютерної техніки (10 В/м та 0,20 А/м). Таке протиріччя потребує вирішення, на чому наполягають фахівці [16].

Щодо електромагнітних випромінювань ультрависоких частот, то гранично допустимий рівень для засобів мобільного зв'язку складає 100 мкВт/см² (радіотехнічного обладнання цивільної авіації – 15; 20 мкВт/см²).

У цьому випадку застосування коефіцієнта 10^{-4} дає значення цільностей потоків енергії діапазону $0,001-0,002$ мкВт/см². Але такі рівні полів є неприйнятними, через те що вони не забезпечують функціонування мобільного зв'язку. Слід враховувати, що мобільний зв'язок є прийнятним за рівнів сигналу, починаючи зі значень $0,08-0,10$ мкВт/см².

У нормативі [15], розробленому міжнародною комісією з неіонізуючих випромінювань, ГДР ще вищі – 50 Вт/м² для виробничих умов. Це 5000 мкВт/см². Пояснюється це тим, що згаданий норматив орієнтований на тепловий вплив високочастотного випромінювання, який є загрозою для життя, в той же час, як національні санітарні норми спираються на початок біохімічних змін та електрофізичні показники людини.

Аналогічно, ГДР для електричних та магнітних полів наднизьких частот [15] визначені на основі значення наведених електрострумів, тому їх значення заздалегідь високі. Тому цей норматив слід розглядати як такий, що його перевищення загрожує життю. Водночас більшість національних нормативів, наприклад, ФРН [129] містять ГДР, які за порядком відповідають національним з коефіцієнтами $10^{-4}-10^{-3}$, які на даному етапі гарантують мінімальний вплив електромагнітних полів на людей.

Наведений підхід до мінімізації ризиків для здоров'я працюючих, виходячи з чинних національних нормативів з електромагнітної безпеки не є беззаперечним. Але він, на нашу думку, дає можливість визначити межу зниження рівнів електромагнітних полів, яке є максимально доцільним і відповідає середньостатистичним побутовим умовам. Це певним чином конкретизує вимоги ВООЗ (принцип ALAR) і технічно досяжно для переважної більшості виробничих умов.

Крім того, впровадження екранування електромагнітних полів повинно враховувати той факт, що надлишкові коефіцієнти екранування електромагнітних полів можуть спричиняти шкоду здоров'ю людей та негативно впливати на

виробничі процеси (екранувати природне геомагнітне поле та унеможливити роботу засобів бездротового зв'язку)

Відомо, що понижене геомагнітне поле (гіпогеомагнітне поле) може негативно впливати на здоров'я людей [39], [126–127]. Тому воно нормується за можливим ступенем його зниження масивним феромагнітним обладнанням та магнітними екранами [130]. Напруженість геомагнітного поля складає 49–50 мкТл, з них – горизонтальна складова складає 44–45 мкТл, тому при облицюванні вертикальних конструкцій будівель і споруд (стін) необхідно враховувати можливість одночасного екранування електромагнітного поля техногенного походження та геомагнітного поля. Згідно з нормативом значення геомагнітного поля у виробничих умовах не може бути нижчим за 25 мкТл. Тому, при визначенні ефективності електромагнітного екрана слід враховувати часткове екранування геомагнітного поля. Особливо це стосується магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти. Не дивлячись на те, що у загальному випадку геомагнітне поле вважається стаціонарним, спостерігаються його незначні коливання, і воно екранується феромагнітним матеріалом, призначеним для екранування змінних магнітних полів наднизької частоти. Ступені екранування геомагнітного поля реєструються приладами для визначення амплітуд низькочастотних магнітних полів, наприклад, Spectran NF 5035 (рис. 4.1)

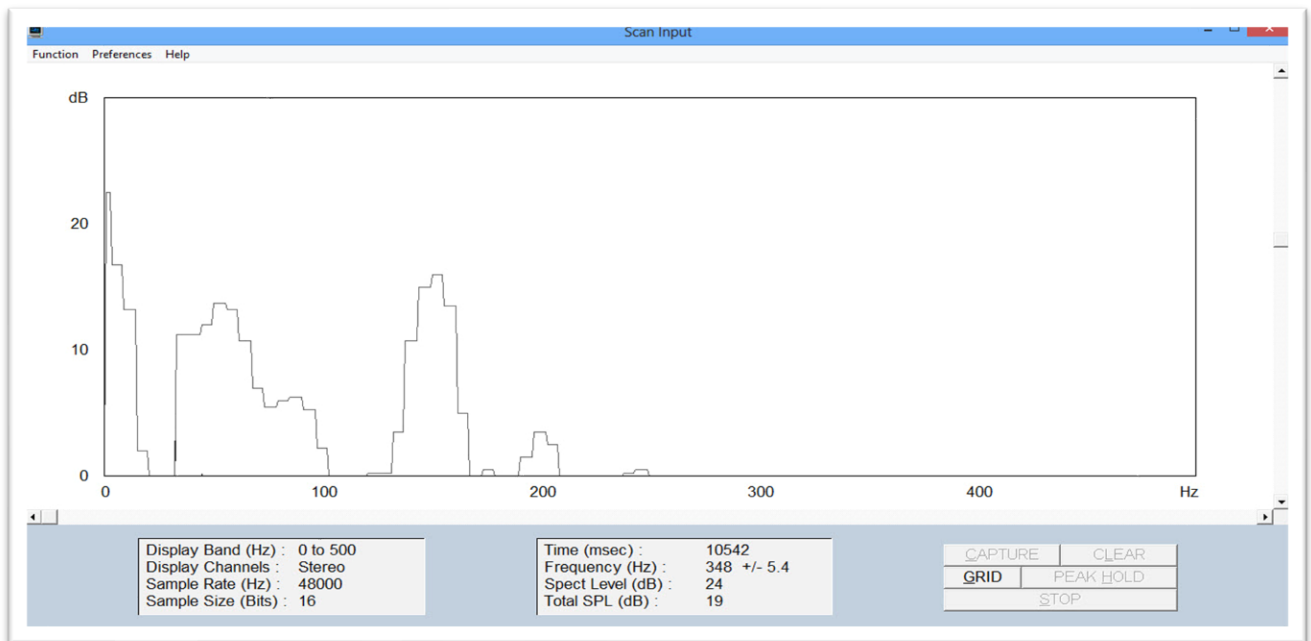


Рис. 4.1. Спектр магнітного поля наднизької частоти у виробничій будівлі

За потреби фактичні рівні геомагнітного поля можна виміряти вимірювачем стаціонарного магнітного поля МТМ – 01.

Наведений спектр висвітлює ще одну системну проблему екранування електромагнітного поля наднизької частоти. У чинних нормативах з електромагнітної безпеки нормуються електрична та магнітна складові електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц і відповідні методики передбачають вимірювання складових поля саме цієї частоти. Рекомендований прилад ПЗ-50. Але, як видно з рисунка, у спектрі присутнє магнітне поле частоти 150 Гц, яке навіть перевищує за амплітудою значення поля промислової частоти. Таке явище є системним і викликане як об'єктивними, так і суб'єктивними чинниками. Суб'єктивним чинником є нерівномірність електричного навантаження в окремих фазах трифазної силової мережі, що можна уникнути за рахунок контролю навантаження та усунення дисбалансу. Об'єктивним фактором є застосування у виробничих, навчальних та інших процесах технічних засобів з нелінійними вольт-амперними характеристиками. Такими засобами є комп'ютерна техніка, допоміжні пристрої, більшість електронного обладнання і навіть електронні системи керування електроприладами. Це є загальносвідомо

проблемою і повинно бути враховано при розробленні організаційно технічних заходів з електромагнітної безпеки, зокрема екранування електромагнітних полів.

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

Щодо електромагнітних полів дуже високих, ультрависоких і вищих частот, для яких суттєвим є можливість відбиття електромагнітних хвиль необхідно враховувати відбиття від захисних поверхонь. Це обумовлене можливістю відбиття електромагнітних хвиль у небажаному напрямку, що автоматично призводить до погіршення електромагнітної обстановки у певних зонах, та підвищення електромагнітного фону внаслідок перевідбиття у середині будівлі.

Головною проблемою є перерозподіл щільності потоків енергії внаслідок відбиття та перевідбиття електромагнітних хвиль. У більшості випадків такі перерозподіли непередбачувані й визначаються інструментально.

У частково екранованих приміщеннях за зовнішнього сигналу 1,2–1,5 мкВт/см² на одному поверсі будівлі ці параметри суттєво відрізняються (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Рівні електромагнітних полів у частково екранованих приміщеннях*

№	1	2	3	4	5	6
W, мкВт/см ²	24,0	16,0	0,50	0,30	1,25	0,06

*Вимірювання здійснювалися у діапазоні 0,3-30 ГГц, зовнішній фон – 1,2 – 1,5 мкВт/см².

Враховуючи що ГДР складає 100 мкВт/см^2 , у приміщеннях не спостерігається значне перевищення нормативного значення. Водночас, за сигналу нижчого, ніж $0,2 \text{ мкВт/см}^2$ можливе різке зростання рівнів власних електромагнітних полів засобів мобільного зв'язку, що є їх вбудованою функцією [131] (Рис. 4.2).

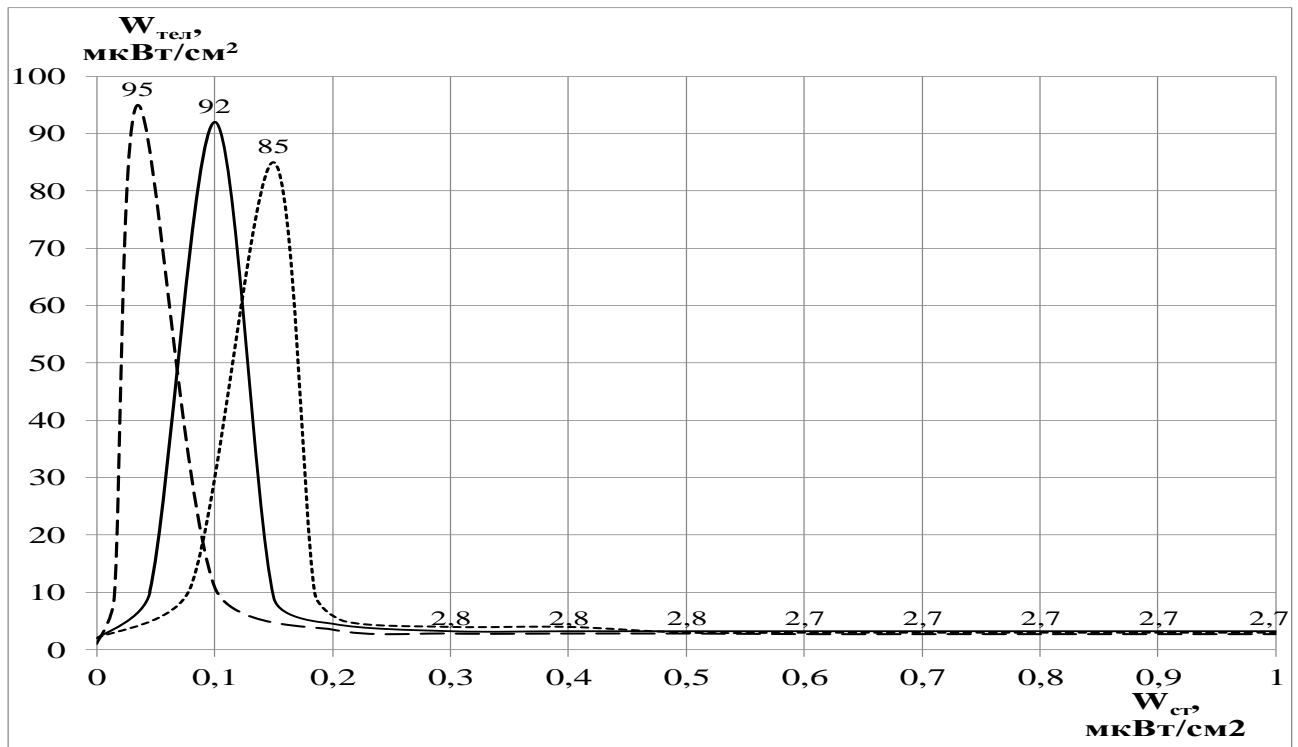


Рис. 4.2. Типові залежності інтенсивності випромінювань мобільних телефонів від рівня сигналу з боку базових станцій

Таким чином, виникає необхідність попереднього визначення причин перерозподілу інтенсивності високочастотних електромагнітних полів та визначення можливостей зниження їх рівнів (за перевищення ГДР) та підвищення за надмірної екранізації.

Якщо для електричних та магнітних полів наднизької частоти можливе часткове аналітичне визначення напруженості та їх критичності, то для високочастотних електромагнітних полів усередині приміщень визначення відповідних заходів лише експериментальними методами. Це дозволить визначити

принаймні попередні заходи і засоби нормалізації рівнів високочастотних електромагнітних полів.

Ефективним засобом зниження щільності потоків енергій, які сформувалися внаслідок відбиття електромагнітних полів, є застосування облицювальних матеріалів з малими коефіцієнтами відбиття. Перевагою таких матеріалів є можливість отримати облицювальну поверхню з потрібним співвідношенням поглинальних та відбивальних властивостей, що дозволить оптимізувати співвідношення електромагнітного фону у виробничих приміщеннях та забезпечити необхідний сигнал базових станцій мобільного зв'язку та інших бездротових систем.

В умовах нормалізації складної електромагнітної обстановки у окремих приміщеннях та у будівлі в цілому, впровадження усіх заходів, описаних вище є необхідними, але не достатніми.

Наступним заходом є визначення внеску електромагнітних полів внутрішніх (технологічного та допоміжного обладнання) та зовнішніх (лінії електропередач, електричний транспорт, станції зв'язку) джерел. Визначення їх інтенсивності надає можливість однозначно застосувати екранування окремих технічних засобів, приміщень або будівель. При цьому ступені екранування магнітних та електромагнітних полів повинні бути узгоджені, що дозволить не знизити рівень природного магнітного поля нижчого за нормативне для виробничих умов.

4.3. Порядок визначення техногенного електромагнітного навантаження на середовище та розроблення організаційно-технічних заходів з його нормалізації

Планування відповідних заходів нормалізації електромагнітної обстановки, зокрема за рахунок екранування електромагнітних полів здійснюється з урахуванням фактичних станів електромагнітної обстановки та факторів впливу на неї.

Узагальнюючими і першочерговими факторами є визначення:

- амплітудно-частотних характеристик випромінюваного поля (зовнішнього та внутрішнього);
- фізичних характеристик джерел на підприємстві;
- мінімізація загального техногенного впливу на працюючих або чутливий прилад.

Для найбільш точного визначення ефективності екранування надалі необхідне розроблення та впровадження організаційно-технічних заходів, в яких необхідно врахувати і впровадити наступне (рис. 4.3).

Електромагнітна обстановка на підприємстві в умовах складного впливу різноманітних джерел електромагнітних полів ускладнює коректність визначення екранування. Тому необхідно чітко розуміти, що техногенний вплив від джерел різних частотних діапазонів потребують різного захисту працюючих і врахувати вже запропоновані сучасні підходи до керування електромагнітною обстановкою у виробничих умовах.

Широкий частотний спектр електромагнітних полів та різні геометричні характеристики джерел від таких полів характеризується коливаннями амплітуд полів на різних частотах, що в свою чергу викликають зміну амплітуд у просторі і часі.

Така велика кількість та різноманітність зовнішніх впливів на працюючих не виключає, а найчастіше провокує багатократне відбиття та перевідбиття високочастотних електромагнітних випромінювань зовнішніх та внутрішніх джерел, тощо.

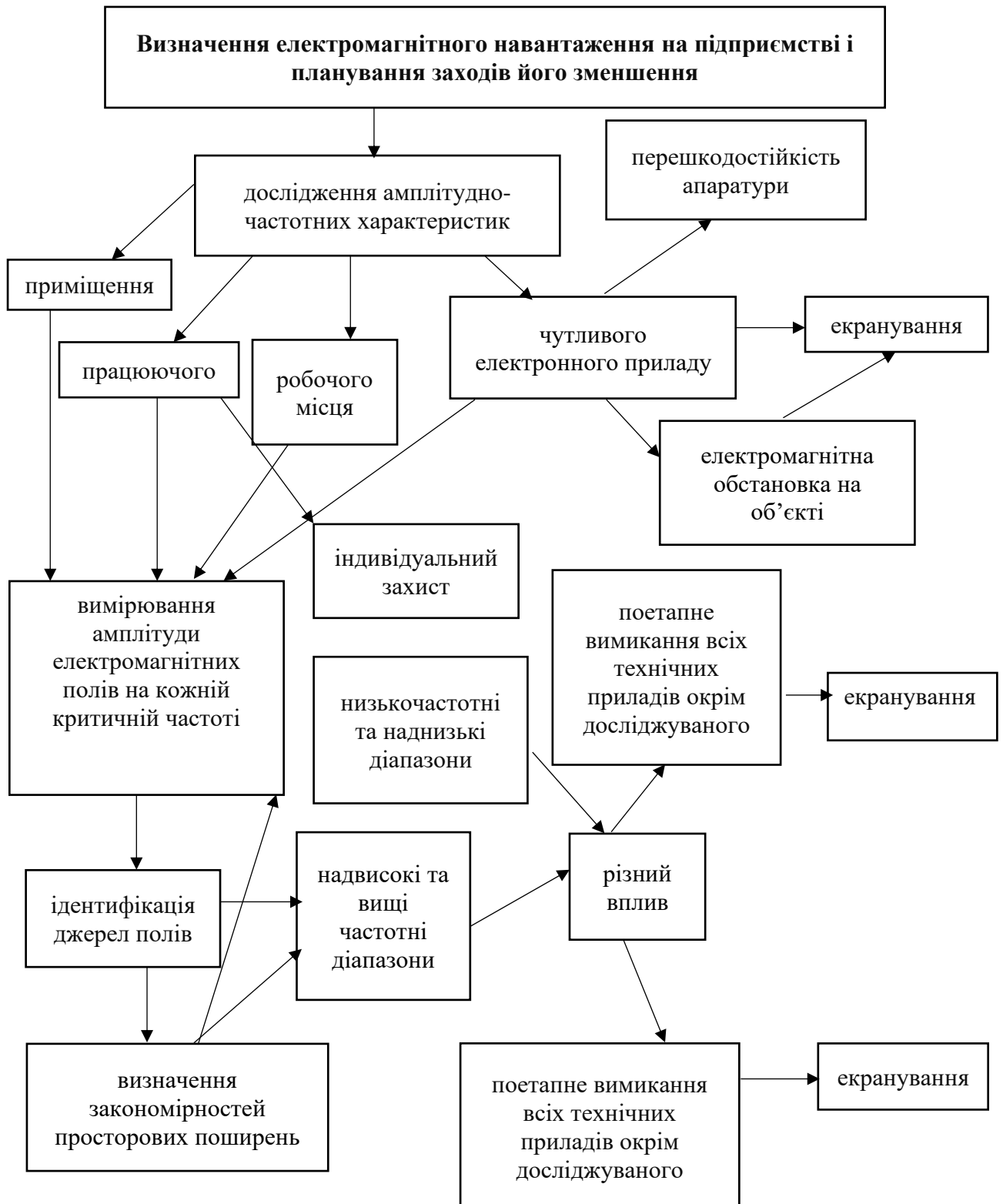


Рис. 4.3. Порядок моніторингу електромагнітної обстановки та планування і впровадження заходів з її нормалізації

Першим етапом необхідно класифікувати джерела, визначити максимальну критичність їх впливу на працюючих, приміщення або всієї будівлі в цілому - доцільно застосовувати методику визначення спектрального складу електричного та магнітного поля, використовуючи відомі спектри полів найбільш поширеного електричного та електронного обладнання.

Важливим є те, що електричні та магнітні поля від різних джерел мають різні закономірності розповсюдження в робочому просторі, тому, під час дослідження було враховано, що:

- електричне обладнання має вищі гармоніки магнітного поля;
- гармоніки магнітного поля промислової частоти регламентуються метрологічним контролем і мають амплітуди порівняні з основною гармонікою і не нормуються за амплітудними значеннями розповсюджень.

Другим етапом необхідно врахувати особливості поширень та спрямованостей полів у просторі та виміряти (або аналітично обрахувати) максимальні амплітудні значення електромагнітних полів на кожній критичній частоті. Взаємодія електромагнітних полів з організмом людини залежить від характеристик техногенного навантаження – окремих частотних діапазонів:

1. Низькочастотні (і наднизькі частоти в тому числі), надвисокі та вищі частоти (до 30 МГц):

- мають різний вплив на працюючих (враховуємо, що працюючі найчастіше знаходяться у ближній зоні поля);
- мають різні методики вимірювання кількісних характеристик (обов'язкове окреме вимірювання електричної та магнітної складових електромагнітного поля);
- мають різні методи захисту (екранування).

На теперішній час гармоніки магнітного поля промислової частоти не нормуються за амплітудами, але іноді мають амплітуди, порівняні з основною гармонікою. Щодо контролю електромагнітних полів комп'ютерної техніки - регламентація зазначена в національних та міжнародних стандартах експлуатації

засобів обчислювальної техніки (електрична та магнітна складові поля у двох фіксованих смугах частот складає 5 Гц – 2 кГц та 2 кГц – 400 кГц відповідно. Загальний негативний електромагнітний вплив на працюючих порівнюється із фактичними значеннями напруженостей поля з гранично допустимими рівнями.

Модуль вектора напруженості електричного поля окремого джерела E можна отримати із формули:

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2 + (E_z)^2},$$

Відповідно - модуль вектора напруженості магнітного поля H розраховується із співвідношення:

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2 + (E_z)^2},$$

Магнітна індукція B розраховується за формулою:

$$B = \mu_0 H,$$

де $\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнітна стала.

2. Частоти, нижчі за 300 МГц. Для такого діапазону вимірюються напруженості поля для кожного джерела випромінювання окремо (тобто відключать решту приладів). Технічно це зробити не складно, але така напружена робота потребує багато часу. В такому дослідженні не виключається зовнішній техногенний вплив (це зробити не можливо) і загальна напруженість поля у кожній точці вимірювання, які працюють у частотних діапазонах, що мають однакові граничнодопустимі рівні, розраховуються за формулами:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2},$$

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2},$$

при умові виконання співвідношення (4.2) і якщо генеровані поля відповідних частотних діапазонів мають різні відповідні гранично допустимі рівні:

$$\frac{E_1^2}{T_1^2} + \frac{E_2^2}{T_2^2} + \dots + \frac{E_n^2}{T_n^2} + \frac{H_1^2}{T_1^2} + \frac{H_2^2}{T_2^2} + \dots + \frac{H_n^2}{T_n^2} \leq 1, \quad (4.2)$$

де E – напруженість електричного поля;

H – магнітного поля;

T_1, T_2 – гранично допустимі рівні відповідних частотних діапазонів.

Практично, у реальних виробничих умовах застосувати наведену методику проблематично, вимагає багато часу, але для забезпечення найбільш ефективного екранування, згідно з практикою, такі дослідження стають все більш затребувані.

3. Для визначення та класифікації діапазону ультрависоких і вищих частот необхідно врахувати, що частина джерел випромінювання може розглядатися, як точкові і мають певну спрямованість (це стосується точки доступу бездротового зв'язку), а друга частина джерел може бути сукупністю негативних техногенних хвиль загального ізотропного електромагнітного фону, отриманого шляхом розсіювання та багатократного відбиття самими будівлями та обладнаннями. При цьому необхідно враховувати, що деякі джерела мають однакові частоти випромінювання, або деякі з них мають малі смуги випромінювальних частот, які мають практично однакові значення (збігаються), але можуть мати різні гранично допустимі рівні (гранично допустимі рівні дуже високих та ультрависоких частот випромінювань засобів мобільного зв'язку

складає $10,0 \text{ мкВт/см}^2$, а інших радіотехнічних об'єктів цивільної авіації з такими ж робочими частотами складає $15,2 \text{ мкВт/см}^2$).

Найчастіше, діапазон приладів має інтегральну величину щільності потоку енергії у $300 \text{ МГц} - 300 \text{ ГГц}$, тому для більшої точності необхідний комплекс методів досліджень за вузькими смугами частот, або окремими частотами. Ускладнює процес вимірювання та визначення потоку енергії з боку схожих джерел той факт, що частота не фіксована, тобто має певний частотний діапазон (наприклад, для окремих базових станцій).

Для визначення загальної інтенсивності випромінювання для діапазону частот $300 \text{ МГц} - 300 \text{ ГГц}$ необхідно ідентифікувати кожне джерело випромінювання, визначити інтенсивність для кожного джерела окремо і результати скласти:

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n ,$$

У випадку, коли частоти джерел мають різні гранично допустимі рівні, повинні дотримуватись умови:

$$\frac{W_1}{T_1} + \frac{W_2}{T_2} + \dots + \frac{W_n}{T_n} \leq 1 .$$

де W – щільність потоків енергії досліджуваних полів;

T_n – гранично допустимі рівні частотних діапазонів відповідних випромінювань.

Важливою умовою коректності вимірювань є врахування рівня зовнішнього електромагнітного випромінювання контрольованої частоти або смуги частот. Напруженості електричних та магнітних полів промислової частоти рекомендовано вимірювати приладом ПЗ-50 – вимірювач напруженості поля промислової частоти (згідно з інструкцією по експлуатації та паспортних даних). Для отримання більш точних даних щодо ідентифікації джерел електромагнітного

поля пропонується отримати більш вузький спектр електричного та магнітного поля наднизьких та низьких частот, тому рекомендовано використання аналізатора Spectran NF 5035 спектра електромагнітного поля (згідно інструкції по експлуатації та паспортних даних).

Третім етапом – впровадження екранування.

Ефективність екранування залежить від:

- найбільш ефективного матеріалу екрана (оцінка екрануючих характеристик матеріалу);
- розташування за екраном точки вимірювання параметрів поля, його спрямованості;
- конфігурації екрана;
- типу екрана (сітка; лист):
- розмірів та товщини екрана;
- умов експлуатації екрана;
- розрахунку коефіцієнта екранування;
- практичного використання (та рекомендації).

Реалізація запропонованого алгоритму дозволяє врахувати усі найбільш критичні фактори впливу на електромагнітну обстановку будівель і споруд.

Слід враховувати, що у реальних виробничих умовах процес визначення необхідності і ступенів екранування електромагнітних полів може відрізнятися з урахуванням специфічних умов. Зокрема, у багатьох випадках, наприклад, на підприємствах енергетики, транспортній галузі потрібне одночасне екранування електромагнітних та акустичних полів. Для забезпечення технічного захисту інформації або екранування чутливого медичного діагностичного обладнання коефіцієнти екранування електромагнітного поля повинні бути вищими ніж це вимагається для більшості виробничих умов.

4.4. Пропозиції щодо вдосконалення національної нормативно-правової бази з електромагнітної безпеки

Як зазначалося у розділі 1, чинні санітарні норми та правила мають суттєві недоліки з точки зору екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону, що ускладнює практичну реалізацію екранування у реальних виробничих умовах.

Не дивлячись на те, що норматив [13] був оновлений у 2020 році, нова редакція стосується тільки підвищення ГДР електромагнітних полів, частот мобільного зв'язку. Щодо захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань у пункті 2.4.2 рекомендується застосування екрануючих пристроїв та інших засобів зниження напруженості електричного поля. При цьому зовсім не згадується необхідність екранування магнітного поля промислової частоти та електромагнітних полів дуже високих та вищих частот. Відсутні навіть орієнтовні рекомендації щодо здійснення такого екранування. У цьому ж нормативі існують значні розбіжності щодо гранично допустимих значень щільностей потоку енергій та напруженості полів різних джерел з однаковими частотними характеристиками.

У нормативі [14] щодо санітарних норм при роботі з джерелами електромагнітних полів рекомендується екранування полів екранами з алюмінію та алюмінієвих сплавів, міді і її сплавів, сталі та пермалою у вигляді листів або сіток зовсім не розглядаються аморфні металеві сплави з великими відносними магнітними проникностями, аналогічним показникам пермалою, але нечутливі до деформацій. Зовсім не згадуються композиційні захисні матеріали, які можуть мати керовані коефіцієнти відбиття та поглинання у залежності від конкретної електромагнітної обстановки. Навіть електромагнітні екрани у вигляді сіток потребують попередніх розрахунків параметрів, виходячи з амплітудно-частотних характеристик екранованого поля. У розрахунок входять як розміри комірки сітки, так і товщина дротів. Тому у відповідному нормативі потрібно надати номограми що спрощує обирання параметрів захисної конструкції. Це є важливим з огляду на

те, що у загальноєвропейській директиві [11] передбачено застосування екрануючих матеріалів і конструкцій, а вимоги Європейської директиви імплементовані у нормативну базу України у вигляді мінімальних вимог до рівнів електромагнітних полів [12]. Щодо кількісних характеристик електромагнітних полів то існують розбіжності, які ускладнюють обирання ефективності екранування. Головним з них є відмінності у визначені сумарного електромагнітного навантаження на середовище у чинних нормативах [13, 14]. У першому розглядається відношення фактичних напруженостей поля до гранично допустимої, у другому – квадрати цих величин, що дає різні значення. У цьому питанні потрібна однозначність що надасть змогу чітко визначити необхідність впровадження засобів захисту та їх необхідну ефективність. Потребує узгодження частина одиниць вимірювання електромагнітно навантаження на людей. Якщо у національних нормативах розглядається одиниця – добуток квадрата напруженості поля і часу впливу, то у міжнародному нормативі [15] обов'язковий додаток до директиви [11] фігурують показники SA – питома поглинена енергія електромагнітного поля та SAR – питома поглинена потужність електромагнітного поля. Крім необхідності узгодження як національних і міжнародних одиниць вимірювань, проблему має метрологічний аспект. Засоби вимірювань або визначення цих одиниць повинні бути офіційно визнані в Україні.

Ці зауваження також стосуються санітарних правил планування і забути [19] та ДБН Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення [22]. Сучасні державні будівельні норми з проектування висотних житлових і громадських будинків (ДБН В.2.2-24:2009) дозволяють монтаж вбудованих трансформаторів сухого типу у будівлях. Але екранування генерованих ними магнітних полів не передбачене. Замість цього пропонується розміщення на технічних поверхах, що не є раціональним.

4.5. Впровадження результатів досліджень та їх ефективності

Тестування розроблених рідинних матеріалів було проведено у сертифікованій лабораторії з вивчення та нормування фізичних факторів виробничого середовища Інституту медицини праці ім. Ю. І. Кундієва НАМН України. (додаток А)

1. Дата проведення дослідження: 5–6 червня 2023 р.
2. Місце проведення дослідження: Лабораторія по вивченню і нормуванню фізичних факторів виробничого середовища ДУ "ІМП ІМЕНІ Ю.І. КУНДІЄВА НАМН", м. Київ, вул. Саксаганського, 75, к. 204.
3. Умови дослідження: лабораторне приміщення, температура повітря – 24,2 °С; відносна вологість – 45 %; джерела вологи та теплового випромінювання – відсутні; зовнішні електромагнітні завади – відсутні; рівні ЕМП 50 Гц та 0,3–300 ГГц – нижче чутливості вимірювачів ПЗ-50 та ПЗ-31.
4. Тип джерела: мікрохвильова піч Samsung MS-23T5018 AN/UA, живлення від електромережі (робоча частота 2,45 ГГц; потужність: НВЧ – випромінювання магнетрону – 800 Вт; гриль – 1100 Вт).
5. Вимірювальне обладнання (тип, марка, зав. №): вимірювач рівнів електромагнітних випромінювань ПЗ-50, зав № 1131; вимірювач рівнів електромагнітних випромінювань ПЗ-31, зав. № 049.
6. Свідоцтво про повірку/калібрування: Свідоцтво про калібрування № UA/26/201215/001576RA від 31.05.2021 р; свідоцтво про калібрування № UA/26/201215/001569RA від 09.06.2021 р.
7. Нормативна документація, відповідно до якої проведені дослідження: Методика проведення вимірювань електромагнітного поля неіонізуючої частини спектру М.7.2/01:22, інструкції виробника щодо користування вимірювального обладнання.

Результати досліджень: Випробування здійснювалися на частотах 50 Гц (магнітна та електрична складові) та 2,45 ГГц (щільність потоку енергії

електромагнітного поля). Для випробувань представлені зразки на основі трьох типів рідкого носія (матриці), (№№ 1,2,3). Носій №1 – водно-дисперсійна фарба; Носій №2 – геополімерна фарба; Носій №3 – геополімерна фарба з додаванням пігменту GreyX.

В усі носії додавався екрануючий наповнювач у кількостях 30–60 мас %.

Результати випробувань наведено у таблицях 1–3. У таблицях наведені середні значення коефіцієнтів, обчислені за серією 10 вимірювань з урахуванням максимальної основної похибки вимірювальних приладів.

Таблиця 1

Коефіцієнти екранування електричної складової електромагнітного поля
промислової частоти

Зразок матеріалу	Коефіцієнти екранування при наповненні екрануючим наповнювачем, %		
	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,5	1,7	3,0
№ 2	1,6	2,8	5,1
№ 3	2,0	4,5	8,8

Таблиця 2

Коефіцієнти екранування магнітної складової електромагнітного поля
промислової частоти

Зразок матеріалу	Коефіцієнти екранування при наповненні екрануючим наповнювачем, %		
	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,5	2,5	3,7
№ 2	1,8	3,8	7,7
№ 3	1,6	2,9	5,8

Таблиця 3

Коефіцієнти екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц

Зразок матеріалу	Коефіцієнти екранування при наповненні екрануючим наповнювачем, %		
	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,5	2,0	4,0
№ 2	1,7	3,1	5,6
№ 3	2,5	4,2	8,0

За результатами досліджень коефіцієнтів екранування при наповненні екрануючим наповнювачем трьох типів рідкого носія (матриці): водно-дисперсійна фарба; геополімерна фарба та геополімерна фарба з додаванням пігменту GreyX вказують на ефективність екранування електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц та частоти 2,45 ГГц від їх джерела.

Встановлено, що ефективність екранування електромагнітного поля залежить від типу матриці (носія екрануючої субстанції) та частоти випромінювання і зростає при збільшенні вмісту екрануючого наповнювача в зразку матеріалу з 30% до 60 %.

Отримані результати можуть бути використані для розробки інженерно-технічних заходів щодо захисту організму людини від впливу електромагнітних полів на робочих місця відповідно до Наказу МОЗ від 13.01.2023 «Про затвердження Мінімальних вимог до охорони здоров'я та безпеки працівників, які піддаються впливу електромагнітних полів» та Директиви ЄС Directive 2013/35/EU. Результати незалежного тестування збігаються з результатами наведеними у дисертаційному дослідженні у межах похибки вимірювань, що свідчить про їх достовірність.

Результати дослідження було впроваджено у навчальний процес у КНУБА при навчанні фізики студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» та підготовці аспірантів зі спеціальності 263 «Цивільна безпека» (Додаток Б)

Висновки до розділу 4

1. Проектування електромагнітних екранів, у комплексі заходів нормалізації фізичних факторів виробничого середовища, дозволяє раціоналізувати коефіцієнти екранування на стадіях проектування. Головним чином це стосується забезпечення електромагнітної безпеки людей, електромагнітної сумісності технічних засобів зі збереженням стабільної роботи усіх засобів бездротового зв'язку.

2. Розроблення та впровадження екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону доцільно здійснювати за певним алгоритмом. У загальному випадку він складається з трьох етапів. На першому етапі здійснюється електромагнітний моніторинг на підприємстві, у будівлі тощо. На другому етапі визначаються амплітудно-частотні характеристики електромагнітних полів, які потребують екранування, і визначаються потрібні ступені зниження полів різних частотних діапазонів. На третьому – здійснюються виготовлення і впровадження екрануючих конструкцій з урахуванням всіх критичних чинників.

3. Надано пропозиції щодо вдосконалення національної нормативно-правової бази з електромагнітної безпеки. Головними з них є: необхідність узгодження порядку розрахунку сумарного електромагнітного навантаження на виробниче середовище у різних чинних санітарних нормах і правилах; необхідність внесення до переліку екрануючих матеріалів, рекомендованих санітарними нормами і правилами, композиційних захисних матеріалів та надання загальних рекомендацій щодо застосування тих чи інших захисних матеріалів і конструкцій у залежності від амплітудно-частотних характеристик екранованого поля; необхідність узгодження застосування вимірювання електромагнітного навантаження з міжнародними нормативами у частині, де застосовується питома поглинена енергія (SA) та питома поглинена потужність (SAR).

4. Незалежне тестування розроблених рідких сумішей для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону свідчить про коректність

результатів, отриманих у процесі дисертаційного дослідження. Розбіжності у значеннях коефіцієнтів екранування перебувають у межах похибок вимірювань.

Основні положення розділу 4 опубліковані автором у наукових працях [4], [5], [10].

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науковою роботою з цивільної безпеки, у якій вирішено актуальне науково-прикладне завдання, яке полягає в обґрунтуванні, розробленні й дослідженні захисних властивостей рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

1. На основі аналізу наукових публікацій і прикладних розробок у галузі електромагнітної безпеки визначено невирішені питання щодо розроблення і впровадження матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Зокрема, встановлено необхідність отримання рідких екрануючих композицій на основі стандартних лакофарбових матеріалів і наповнювачів малої вартості з достатніми коефіцієнтами екранування електромагнітних полів у більшості виробничих умов.

2. Показано, що у якості матриць доцільно використовувати водно-дисперсійні, геополімерні фарби, а також рідкий латекс. У якості екрануючого наповнювача – дрібнодисперсний залізорудний концентрат та пігментний наповнювач GreyX, а також лускатий графіт. Коефіцієнти екранування композиції на основі водно-дисперсійної фарби з ваговим вмістом залізорудного концентрату 15–60% складають для електричної складової електромагнітного поля промислової частоти 1,1–2,9; магнітної складової – 1,2–3,8; електромагнітного поля ультрависокої частоти 2,45 ГГц – 1,2–4,1. Для геополімерної фарби коефіцієнти екранування складають відповідно 1,1–5,3; 1,4–7,8, 1,3–5,6. Для геополімерної фарби з вмістом GreyX, та залізорудного концентрату у пропорції 1:1 – 1,3–8,6; 1,2–5,7; 1,7–7,9. Коефіцієнти відбиття електромагнітних хвиль ультрависокої частоти з ваговим вмістом екрануючої субстанції 45–60 % склали для водно-дисперсійної фарби – 0,1–0,23; для геополімерної – 0,15–0,29; для геополімерної з вмістом GreyX – 0,22–0,34. Встановлено, що розбіжності у захисних властивостях обумовлені різними провідностями матеріалів на межі перколяційного ефекту.

3. Встановлено, що додавання у наповнювач лускатого графіту з ваговим вмістом 5 % підвищує коефіцієнти екранування електромагнітного поля ультрависокої частоти на 48–52 %, а коефіцієнти екранування електричного поля промислової частоти на 38–40 %. При цьому ефективність екранування магнітного поля промислової частоти практично не змінюється. Це обумовлено відсутністю магнітних властивостей у графіту.

4. Обґрунтовано доцільність застосування захисного матеріалу з градієнтом електрофізичних та магнітних властивостей. Це реалізовано за рахунок нанесення на поверхню кількох шарів рідкої композиції з різними властивостями. Двошарове покриття з ваговим вмістом залізорудного концентрату 45 % у зовнішньому шарі та 60 % у внутрішньому шарі має коефіцієнт екранування 6,2–6,3, а коефіцієнт відбиття – 0,10–0,15. Для тришарового покриття ці показники складають відповідно – 11–12 та 0,15–0,16. Різке підвищення ефективності тришарової структури обумовлене розсіюванням електромагнітних хвиль на межах шарів.

5. Вдосконалення співвідношень щодо обчислення діелектричної та магнітної проникностей екрануючих композицій у залежності від вмісту екрануючого наповнювача за рахунок застосування вагових співвідношень матеріалу матриці та наповнювача спрощує проектування композиційних матеріалів. Спрощення обумовлене неможливістю визначення об'ємного вмісту сипкого наповнювача. Такий підхід зменшує похибки у процесі проектування багатокomпонентних композицій.

6. Розроблення і впровадження екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону доцільно здійснювати за певним алгоритмом. У загальному випадку він складається з трьох етапів. На першому етапі здійснюється електромагнітний моніторинг на підприємстві, у окремій будівлі, приміщенні тощо. На другому – визначаються амплітудно-частотні характеристики електромагнітних полів, які потребують екранування і необхідні ступені зниження полів різних частотних діапазонів. На третьому – здійснюються виготовлення і впровадження екрануючих конструкцій з урахуванням всіх критичних чинників.

7. Обґрунтовано пропозиції щодо вдосконалення національної нормативно-правової бази з електромагнітної безпеки та її узгодження з міжнародними нормативами. Головними із них є – узгодження методики розрахунку сумарного електромагнітного навантаження на виробниче середовище, яка застосовується у різних чинних санітарних нормах і правилах України; доповнення чинних національних санітарних норм і правил з електромагнітної безпеки у частині екранування електромагнітних полів рекомендованими захисними композиційними матеріалами з регульованими коефіцієнтами екранування. Необхідно надати умови застосування захисних матеріалів і конструкцій у залежності від частотних характеристик полів, які потребують екранування. Необхідно імплементувати у санітарні норми і правила України одиниці оцінювання впливу електромагнітних полів, що фігурують у міжнародних нормативах: SA – питома поглинена енергія, та SAR – питома поглинена потужність.

8. Незалежне випробування розроблених захисних сумішей у сертифікованій лабораторії з вивчення та нормування фізичних факторів виробничого середовища Інституту медицини праці імені Ю. І. Кундієва НАМН України свідчить, що розбіжності коефіцієнтів екранування з отриманими результатами при виконанні дисертаційного дослідження перебувають у межах похибки вимірювань.

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 (дата звернення: 29.07.2020).
2. Electromagnetic fields and public health: mobile phones. World Health Organization. 8 October 2014. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electromagnetic-fields-and-public-health-mobile-phones> (дата звернення: 16.05.2023).
3. Vergallo C., Dini L. Comparative Analysis of Biological Effects Induced on Different Cell Types by Magnetic Fields with Magnetic Flux Densities in the Range of 1–60 mT and Frequencies up to 50 Hz. *Sustainability*, 2018, 10, 2776. <https://doi.org/10.3390/su10082776>
4. Duhaini I. The effects of electromagnetic fields on human health. *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*. 2016. Vol. 32. P. 213. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2016.07.720>.
5. Щербань Р. Р., Куцак А. С., Бартківська В. В., Тихенко О. М. Аналіз впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я людини. *Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України*: матеріали IV Всеукр. заочної наук.-практ. конф., м. Київ, 20 квіт. 2018 р., Київ, 2018. С. 150–151.
6. Томашевська Л. А., Думанський В. Ю., Зотов С. В. та ін. Результати досліджень впливу магнітного поля (МП) промислової частоти (50 Гц) на поведінкові, гематологічні та імунологічні показники. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип. 64. С. 161–171.
7. Литвин В. А. Негативний вплив електромагнітних полів на людину. *Охорона праці і пожежна безпека*. 2018, № 11. С. 64–67.

8. Березненко С. М., Дячок Т. М., Решетняк М. В. Аналіз впливу неіонізуючого випромінювання на системи органів людини. *Вісник ХНТУ №4(63)*, 2017 р. С. 27–32.

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

10. Назаренко В.І. Комбінована дія магнітного поля промислової частоти, шуму, підвищеної температури повітря як проблема медицини праці: дис. ... д-ра біол. наук.: 14.02.01. Київ, 2011. 365 с.

11. 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: 16.05.2023).

12. 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>

13. 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).

14. 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).

15. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Physics*. 1998. № 74. p. 494–522.

16. Попов И. И., Тесленко О. А., Тесленко Н. И. Анализ состояния нормативной базы по обеспечению электромагнитной безопасности в Украине. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2015. № 2. С.124–131.

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

18. 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.

19. Про затвердження Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів [Чинний від 2019-03-07]: наказ М-ва охорони здоров'я України від 19.06.1996 № 173. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96> (дата звернення: 17.05.2023).

20. Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ходаковський О.В. Методологія зниження рівнів електромагнітних полів в умовах переходу на міжнародні стандарти електромагнітної сумісності. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Зб. наук. праць*. Дніпро: ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». 2018. Вип. 105. С. 174–179.

21. Правила улаштування електроустановок: затв. наказом М-ва енергетики та вугільної промисловості України від 21.07.2017 р. № 476. Київ, 2017. 617 с.

22. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення [Чинний від 2010-10-01]: затв. наказом М-ва регіонального розвитку та будівництва України від 15 лютого 2010 р. № 64. Київ, 2010. 129 с. (Державні будівельні норми України).

23. ДБН В.2.2-24:2009. Проектування висотних житлових і громадських будинків. [Чинний від 2009-09-01]: затв. наказом М-ва регіонального розвитку та будівництва України від 12.02.2009 р. № 67. Київ, Мінрегіонбуд України. 2009. 105 с. (Державні будівельні норми України).

24. 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.

25. 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 (дата звернення: 17.05.2023).

26. EN 61439-1:2011 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies. General rules. *European standards*. веб-сайт. URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-61439-1-2012-low-voltage-switchgear-and-controlgear-assemblies-part-1-general-rules> (дата звернення: 17.05.2023).

27. EN 61439-2:2012. Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 2: Power switchgear and controlgear assemblies. *European standards*. URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-61439-2-2012-low-voltage-switchgear-and-controlgear-assemblies-part-2-power-switchgear-and-controlgear-assemblies> (дата звернення: 17.05.2023).

28. 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> (дата звернення: 17.05.2023).

29. EN 61557-12:2010. Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 12: Performance measuring and monitoring devices (PMD).

European standards. URL: <https://www.en-standard.eu/une-en-61557-12-2010-electrical-safety-in-low-voltage-distribution-systems-up-to-1-000-v-a-c-and-1-500-v-d-c-equipment-for-testing-measuring-or-monitoring-of-protective-measures-part-12-performance-measuring-and-monitoring-devices-pmd> (дата звернення: 17.05.2023).

30. ETSI EN 300 220-2 V2.4.1 (2012-01). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 2: Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE. Directive. *European Telecommunications Standards Institute*. 2012. 20 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/02.04.01_40/en_30022002v020401o.pdf (дата звернення: 17.05.2023).

31. 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 (дата звернення: 17.05.2023).

32. 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> (дата звернення: 17.05.2023).

33. MPR II. The Swedish government standard for maximum video terminal radiation. URL: <https://www.computerlanguage.com/results.php?definition=TCO> (дата звернення: 18.05.2023).

34. TCO'03 Displays Flat Panel Displays Ver. 3.0. Available at: <http://poradme.se/images/d/d7/Tco03.pdf>

35. 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> (дата звернення: 18.05.2023).

36. Sukach S., Riznik D., Zacheпа 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> (дата звернення: 18.05.2023).

37. 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.

38. 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.

39. 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.

40. 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

41. Пелевин Д. Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 5. С. 14–16.

42. 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/ijocem.2019.1429>.

43. 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>.

44. Левченко Л. О. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. *Системи обробки інформації*. 2016. № 1. С. 29–37.

45. 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.

46. 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.

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

48. Левченко Л. О., Глива В. А., Карпенко С. Г. Просторові розподіли електромагнітних полів кабельних ліній електропередачі. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2016. Вип. 1/2016 (33). С. 55–67

49. 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

50. Паньків Х. В., Глива В. А. Методи визначення та зниження впливу електромагнітних полів енергетичних об'єктів на персонал. *Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація*. 2013. Вип. 758. С. 51–56.

51. 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

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. 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.

56. Пристрій контролю гармонічного складу електричного струму промислової частоти: пат. 97546 України: МПК G01R29/08, G01R31/08; заявл. 03.09.2014; опубл. 25.03.2015. Бюл. № 6.

57. 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

58. Dezelak K., Stumberger G., Jak F. Arrangements of Overhead Power Line Conductors. *Electric Power Systems Research*. 2011. Vol. 81. № 12. P. 2164–2170.

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

60. Здановський В. Г., Глива В. А., Левченко Л. О. Загальні підходи до моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2014. Вип. 27. С. 18–24.

61. Глива В. А., Левченко Л. О., Паньків Х. В. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання. *Управління розвитком складних систем*. 2014. Вип. 20. С. 174–179.
62. Левченко Л. О., Сукач С. В., Коновалова О. В. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин для визначення зон безпечного перебування персоналу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 6 (89), Ч. 1. С. 27–31.
63. Кирпанев А. В., Лавров В. Я. Электромагнитное поле: Теория идентификации ее применение: 3-е изд. М.: Вузовская книга, 2012. 278 с.
64. 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>.
65. Примин М. А., Недайвода И. В. Алгоритм анатомического решения обратной задачи магнитостатики для источника поля дипольного типа. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2015. № 14. С. 5–15.
66. Полевиков В. К., Ерофеев В. Т. Численное моделирование взаимодействия магнитного поля с цилиндрическим слоем магнитной жидкости. *Информатика*. 2017. № 2(54). С. 5–14. URL: <https://inf.grid.by/jour/article/view/207/209>
67. 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>
68. 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>.

69. Гетьман А.В. Аналіз та синтез структури магнітного поля технічних об'єктів на основі просторових гармонік: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.05. Харків, 2019. – 40 с.

70. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Пелєвін 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.

71. Pryor R.W. Mutiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. *Jones and Bartlett Publishers*. 2011. 872 p.

72. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2011. 255 с.

73. Мордачев В. И. Элетромагитная нагрузка на терриорию, создаваемая электромагнитными излучениями базовых станций сотовой связи. *Доклады БГУИР*. 2012. № 6. С. 114–121

74. Мордачев В. И., Юрцев О. А., Литвинко П. А. Влияние декоративных металлических покрытий зданий на электромагнитную обстановку и электромагнитную совместимость радиосистем. *Вестник белорусского государственного технического университета*. 2009. № 6. С. 42– 47.

75. Мордачев В. И., Свистунов А. С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM. *Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2013. № 7. С. 44–50.

76. 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. DOI:10.3892/ol.2019.10899

77. 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.

78. 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.

79. 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>.

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

81. Рентюк В. Электромагнитная совместимость: проблема, от которой не уйти. *Компоненты и технологии*. 2017. № 7. С. 27–31.

82. Glyva V., Tykhenko O., Tymoshenko O. Monitoring of electromagnetic environment at the civil aviation aerodromes. Proceedings the Eighth World 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.

83. 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.

84. A. Bamba., Joseph W., Andersen J. B., Tanghe E., Vermeeren G., Plets D., Nielsen J. O., Martens L. Experimental Assessment of Specific Absorption Rate Using Room Electromagnetics. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2012. Vol. 54, Iss. 4. P. 747–757. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2012.2189572>

85. A. Bamba, E. Tanghe, W. Joseph, G. Vermeeren, D. Plets, L. Martens, Theory for exposure prediction in an indoor environment due to UWB systems. *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Chicago, IL, 2012, PP. 1–2, <https://doi.org/10.1109/APS.2012.6348684>.

86. 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.

87. 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.

88. Екрануючий комплект: пат. 90892 Україна: МПК G12B 17/00. № 201400841; заявл. 30.01.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11. 4 с.

89. Пристрій контролю захисних властивостей електромагнітних екранів: пат. 58604 Україна, МПК G01L9/00. № 201103018; заяв. 15.03.2011; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7. 2 с.

90. Спосіб визначення захисних властивостей електромагнітного екрану: пат. 14984 Україна: МПК E21D 11/38, G12B 17/00. заяв. 27.12.2012; опубл. 10.06.2013, Бюл. №11.

91. Mei Li, ShaoQiu Xiao, Yan-Ying Bai, Bing-Zhong Wang. An Ultrathin and Broadband Radar Absorber Using Resistive FSS. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2012. № 11. P. 748–751.

92. 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.

93. 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>.

94. Рябов Ю.Г., Гуров И.Б. Экранирование встроенных трансформаторных подстанций. *Технологии ЭМС*. 2014. № 3. С. 21–28.

95. Демский Д.В. Метод расчета эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14. Москва, 2014. 114 с.

96. Електромагнітний екран з вибіркоvim 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.

97. 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.

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

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

100. 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

101. 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.

102. Glyva V., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Radomska M. The composite facing material for electromagnetic fields shielding. *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 907. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012043/meta>

103. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 6/5 (96). P. 54–61.

104. Fionov A.S., Yurkov G.Y., Popkov O.V., Kosobudskii I.D., Taratanov N.A., Potemkina O.V. Polymer nanocomposites: synthesis and physical properties. *Advances*

in *Composite Materials or Medicine and Nanotechnology. Rijeka, Croatia: IN-TECH Education and Publishing*. 2011. P. 343–364.

105. Jalali M., Dauterstedt S., Michaud A., Wuthrich R. Electromagnetic shielding of polymer-matrix composites with metallic nanoparticles. *Composites Part B: Engineering*. 2011. P. 1420–1426.

106. Alina Ruxandra Caramitu, Ioana Ion, Adriana Mariana Bors, Violeta Tsakiris, Jana Pintea, Ana-Maria Daniela Caramitu. Preparation and Spectroscopic Characterization of Some Hybrid Composites with Electromagnetic Shielding Properties Exposed to Different Degradation Factors. *MATERIALE PLASTICE*. 2023. 59. 82-94 <https://doi.org/10.37358/MP.22.4.5627>

107. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P.14–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>

108. Bhingardive V., Sharma M., Suwas S., Madras G., Bose S. Polyvinylidene fluoride based lightweight and corrosion resistant electromagnetic shielding material. *RSC Advances*. 2015. № 5. P. 35909–35916.

109. 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>.

110. 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.

111. Лыньков Л.М., Богуш В.А., Борботько Т.В., Насонова Н.В., Белоусова Е.С., Бойправ О.В. Новые технологии создания экранов электромагнитного излучения на основе модифицированных порошковых, наноструктурированных и пленочных материалов. *Доклады БГУИР*. 2019. № 2 (120). С. 85–99.

112. 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.

113. Glyva V., Tykhenko O., Nikolaev K. Screening as a major method of population protection from electromagnetic radiation. *International Symposium on Sustainable Aviation: Abstract Book of International Symposium on Sustainable Aviation, Rome, Italy, 9-11 July 2018. Rome, 2018. P. 69.*

114. 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. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.

115. Касаткіна Н.В., Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ченчевой В.В. Оптимізація параметрів екранування електромагнітних полів різнорідних джерел у виробничих будівлях. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2020. Вип. № 1(46). С. 181–188.

116. 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.

117. 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.

118. 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.

119. Mohammed H. Al-Saleh. Influence of conductive network structure on the EMI shielding and electrical percolation of carbon nanotube/polymer nanocomposites *Synthetic Metals*, V 205, 2015, P. 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2015.03.032>

120. Yoon-Ji Yim, Soo-Jin Park. Electromagnetic interference shielding effectiveness of high-density polyethylene composites reinforced with multi-walled

carbon nanotubes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. V. 21, 2015, P. 155-157, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.04.001>

121. Li, Yang and Pei, Xueliang and Shen, Bin and Zhai, Wentao and Zhang, Lihua and Zheng, Wenge. Polyimide/graphene composite foam sheets with ultrahigh thermostability for electromagnetic interference shielding. *RSC Adv.*, V. 5, (31), 2015, P. 24342-24351, <https://doi.org/10.1039/C4RA16421K>

122. Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50. Паспорт. ТПО ЕвроСтандарт, г. Санкт-Петербург. 16 с.

123. Измеритель уровней электромагнитных излучений ПЗ-31. Руководство по эксплуатации. ОАО «СКБ РИАП». Нижний Новгород. 2012. 20 с.

124. Измеритель электростатических зарядов переносной ИЭЗ-П. Паспорт. ЗМЧ.844.002 ПС. – 26 с.

125. Glyva, V., Podkopaev, S., Levchenko, L., Karaieva, N., Nikolaiev, K., Tykhenko, O. et. al. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (91)), 10–17. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.12362>

126. Грецьких С. В. Ослаблення статичного геомагнітного поля феромагнітними елементами будинків: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.05. Харків, 2016. 21 с.

127. Запорожець О. І., Клапченко В. І., Левченко Л. О., Панова О. В. Сучасні підходи до моделювання просторових змін геомагнітного поля у будівлях і спорудах. *Управління розвитком складних систем*. 2015. Вип. 21. С. 192–198.

128. Соколов В.Ю. Методи і засоби підвищення інформаційної та функціональної безпеки безпроводових мереж передавання даних: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Київ, 2019. 21 с.

129. 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/>

130. Контроль рівнів гіпогеомагнітного поля у виробничому середовищі та профілактика його несприятливої дії. Упоряд.: Назаренко В.І., Никифорок О.І., Пелєвін Д.Є., Глива В.А., Тихенко О.М. Київ, 2021, 7 с.

131. Тихенко О.М. Методи захисту працюючих від впливу електромагнітних випромінювань ультрависоких та вищих частот. Проблеми охорони праці в Україні. 2016. Вип. 32. С. 43–48.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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

1. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(6-111), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>.

2. Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Nazarenko V., Burdeina N., Panova O., Bahrii M., Nikolaiev K., Biruk Y. Determining the dynamics of electromagnetic fields, air ionization, low-frequency sound and their normalization in premises for computer equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 3(10-117), pp. 47–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258939>.

Статті у наукових фахових виданнях України

3. 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», *Збірник наукових праць*. Полтава. 2020. Т. 3(61), С. 115-119. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.3.115>.

4. Панова О.В., Бурдейна Н.Б., Ніколаєв К.Д., Бірук Я.І. Планування та впровадження заходів з електромагнітної безпеки у промислових будівлях та спорудах. *Науково-технічний журнал «Вісті донецького гірничого інституту»*. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Покровськ. 2020. №2 (47). С. 155-161. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-155-161>.

5. Глива В.А., Кашперський В.Є., Панова О.В., Бірук Я.І., Зозуля С.В.

Методологічний підхід до оцінювання ризиків впливу фізичних факторів техногенного походження в умовах невизначеності. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. Полтава. 2021. Т. 1(63), С. 123-125. <https://doi.org/https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.1.123>

6. Панова О.В., Бірук Я.І. Засади розроблення рідких сумішей для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону, «*Вісті донецького гірничого інституту*». ДВНЗ «*Донецький національний технічний університет*», Покровськ. 2022. № 1(50). С. 108-113, <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2022-1-108-113>

7. Biruk Y. Designing finishing materials with a gradient of electrophysical properties. *Екологічна безпека та природокористування*, 43(3), 2022 73–80. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.73-80>

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

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

Статті у інших виданнях України

10. Панова О.В., Бірук Я.І. Методологія визначення електромагнітного техногенного навантаження та шляхи їх удосконалення. *Містобудування та територіальне планування*, 2021, Вип. 76. – С. 205 – 217, DOI: 10.32347/2076-815x.2021.76.205-217

11. Панова О.В., Бірук Я. І., Бесараб О.М., Корміліцин Я.І. Дослідження новітніх покриттів з екрануючими властивостями власного виробництва.

Містобудування та територіальне планування, 2021, Вип. 77. С. 369 – 378,
<https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.77.369-377>

12. Левченко Л.О., Осадчий Б.М., Панова О.В., Бірук Я.І. 2021. Електромагнітний екран градієнтного типу. *Науково-технічний інформаційно-аналітичний журнал «Новини енергетики»*. №4, 2021, С. 3-9.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

13. Панова О. В., Бірук Я. І. Залежність захисних властивостей композиційних електромагнітних матеріалів від морфології феромагнітного наповнювача. *Екологія. Ресурси. Енергія: тези доп. міжнар. наук.-прак. конференції*, м. Київ, 25-26 листопада 2020 р. Київ, 2020. С. 16–17.

14. Панова О. В., Бірук Я. І. Техногенні електромагнітні поля та випромінювання як фактор негативної дії на працюючих. *Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України: тези доп. I Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції*, м. Київ, 15 березня 2021 р. Київ, 2021. с. 25–26.

15. Бірук Я. І. Електромагнітний екран з градієнтом електрофізичних властивостей. *Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України: тези доп. III Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції*, м. Київ, 13 жовтня 2021 р.. Київ, 2021. С.– 441.

16. Бірук Я.І. Застосування рідинних електромагнітних екранів для захисту працюючих. *56-та науково-практична конференція молодих вчених «Актуальні питання гігієни праці та професійної патології»*, 23 листопада 2021 р., Київ, 2021 р. с. 14-15

17. Матвєєва І. В., Бірук Я. І., Азнаурян І. О. Рідкі захисні композиції для екранування електромагнітних випромінювань радіотехнічних об'єктів аеродромів цивільної авіації. *Авіація у XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології: матеріали X Всесвітнього конгресу*, м. Київ, 28-30 вересня 2022 р. Київ, 2022, с. 4.1.19–4.1.21.

18. Бурдейна Н. Б., Бірук Я. І. Методичні засади автоматизації проектування рідких композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів. *Проблеми інформатизації: тези доп. X міжнар. наук-техн. конф.*, м. Черкаси 24- 25 листопада 2022 р.. Черкаси, 2022. с. 102.

19. Бурдейна Н. Б., Бірук Я. І. Використання рідких композиційних матеріалів для екранування електромагнітних полів промислової частоти, дуже високих та ультрависоких частот. *Екологія. Ресурси. Енергія: тези доп. міжнар. наук.-прак. конференції*, м. Київ, 23-25 листопада 2022 р. Київ, 2022. с. 82–83.

20. Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І. Екранування електромагнітних полів екологічно чистими багатошаровими рідкими композиційними матеріалами градієнтного типу. II Міжнародна науково-практична конференція «*Green Construction*» 13-14 квітня 2023 р. КНУБА, Київ 2023, с. 411-414.

Авторські свідоцтва, дипломи, патенти.

21. Спосіб виготовлення електромагнітного екрана з градієнтом електрофізичних властивостей: пат. 149126, Україна: МПК 2021.01. G12B 17/00, G12B 17/02. № 202102561; заявл. 17.05.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. № 42. 4 с.

22. Спосіб виготовлення градієнтного композиційного електромагнітного екрана: пат. 153982, Україна: МПК 2023.01, G12B 17/00 G12B 17/02, № 2023 00789, заявл. 28.02.2023, опубл. 27.09.2023, Бюл.№ 39, 4 с.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Т.в.о. директора ДУ «Інститут медицини
праці імені Ю. І. Кундієва НАМН України»,
д.мед.н. проф.



Костянтин ЩЕЙКІН

ПРОТОКОЛ №_1_ від 12 вересня 2023 р.

Випробувань захисних властивостей матеріалів для екранування
електромагнітних полів широкого частотного діапазону

1. **Дата проведення дослідження:** 5-6 червня 2023 р.
2. **Місце проведення дослідження:** Лабораторія по вивченню і нормуванню фізичних факторів виробничого середовища ДУ "ІМП ІМЕНІ Ю.І. КУНДІЄВА НАМН", м. Київ, вул. Саксаганського, 75, к. 204.
3. **Умови дослідження:** лабораторне приміщення, температура повітря – 24,2°C; відносна вологість - 45%; джерела вологи та теплового випромінювання – відсутні; зовнішні електромагнітні завади – відсутні; рівні ЕМП 50 Гц та 0,3-300 ГГц – нижче чутливості вимірювачів ПЗ-50 та ПЗ-31.
4. **Тип джерела:** мікрохвильова піч Samsung MS-23T5018 AN/UA, живлення від електромережі (робоча частота 2,45 ГГц; потужність: НВЧ – випромінювання магнетрону - 800 Вт; гриль - 1100 Вт).
5. **Вимірювальне обладнання** (тип, марка, зав. №): вимірювач рівнів електромагнітних випромінювань ПЗ-50, зав № 1131; вимірювач рівнів електромагнітних випромінювань ПЗ-31, зав. № 049.
6. **Свідоцтво про повірку/калібрування:** Свідоцтво про калібрування № UA/26/201215/001576RA від 31.05.2021 р; свідоцтво про калібрування № UA/26/201215/001569RA від 09.06.2021 р.
7. **Нормативна документація, відповідно до якої проведені дослідження:** Методика проведення вимірювань електромагнітного поля неіонізуючої частини спектру М.7.2/01:22, інструкції виробника щодо користування вимірювального обладнання.

Дослідження проведені: зав. лаб. Назаренко В.І., н.с. Чередніченко І.М.

Результати досліджень:

Випробування здійснювалися на частотах 50 Гц (магнітна та електрична складові) та 2,45 ГГц (щільність потоку енергії електромагнітного поля). Для випробувань представлені зразки на основі трьох типів рідкого носія (матриці), (№№ 1,2,3).

Носій №1 – водно-дисперсійна фарба;

Носій №2 – геополімерна фарба;

Носій №3 – геополімерна фарба з додаванням пігменту GreyX.

В усі носії додавався екрануючий наповнювач у кількостях 30–60 мас %.

Коефіцієнтом екранування (K_E) вважається відношення напруженості поля (щільності потоку енергії) перед захисним екраном ($EMП_0$) до показника у захищеній зоні ($EMП_E$):

$$K_E = EMП_0 / EMП_E$$

Результати випробувань наведено у таблицях 1–3. У таблицях наведені середні значення коефіцієнтів, обчислені за серією 10 вимірювань з урахуванням максимальної основної похибки вимірювальних приладів.

Таблиця 1.

Коефіцієнти екранування електричної складової електромагнітного поля промислової частоти

Зразок матеріалу	Коефіцієнти екранування при наповненні екрануючим наповнювачем, %		
	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,5	1,7	3,0
№ 2	1,6	2,8	5,1
№ 3	2,0	4,5	8,8

Таблиця 2.

Коефіцієнти екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти

Зразок матеріалу	Коефіцієнти екранування при наповненні екрануючим наповнювачем, %		
	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,5	2,5	3,7
№ 2	1,8	3,8	7,7
№ 3	1,6	2,9	5,8

Таблиця 3.

Коефіцієнти екранування електромагнітного поля частотою 2,45 ГГц

Зразок матеріалу	Коефіцієнти екранування при наповненні екрануючим наповнювачем, %		
	30 %	45 %	60 %
№ 1	1,5	2,0	4,0
№ 2	1,7	3,1	5,6
№ 3	2,5	4,2	8,0

Висновки:

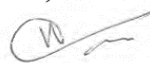
За результатами досліджень коефіцієнтів екранування при наповненні екрануючим наповнювачем трьох типів рідкого носія (матриці): водно-дисперсійна фарба; геополімерна фарба та геополімерна фарба з додаванням пігменту GreyX вказують на ефективність екранування ЕМП промислової частоти 50 Гц та частоти 2,45 ГГц від їх джерела.

Встановлено, що ефективність екранування ЕМП залежить від типу матриці (носія екрануючої субстанції) та частоти випромінювання і зростає при збільшенні вмісту екрануючого наповнювача в зразку матеріалу з 30% до 60 %.

Отримані результати можуть бути використані для розробки інженерно-технічних заходів щодо захисту організму людини від впливу електромагнітних полів на робочих місця відповідно до Наказу МОЗ від 13.01.2023 «Про затвердження Мінімальних вимог до охорони здоров'я та безпеки працівників, які піддаються впливу електромагнітних полів» та Директиви ЄС Directive 2013/35/EU.

Завідувач лабораторії
по вивченню нормуванню фізичних
факторів виробничого середовища
ДУ «Інститут медицини праці
імені Ю. І. Кундієва НАМН України»,
д.біол. н.

Науковий співробітник



Василь НАЗАРЕНКО



Інна ЧЕРЕДНІЧЕНКО



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Повітрофлотський пр. 31, м. Київ, 03037, тел. (044) 241-55-80, факс (044) 248-32-65
E-mail: knuba_admin@ukr.net ; Web: http://www.knuba.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070909

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
та інноваційного розвитку
Київського національного університету
будівництва і архітектури

Олександр КОВАЛЬЧУК



АКТ

про впровадження результатів наукового дослідження дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктор філософії Бірук Яни Ігорівни на тему: «Захист працюючих від впливу електромагнітних полів із застосуванням рідинних екрануючих матеріалів» за спеціальністю 263 «Цивільна безпека»

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Войтенко О.С., завідувач кафедри фізики д.т.н., проф. Глива В.А., завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці д.т.н., проф. Ткаченко Т.М., декан факультету Інженерних систем та екології д.т.н., проф. Приймак О.В., склали цей акт про те, що результати наукового дослідження «Захист працюючих від впливу електромагнітних полів із застосуванням рідинних екрануючих матеріалів» впроваджені в навчальний процес шляхом використання результатів при навчанні фізики студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» і підготовці аспірантів зі спеціальності 263 «Цивільна безпека».

Начальник навчального відділу

Олександр ВОЙТЕЙКО

Декан факультету
Інженерних систем та екології

Олександр ПРИЙМАК

Завідувач кафедри фізики

Валентин ГЛИВА

Завідувачка кафедри технологій захисту
навколишнього середовища та охорони праці

Тетяна ТКАЧЕНКО