

УДК 539.421:620.179.17

к.т.н., доцент Панова О.В.,

elenapanova169@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7975-1584,

Київський національний університет будівництва і архітектури,

к.т.н., доцент Ходаковський О.В.,

dzgeron@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3930-0030,

Національний авіаційний університет

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

Розроблені методи визначення внеску в коефіцієнти екранування електромагнітних екранів поглинання енергії полів і їх віддзеркалення. Розроблені композитні електромагнітні екрани з керованими захисними властивостями. Надані практичні рекомендації щодо вибору матеріалів для виготовлення електромагнітних екранів та їх використання.

Ключові слова: екранування, електромагнітне поле, захисні властивості, електромагнітні випромінювання

Предметом дослідження є проектування довгого циліндричного композитного екрана розрахунковим та експериментальним методами для удосконалення захисту від шкідливих електромагнітних полів та випромінювань шляхом вимірювання коефіцієнта екранування та визначення за допомогою математичного апарата найбільш ефективного значення магнітної проникності.

Мета роботи - розроблення найбільш прийнятних для практичного використання розрахункових методів ефективності електромагнітних екранів для скорочення строків та підвищення точності розрахунків; - дослідження захисних властивостей сучасних екранувальних матеріалів і обґрунтування методик керування ними. Обґрунтовано актуальність сучасних екрануючих матеріалів з керованими захисними властивостями з метою зниження їх вартості та підвищення технологічності. Використано композитні електромагнітні екрани з керованими захисними властивостями та малими коефіцієнтами відбиття з урахуванням фундаментальних співвідношень електродинаміки суцільних середовищ та виконано прикладне програмне забезпечення з цього питання. Надано найбільш ефективні методи зниження рівня електромагнітних полів екрануванням. Показано, що методики і умови використання екрануючих матеріалів в залежності від параметрів екранованого поля недостатньо. Обґрунтовано необхідність щодо створення рекомендацій із захисту людей та чутливого обладнання екрануванням з урахуванням

частотних діапазонів, розмірів чарунок та сіток тощо. Зазначено суттєві недоліки щодо механізму отримання сумарного коефіцієнту екранування. Сформульовано висновки щодо впровадження організаційно-технічних заходів зі зниження рівнів електромагнітних полів екрануванням та необхідність виготовлення найбільш ефективного захисного матеріалу, враховуючи наявність дійсної та уявної складових абсолютної магнітної проникності.

Вступ. Підвищення електромагнітного навантаження на довкілля, зміна якісного та кількісного складу джерел електромагнітних полів та випромінювань вимагає проведення досліджень й виконання прикладних розробок щодо зниження їх негативного впливу на людей та чутливе електронне обладнання.

Традиційні методи – захист відстанню та часом на сьогоднішній день практично вичерпані і можуть бути використані в обмежених обсягах користувачами персональних комп'ютерів за умови, що ці технічні засоби не є основним знаряддям виробничих процесів та на енергетичних об'єктах, де такі обмеження регламентовані відповідними санітарними нормами і правилами.

У сучасному світі поряд із стрімким розвитком технічного прогресу, спостерігається зростання потужностей різноманітних технічних приладів та електронних засобів усередині приміщень і будівель, а також збільшується кількість джерел зовнішніх електромагнітних навантажень з різними частотами випромінювання. Таке нестабільне становище вимагає пошуку нових підходів до захисту людей від електромагнітних полів та випромінювань широкого частотного діапазону та різних амплітуд.

Найбільш перспективним і сучасним методом зниження рівня електромагнітних полів є їх екранування. Втім методики і умови використання екрануючих матеріалів в залежності від параметрів екранованого поля досліджено недостатньо. Відсутні практичні рекомендації щодо розрахунків ефективності екранів і їх використання в залежності від фактичної електромагнітної обстановки на підприємстві.

Сучасний стан проблеми. На сьогоднішній день дослідженнями розрахунками ефективності та розробленням технологій виготовлення матеріалів для екранування електромагнітних полів та випромінювань займаються фахівці з матеріалознавства та електродинаміки суцільних середовищ.

Результатом такої роботи є складність математичного апарату з розрахунків ефективності електромагнітних екранів, які практично не мають прикладного значення [1] та необізнаність фахівців з гігієни та охорони праці у

фізичних явищах, які забезпечують зниження рівнів полів за рахунок використання цих засобів захисту.

Існує багато матеріалів для екранування електромагнітних полів та випромінювань. В основному це кристалічні металеві матеріали, перелік яких надано у санітарних нормах – алюміній та його сплави, мідь та її сплави, сталі, пермалої у вигляді листів або сітки [2]. При цьому відсутні рекомендації, навіть оновлені у 2017 році, щодо розмірів чарунок, сіток та частотних діапазонів, у яких той чи інший матеріал, є найбільш ефективним. Санітарні норми [3] взагалі обмежуються рекомендацією екранування поля та випромінювання у разі потреби. Це ускладнює підбір та практичне використання електромагнітних екранів і пояснює доцільність подальших досліджень.

В останні роки виконано низку наукових досліджень, які переконливо довели, що традиційні екрануючі матеріали, зокрема електротехнічні сталі та пермалої, мають складні амплітудно-частотні захисні властивості і не завжди ефективні у деяких діапазонах частот [4, 5]. Крім того, пермалої чутливі до механічних впливів, що також ускладнює їх використання і не дає можливості виготовляти екрани безпосередньо у необхідному місці.

Різноманітність спектрального складу та амплітуд полів на різних підприємствах потребує можливості виготовлення екранів з необхідними захисними властивостями. Частково ця проблема розв'язана у праці [6], проте діапазон керованості досить вузький. До того ж магнітом'які аморфні сплави мають досить велику вартість, тому створення великих захисних поверхонь є економічно недоцільним. У праці [7] надано результати розроблення металосилікатних захисних матеріалів і теоретично обґрунтовано керування їх екрануючими властивостями. За прийнятного частотного діапазону екранування вони мають погану технологічність і дуже незручні у монтажі, а також нестійкі до зовнішніх механічних та термічних впливів.

Таким чином, потреба у сучасних екрануючих матеріалах керованими захисними властивостями, які б мали низьку вартість і високу технологічність – актуальна проблема на будь-якому виробництві чи підприємстві і загальний стан питання нашої роботи.

Суттєвим недоліком раніше виконаних досліджень є відсутність прийнятих за припущеннями і простими у використанні математичних моделей, які б дозволяли прогнозувати ефективність екрана за визначених умов, вплив крайових ефектів у екранів кінцевих розмірів та визначити внесок кожного фізичного механізму (поглинання енергії поля, відбиття та багатократне відбиття електромагнітної хвилі від поверхні екрана) у сумарний коефіцієнт екранування.

Постановка проблеми: розроблення прийнятних для практичного використання методів розрахунків ефективності електромагнітних екранів та дослідження захисних властивостей сучасних екранувальних матеріалів і обґрунтування методик керування ними.

Виклад основного матеріалу. Кількісно ефективність екранування електричної та магнітної складової електромагнітного поля визначається співвідношенням їх напруженостей до і після екрана, яке зазвичай називають коефіцієнтом екранування. Цей коефіцієнт може бути безрозмірним, або визначається у децибелах. Останнє прийнятне з огляду на те, що сучасне програмне забезпечення з аналізу частотного спектра, наприклад Spectrogram, має на осях ординат децибельну шкалу.

Ефективність екранування залежить від частоти випромінюваного поля, характеристик джерела, розташування за екраном точки вимірювання параметрів поля, його спрямованості і конфігурації, матеріалу і товщини екрана. Отримати математичні співвідношення для розрахунків коефіцієнтів екранування з урахуванням наведених факторів та умов експлуатації екрана досить складно.

У загальному випадку коефіцієнт екранування для плоского провідного екрана визначається сумою окремих складових (1):

$$K=K_{\text{погл}}+K_{\text{відб}}+K_{\text{бв}}, \quad (1),$$

де $K_{\text{погл}}$ – ефективність екранування за рахунок поглинання екраном енергії електричного поля ($K_{\text{погл}}=8,7d\sqrt{\pi f\sigma\mu_m}$);

$K_{\text{відб}}$ – ефективність екранування за рахунок відбиття електромагнітної хвилі екраном ($K_{\text{відб}}=6,1d\sqrt{\omega\sigma\mu}$);

$K_{\text{бв}}$ – коефіцієнт екранування, який враховує багатократні внутрішні відбиття хвилі від поверхні екрана. Останнім коефіцієнтом знехтують у випадку, якщо втрати енергії в екрані (тобто її поглинання), перевищує значення у 10дБ.

Останнє суттєве для спеціальних екранувальних покриттів з клиноподібними або шипоподібними поверхневими структурами, аналогічними шумопоглинальним. Різниця між ними полягає у кутах при вершинах клинів [8]. Як правило $K_{\text{бв}} \ll K_{\text{погл}}$.

Важливою собливістю електромагнітних екранів з провідних матеріалів є значні електричні втрати потужності у тілі екрана. За низьких частот вихрових струмів потужність втрат енергії прямо пропорційна квадрату частоти, а для високих частот втрати не залежать від них. Втрати також залежать від активного опору матеріалу вихровим струмом (зниження опору сприяє

поліпшенню екрануючих властивостей). Значення коефіцієнта екранування нелінійно залежить від магнітної проникності матеріалу. При цьому:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_y \quad (2)$$

де μ_0 – дійсна частина, яка характеризує оборотні процеси намагнічування;

μ_y – уявна частина, яка характеризує процеси розсіювання енергії магнітного поля (втрати на вихрові струми, магнітну в'язкість тощо).

Електрична і магнітна складові електромагнітного поля мають складний характер розповсюдження у просторі і затухають у тілі екрана експоненціально:

$$E = E_0 \cdot e^{-\alpha d}, \quad H = H_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (3)$$

де $\alpha = \sqrt{\pi \mu \sigma}$ (м⁻¹) – коефіцієнт затухання;

μ – абсолютна магнітна проникність;

σ – питома провідність;

d – товщина екрана.

При обиранні товщини стінки екрана слід керуватися еквівалентною глибиною проникнення електромагнітного поля у глибину екрана: $\delta = 1/\pi f \mu \sigma$, яка є відстанню від поверхні екрана, на який амплітуда поля зменшується у e разів ($e=2,7=8,7$ дБ). Коефіцієнту поглинання 100 відповідає значення $4,6\delta$, а коефіцієнту поглинання 10 відповідає значення $2,3\delta$.

Екранування електромагнітного поля за рахунок відбиття хвиль обумовлюється різницею хвильового опору повітря Z_n та характеристичного опору матеріалу екрану Z_e . Коефіцієнт екранування за рахунок відбиття визначається за формулою (4):

$$K_B = 20 \cdot \lg \frac{Z_n}{Z_e} \quad (4)$$

де Z_n у ближній зоні відносно електричної та магнітної складових поля розраховується зі співвідношення (5):

$$Z_n = \sqrt{\frac{j \cdot \omega \cdot \mu}{\sigma + j \cdot \omega \cdot \epsilon}} \quad (5)$$

де j – комплексна одиниця;

- ω – циклічна частота;
- σ – питома проникність матеріалу екрана;
- μ – відносна магнітна проникність матеріалу;
- ε – діелектрична проникність матеріалу.

Наведені співвідношення (1-5) цілком придатні для практичного використання гігієністами та фахівцями з охорони праці.

Але металеві електромагнітні екрани (навіть виготовлені з сучасних аморфних магнітом'яких сплавів) мають суттєвий недолік – значні коефіцієнти відбиття. Для уникнення цього недоліку нами був розроблений композитний захисний матеріал.

Необхідність розроблення композитних матеріалів для екранування електричних полів та випромінювань обумовлена наступними міркуваннями.

Надійний захист від випромінювань ультрависокої, надвисокої та надзвичайно високої частот забезпечує металева сітчатка або ґратчаста структура з шириною проміжку між провідними елементами $0,1\lambda$, (де λ – довжина електромагнітної хвилі). Такий результат можна отримати як із співвідношень фізичної оптики, так і з повсякденної практики. При цьому відбивання електромагнітної хвилі від екрана практичне відсутнє. Однак, для більш низьких частот, дуже високих і нижче – такий захист є неефективним. В цьому випадку потрібно виготовляти суцільний провідний екран, який автоматично має великі коефіцієнти відбивання – до 0,9. Тому, в результаті захисту одного приміщення ми суттєво погіршуємо електромагнітну обстановку у напрямку відбитого випромінювання (тобто в місцях можливого перебування людей, або чутливого електронного обладнання).

Таким чином, доцільно розробити комбіновану структуру (метал-діелектрик), яка б при широкому спектрі екранування мала низькі коефіцієнти відбиття які б відповідали з нормативним значеннями.

Найбільш технологічною структурою з такими властивостями є металополімерна. Така структура складається з полімерної матриці (основного тіла екрана), та провідних домішок у вигляді металевих порошків [9].

Для виключення похибок експериментів отриманим доцільно використати вже відомі фундаментальні рівняння «електродинаміки суцільних середовищ» та об'єднати їх з практичними дослідженнями та отриманими вимірюваннями, враховуючі всі характеристики та специфічні дані конкретного реального середовища [10].

Відомо, що на межі метал-діелектрик коефіцієнт ослаблення K_e електромагнітної хвилі за потужністю, можна обрахувати за формулою (6). Цей коефіцієнт залежить від: n – коефіцієнта заломлення матеріалу (який

визначається із співвідношень дійсної та уявної частин діелектричної проникності матеріалу); x – товщини зразка; ω – циклічної частоти випромінювання та χ – коефіцієнта екстинкції матеріалу, який і визначає швидкість затухання хвилі. За умови нормально падаючої хвилі, можна обрахувати коефіцієнт відбивання $K_{відб}$ за формулою (7).

$$K_e = \frac{(n+1) + \chi^z}{4n} \cdot \exp\left(\frac{z \cdot \chi \cdot \omega \cdot x}{c}\right) \quad (6), \quad K_e = \frac{(n-1)^2 + \chi^z}{(n+1)^2 + \chi^z} \quad (7),$$

де відношення провідності діелектрика σ_d до провідності матеріалу (металу) σ_m пояснює величину z – імпеданс матеріалу (формула (8)):

$$z = \frac{\sigma_d}{\sigma_m} \quad (8).$$

Розрахунки коефіцієнтів екранування та відбиття для різних концентрацій металевго наповнювача досить трудомісткі, тому для їх виконання було розроблено прикладне програмне забезпечення, що дозволило скоротити строки і підвищити точність розрахунків.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що розходження між результатами експериментів і розрахунків становить 8-11%. Враховуючи похибки натурних випромінювань та ряд припущень при визначенні аналітичних функцій такі результати можна вважати прийнятними.

Для проектування композитного екрана неможливо обмежитися тільки розрахунковими методами. Це пояснюється тим, що для таких структур відсутні довідкові дані щодо ефективності проникності. Такі визначення можливі тільки на основі експериментальних вимірювань та отриманих даних коефіцієнта екранування.

Реалізація здійснювалась наступним чином. Виготовляється довгий композитний циліндричний екран, для якого вимірювався коефіцієнт екранування. Після того, на основі відомого співвідношення для циліндричної структури розраховувалася ефективна магнітна проникність:

$$K_e = \frac{\mu \cdot (b^2 - a^2)}{4 \cdot b^2} \quad (9),$$

де μ – відносна магнітна проникність матеріалу;
 a – внутрішній радіус циліндричного екрана;
 b – зовнішній радіуси циліндричного екрана.

Наприклад, на основі експериментальних даних [9] магнітну проникність можна отримати для будь яких концентрацій металевої субстанції (рис.1):

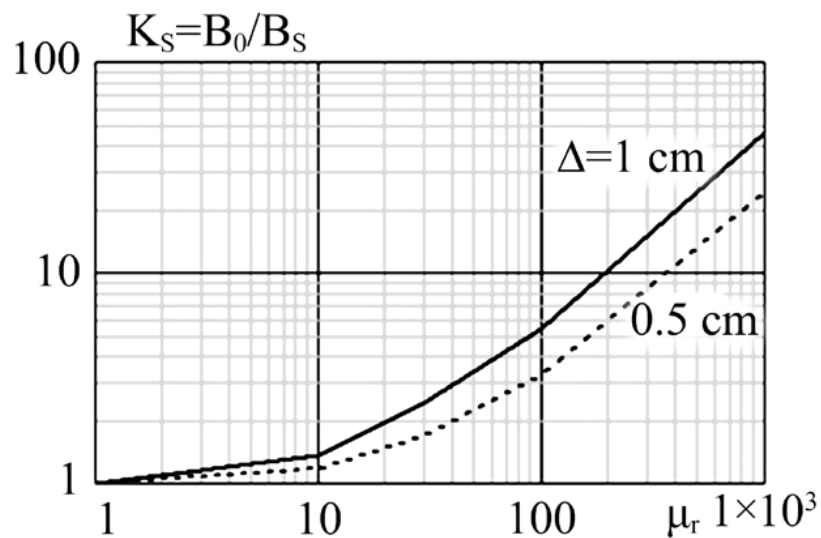


Рис.1. Залежність коефіцієнта екранування магнітного поля від магнітної проникності екрану при різній товщині матеріалу

Апроксимацію щодо визначення ефективності магнітної проникності у залежності від концентрації металевої субстанції та товщини екрана наведено у роботі [9].

Отриманих даних цілком достатньо для проектування композитних екранів потрібних ефективностей.

Висновки.

1. Впровадженню організаційно-технічних заходів зі зниження рівнів електромагнітних полів екрануванням повинне передувати визначення припустимого внеску у коефіцієнти екранування поглинання та відбиття електромагнітного поля екраном.

2. Необхідна товщина електромагнітного екрана визначається розрахунковими методами згідно отриманих у роботі співвідношень.

3. При виборі матеріалу для виготовлення електромагнітного екрана слід враховувати наявність як дійсної так і уявної складових абсолютної магнітної проникності, що дозволяє обрати найбільш ефективний захисний метал відповідно до частотних характеристик екранованих полів.

4. Доцільно використовувати композитні електромагнітні екрани, які крім керованих захисних властивостей мають малі коефіцієнти відбиття, що дозволяє уникати підвищення рівнів електромагнітних полів у небажаних напрямках.

Проблема формування електромагнітної обстановки у сучасному світі, яка забезпечує нормальне функціонування електронних пристроїв та екологічну безпеку працюючих на виробництвах та підприємствах різноманітних галузей, вимагає постійних досліджень та коригування.

Література

1. Резинкина М.М. Использование численных расчётов для выбора средств экранирования от действия магнитных полей / М.М. Резинкина // Журнал технической физики, 2007. – Т.77. – № 11. – С. 17 – 24.
2. ДСанПін 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів – [Чинний від 2003-01-04]. К.: МОЗ України, 2003. – 6 с.
3. ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань – [Чинний від 1996-01-08]. К.: МОЗ України, 1996. – 28 с.
4. Глыва В.А. Оценка защитных свойств различных материалов для экранирования электромагнитных полей. / В.А. Глыва, В.И. Клапченко, Г.Е. Краснянский, Е.В. Панова // «ABIA-2011»: X міжнародна науково-технічна конференція, 19-21 квітня, 2011, т. IV, – С. 27.39–27.40.
5. Панова О.В. Екранування електромагнітних полів та забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання / О.В. Панова // Управління розвитком складних систем. – 2015. – Вип. 22. – С. 207 – 213.
6. Левченко О.Г. Экранирующие материалы и средства индивидуальной защиты сварщика от магнитных полей / О.Г. Левченко, В.К. Левчук, О.Н. Тимошенко // Автомат сварка, 2011. – № 3. – С.49– 55.
7. Защитные свойства электромагнитных экранов на основе металлосиликатных материалов в диапазоне СВЧ / [Клапченко В.І., Краснянский Г.Е., Глыва В.А., Азнаурян И.А.] – К.: Гігієна населених місць, 2010. – Вип. 56. – С. 219-226.
8. Перельот Т.М. Оцінювання та зниження електромагнітного та шумового навантаження на виробниче середовище / Т.М. Перельот // Управління розвитком складних систем. – 2015. – Вип. 24. – С. 183 – 187.
9. Valentyn Glyva, Jaroslav Lyashok, Iryna Matvieieva, Valerii Frolov, Larysa Levchenko, Oksana Tykhenko, Olena Panova, Oleksiy Khodakovskyy, Batyr Khalmuradov, Kyrylo Nikolaiev / «Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen» (розроблення та дослідження захисних властивостей електромагнітного та шумозахисного екрана) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (Восточно-Европейский журнал передовых технологий) // Vol. 6, № 5 (96), p. 54-61.

10. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Панова Олена Василівна – К., 2014. – 151 с.

к.т.н., доцент Панова Е.В.,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры,
к.т.н., доцент Ходаковский А.В.,
Национальный авиационный университет, г. Киев

МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ И ПУТИ ИХ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Разработаны методы определения вклада в коэффициенты экранирования электромагнитных экранов поглощения энергии полей и их отражения. Разработаны композитные электромагнитные экраны с управляемыми защитными свойствами. Даны практические рекомендации по выбору материалов для изготовления электромагнитных экранов и их использованию.

Ключевые слова: экранирование, электромагнитное поле, защитные свойства, электромагнитные излучения

PhD, Associate Professor Panova Olena,
Kyiv National University of Construction and Architecture,
PhD, Associate Professor Khodakovskyy Oleksiy,
National Aviation University

CALCULATION METHODS OF DETERMINATION OF PROTECTIVE PROPERTIES OF ELECTROMAGNETIC SCREENS

The methods of determination of contribution are developed to the coefficients of screening of electromagnetic screens of absorption of energy of the fields and their reflection. Composite electromagnetic screens are developed with the guided protective properties. Practical recommendations for the selection of materials for electromagnetic shields and their use.

Key words: shielding, electromagnetic field, protective properties, electromagnetic radiation