

ЗАСОБИ НОРМАЛІЗАЦІЇ РІВНІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЧАСТОТИ ЛОКАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ

Анотація. Досліджено захисні властивості магнітом'яких металевих сплавів для екранування магнітних полів наднизьких частот. Встановлено залежності коефіцієнтів екранування магнітних полів промислової частоти найбільш поширеними електротехнічними сталями від індукції екранованого магнітного поля. Визначено, що ця залежність немонотонна. Наявність максимального коефіцієнта екранування обумовлена досягненням індукції насичення матеріалу. Значення коефіцієнтів екранування залежить від питомих втрат у сталі, які є довідковими величинами. Показано, що для виготовлення екрануючих конструкцій доцільно використовувати низькосортні електротехнічні сталі, найменш прийнятні для основного застосування – виготовлення осердь та магнітопроводів. Запропоновано двошарову конструкцію для екранування магнітних полів високих напруженостей, наприклад, вбудованих трансформаторів. Двошарова структура з електротехнічної сталі із зазором між шарами має коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти вищі, ніж декілька шарів такої ж сталі. Це зменшує вагу екрануючої конструкції й підвищує її ефективність. Заповнення зазору між шарами знижує шумність обладнання, яка є нормативним параметром. Досліджено залежності коефіцієнтів екранування магнітного поля аморфних кобальтових сплавів від індукції зовнішнього магнітного поля. Така залежність є немонотонною, що необхідно враховувати у процесі проектування екрануючих конструкцій. Аморфні феромагнітні сплави також ефективні при екрануванні магнітних полів низьких частот. Перевагами таких сплавів є високі значення магнітної проникності й мала товщина. Термомагнітна обробка аморфних сплавів значно підвищує їх захисні властивості. Показано доцільність розроблення композиційного матеріалу з наповнювачем з дрібнодисперсного аморфного магнітом'якого сплаву.

Ключові слова: магнітний екран, наднизька частота, аморфний магнітом'який сплав.

Вступ

Захисту від магнітних полів приділяється багато уваги. Це обумовлено тим, що через фізичну природу магнітних полів їх екранування захисними матеріалами і конструкціями дуже складне і неоднозначне. Особливо це стосується квазістаціонарних магнітних полів – магнітних складових електромагнітних полів промислової частоти та її гармонік. Такі поля неперервно впливають на людей у виробничих та побутових умовах. Джерелами магнітних полів найбільших напруженостей є електрощитові, електропривод електротехнічного обладнання, побутові пристрої неперервної дії тощо. У багатьох будівлях дозволені до використання вбудовані трансформатори сухого типу. Таке обладнання локалізовано у просторі, що дозволяє впровадити екранування магнітних полів, які вони генерують. Але ці пристрої розташовані у обмежених об'ємах для заощадження площ. Тому можливості застосування захисних конструкцій досить обмежені. Це вимагає розроблення й впровадження матеріалів та виробів високої ефективності й компактності. При цьому слід враховувати як технологічний, так і економічний аспекти. Захисні конструкції повинні мати прийнятну вартість та можливість застосування у будь-якій конфігурації. Це обумовлює актуальність задачі розроблення засобів захисту від впливу магнітних полів локальних джерел.

Огляд досліджень і розробок

Напруженість квазістаціонарних магнітних полів регламентовані низкою міжнародних та націо-

нальних нормативів. Це додаток до Європейської директиви [1], вимоги якого імплементовані у нормативну базу України у вигляді мінімальних вимог до рівнів електромагнітних полів. Норматив [2] встановлює максимальне значення магнітного поля промислової частоти у житлових приміщеннях 0,5 мкТл. Норматив [3] – значення низькочастотних полів наднизької частоти при експлуатації комп'ютерної техніки 250 нТл. Ці вимоги достатньо жорсткі й у більшості умов вимагають впровадження захисту людей.

Застосування традиційного підходу до захисту людей – захист відстанню і часом для низькочастотних впливів будь-якого походження практично неможливе. Це пояснюється низьким згасанням низькочастотних коливань з відстанню. Тому найбільш ефективним засобом захисту людей є екранування низькочастотних магнітних полів захисними матеріалами та конструкціями з них. Сучасною тенденцією у розробленні таких матеріалів є створення композиційних матеріалів. Але більшість з них має високу вартість і низьку технологічність щодо облицювання поверхонь складних форм [4, 5]. Крім того композиції на основі натуральних та полімерних матриць не відповідають вимогам пожежної безпеки [6, 7]. Найбільш ефективними матеріалами з малими масогабаритними параметрами є наноккомпозити [8, 9]. Але вони мають вкрай високу вартість й доцільні для застосування у виробках спеціального призначення. Ефективне екранування магнітного поля трансформаторів запропоновано у [10]. Але використана двошарова каркасна конструкція з конструктивної сталі. Вона громіздка і не може бути реалізована у обмежених просторах, особливо у

спорудах старої забудови. Особливістю магнітних полів наднизької частоти є відсутність відбиття через велику довжину хвилі. Тому високу ефективність можуть мати металеві матеріали, або металокомпозити на мінеральній основі. Таким є будівельний матеріал [11]. За наявності достатнього простору та при проектуванні нових об'єктів його застосування доцільно з технічних та економічних міркувань. У роботах [12, 13] показано, що можливості використання металевих матеріалів для екранування магнітних полів не вичерпані. Тому доцільно провести дослідження ефективності металевих матеріалів різних класів у залежності від умов їх використання та можливих масогабаритних параметрів.

Мета роботи – обґрунтування та розроблення засобів захисту людей від впливу магнітних полів наднизьких частот.

Викладення основного матеріалу

Ефективність екранування магнітних полів наднизьких частот визначається, в основному, відносною магнітною проникністю захисного матеріалу.

Гігієнічно значущі напруженості магнітних полів у більшості будівель і споруд мають поля промислової частоти та її гармонік. У загальному випадку магнітна проникність феромагнітних матеріалів має частотну залежність, але для магнітних полів, що розглядаються, вона має сталі значення і для більшості металів і сплавів є довідковою величиною. Але квазі-стаціонарність магнітних полів промислової частоти обумовлює той факт, що найбільш ефективним екранування є за умови геометричної залежності екрануючих конструкцій, які охоплюють джерело поля. Принаймні за такої умови коефіцієнти екранування магнітного поля максимальні для даного матеріалу. За умови часткового екранування джерела поля або захисту об'єкта зниження напруженості магнітного поля значно нижче, але може бути достатнім у залежності напруженості вихідного поля та значення гранично допустимого рівня для даних умов [14, 15]. Незамкненість екрануючої конструкції може бути вимушеною для доступу до обладнання, забезпечення вентиляції тощо.

Оціночний коефіцієнт екранування конструкції, виготовленої з феромагнітного матеріалу можна визначити зі співвідношення:

$$K = 1 + \mu_r \frac{d}{D},$$

де μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу екрана, d – товщина стінки екрана, D – діаметр еквівалентного сферичного екрана.

Сферичне наближення не дає великих похибок для екрануючих конструкцій кубічної форми, або близької до неї [8]. Ефективність екранування за фіксованих параметрів екрануючого матеріалу має амплітудні залежності, тобто залежить від напруженості магнітного поля, яке потребує екранування. Наявні у науковій літературі дані дещо суперечливі і стосуються обмеженої кількості навіть матеріалів, які виробляються серійно. Недостатньо опрацьована проблематика геометричних критеріїв ефективності екрануючих конструкцій. Вони фрагментарні й стосуються, в основному, не повністю замкнених цилін-

дричних та сферичних конструкцій. Найбільш поширеними магнітом'якими матеріалами є електротехнічні сталі. Вони гарантовано знижують рівні магнітних полів. Було досліджено зміни коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти найбільш поширеними електротехнічними сталями марок 3411, 3412, 3413, 3414 у залежності від індукції зовнішнього магнітного поля (рис. 1).

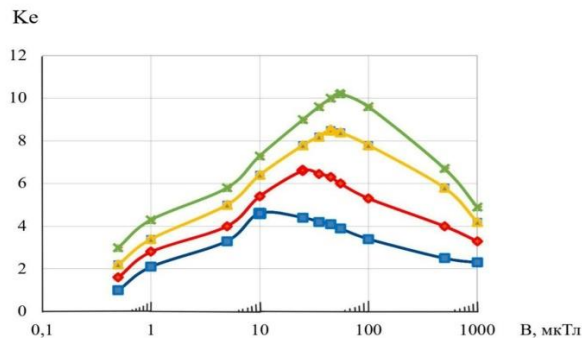


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти електротехнічними сталями від індукції екранованого магнітного поля: — сталь марки 3411, — сталь марки 3412, — сталь марки 3413, — сталь марки 3414; товщини зразків – 0,5 мм

Як видно з рис. 1, захисні властивості сталей суттєво відрізняються. Це можна пояснити різними питомими втратами у цих сталях, які є довідковими величинами.

Питомі втрати для цих матеріалів при магнітній індукції 1,5 Тл на частоті 50 Гц складають:

- сталь марки 3411 – 2,45 Вт/кг,
- сталь марки 3412 – 2,10 Вт/кг,
- сталь марки 3413 – 1,75 Вт/кг,
- сталь марки 3414 – 1,50 Вт/кг.

Виходячи з цього можна дійти висновку, що сталі, менш придатні для основного використання, наприклад, для виготовлення осердь, де критичними є втрати енергії, найбільш придатні для виготовлення захисних конструкцій. Тому для цілей магнітного екранування можна використовувати низькосортні електротехнічні сталі марок 1211, 1212, 1213, у яких питомі втрати складають 9,0–7,0 Вт/кг.

Наведені на рис. 1 дані мають досить велику похибку через те, що джерелом магнітного поля був трансформатор силової підстанції. Тому потрібну індукцію магнітного поля отримували упродовж тривалого часу через зміну навантаження.

Але отримані тенденції мають загальний характер. На усіх кривих рис. 1 є максимум коефіцієнта екранування. Наявність такого максимуму обумовлена, швидше за все, індукцією насичення конкретного матеріалу. Це необхідно враховувати у практичній діяльності при проектуванні засобів екранування магнітного поля.

У багатьох випадках виникає необхідність екранування локальних джерел магнітного поля промислової частоти високих напруженостей. Це, наприклад, вбудовані трансформатори стандартних потужностей 1000–2500 кВт. Враховуючи можливість зниження коефіцієнта екранування внаслідок досягнен-

ня індукції насичення, необхідно підвищити магнітні втрати за рахунок конструкції екрана.

Було проведено лабораторні випробування збірки з п'яти листів електротехнічної сталі й двошарової конструкції із зазором у 5 см. Двошарова конструкція утримувалася каркасом, виготовленим з арматури. Усі листи виготовлялися з однакової електротехнічної сталі.

Результати випробувань залежності зниження індукції магнітного поля промислової частоти магнітними екранами від відстані до джерела поля наведено на рис. 2. Досліджувалися два екрани. Перший екран уявляв собою пакет із п'яти шарів електротехнічної сталі. Другий екран представляє собою двошарову конструкцію з електротехнічної сталі із зазором між шарами – 5 см. Більшу ефективність двошарової конструкції важко визначити однозначно.

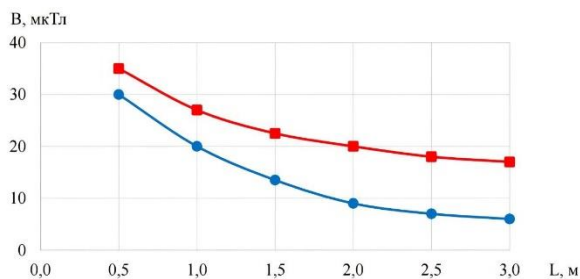


Рис. 2. Залежність зниження індукції магнітного поля промислової частоти магнітними екранами від відстані до джерела поля: — пакет з п'яти шарів електротехнічної сталі; — двошарова конструкція з електротехнічної сталі, зазор між шарами – 5 см

Більшу ефективність двошарової конструкції важко визначити однозначно. Можливо, проявляються ефекти взаємної індукції, зміни популяризації поля тощо. Зафіксований ефект дає можливість знизити масу захисної конструкції з одночасним підвищенням її ефективності. Але при цьому зростають її габаритні параметри. Це можна використати для зниження рівня шуму. Шумність електротехнічного обладнання, зокрема трансформаторів, нормується. Переважна інтенсивність їх звуку припадає на низькочастотну область звукового спектра. Низькочастотні коливання слабо поглинаються будівельними конструкціями, тому двошарова структура може мати певні резонансні властивості. А зазор між феромагнітними поверхнями доцільно заповнити шумопоглинальним матеріалом.

Енергетичні втрати у феромагнітному матеріалі визначаються магнітною проникністю матеріалу μ поля. Для електротехнічних сталей він складає 1000–1300, для конструкційних сталей – 100–200. Існують магнітом'які матеріали, для яких відносна магнітна проникність має значення порядку 10^4 – 10^5 . Це нікелеві сплави пермалою та аморфні сплави на основі заліза та кобальту. Пермалою мають принциповий недолік: за будь-яких деформацій значення магнітної проникності різко падає. Тобто, при виготовленні захисної конструкції втрачаються захисні властивості. Цього недоліку позбавлені аморфні сплави. Сплави

на основі кобальту у достатній кількості виробляються в Україні. Специфіка отримання аморфних металів обумовлює його геометричні характеристики. Матеріал виробляється надшвидким охолодженням розплаву, у результаті якого отримуються стрічки завширшки 3 см й товщиною 20–50 мкм. Для отримання захисної поверхні з цього матеріалу стрічки доцільно переплітати у вигляді «рогожі». Таким чином матеріал стає двошаровим. Перевагою аморфного кобальтового сплаву є те, що термомагнітна обробка сплаву (стаціонарне магнітне поле напруженістю 1000 А/м, температура – 300 °С) значно підвищує захисні властивості матеріалу.

На рис. 3 наведено залежність коефіцієнта екранування аморфного кобальтового сплаву від індукції екранованого магнітного поля промислової частоти до і після магнітотермічної обробки. Товщина двошарового матеріалу складала 60 мкм, а вміст кобальту – 71 %.

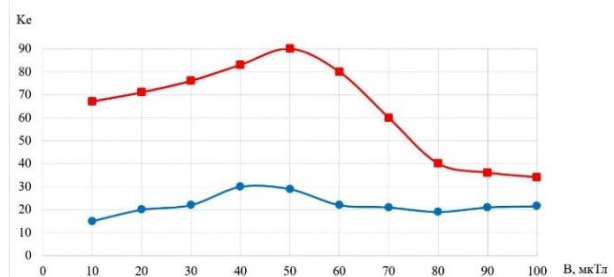


Рис. 3. Залежність коефіцієнта екранування аморфного кобальтового сплаву від індукції екранованого магнітного поля промислової частоти: — вихідний стан, — після магнітотермічної обробки; товщина двошарового матеріалу – 60 мкм; вміст кобальту – 71 %

Перевагою аморфного кобальтового сплаву є достатньо висока ефективність й в області дуже високих і ультрависоких частот. У частотній смузі 0,3 ГГц–3 ГГц коефіцієнт екранування за щільністю потоку енергії монотонно змінюється від 70 до 90 дБ. Це порівняно з ефективністю алюмінію, який має у цій смузі показник 90–100 дБ.

При проектуванні захисту від електромагнітних полів частотою, більшою за промислову, слід враховувати складну залежність коефіцієнтів екранування від амплітудних значень екранованого магнітного поля. Було уточнено дані, наведені у [16]. Зокрема це стосується немонотонності зміни коефіцієнтів екранування магнітних полів малих амплітуд. На рис. 4 наведено залежність коефіцієнта екранування аморфного кобальтового сплаву від індукції екранованого магнітного поля частотою 10 кГц до і після магнітотермічної обробки.

Наведені результати свідчать, що дані, наведені у [16] завищені, не дивлячись на те, що випробувалися зразки, більші за товщиною на 10 мкм. При цьому форми кривих практично збігаються. Це свідчить про те, що тенденції зміни амплітудної залежності захисних властивостей є загальними. Відмінності у кількісних даних можна пояснити похибками вимірювань або відмінностями у режимах виготовлення й термомагнітної обробки зразків.

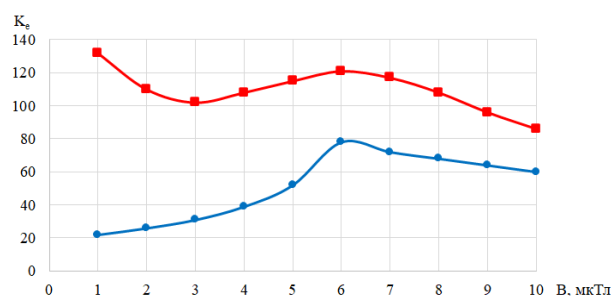


Рис. 4. Залежність коефіцієнта екранування аморфного кобальтового сплаву від індукції екранованого магнітного поля частотою 10 кГц: — вихідний стан, — після магнітотермічної обробки; товщина зразка – 60 мкм; вміст кобальту – 71 %.

З практичної точки зору такі відмінності не є критичними. Отримані коефіцієнти екранування достатньо високі й забезпечують екранування магнітних полів наднизьких та низьких частот більшості виробничих та побутових умов. Аморфні сплави доцільно застосовувати для екранування магнітних полів в умовах малих об'ємів, які виключають застосування стандартних електротехнічних сталей, або екранування джерел поля малих розмірів.

Для магнітних екранів для зниження рівнів низькочастотних полів завжди існує проблема їх закритості через квазістаціонарність полів. Проаналізовані дані досліджень з цього напрямку дозволяють дійти висновку, що універсального підходу не існує. Найбільш раціональним є забезпечення високих коефіцієнтів екранування магнітних полів у зонах суцільного перекриття поля, що знижує його напруженості у незахищених зонах – зонах часткового розкриття екрануючої конструкції, що було реалізовано у [14]. У будь-якому випадку зони розкриття необхідно інструментально перевіряти на тестових конструкціях або за зміною розкриття конструкції на реальному виробі.

У сучасних будівлях і спорудах цивільного призначення спостерігаються значні рівні і високочастотні електромагнітні випромінювання. При цьому їх джерелами можуть бути електронні компоненти обладнання, яке генерує магнітні поля наднизької частоти високих напруженостей. Тому напрямом перспективних досліджень є створення універсального матеріалу, ефективного у широкосмуговій смузі частот. Такий матеріал повинен мати достатні магнітні проникності й електропровідність разом з високою діелектричною проникністю. Це можливо реалізувати у композиційних матеріалах. Вартість аморфних

магнітом'яких сплавів поступово знижується. Тому доцільно розглядати можливість створення матеріалу на основі діелектричної матриці наднизької горючості з наповнювачем із дрібнодисперсного аморфного сплаву. За певних режимів термічної обробки такі сплави стають крихкими, що спрощує процес їх подрібнення. Не виключається можливість утворення у таких сплавах кристалічних частинок нанорозмірів. Такі структури відкривають можливість різкого підвищення коефіцієнтів екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону.

Висновки

1. Показано, що для екранування змінних магнітних полів, які можна вважати квазістаціонарними, доцільно використовувати стандартні магнітом'які сталі. Досліджено залежність коефіцієнтів екранування магнітних полів промислової частоти від індукції екранованого поля найбільш поширених електротехнічних сталей. Встановлено наявність максимального значення коефіцієнта екранування за певної індукції магнітного поля. Це пов'язане з досягненням індукції насичення. Визначено, що для цілей електромагнітної безпеки найбільш прийнятними є сталі з великими показниками магнітних втрат. Це дозволяє використовувати низькосортні електротехнічні сталі для виготовлення магнітних екранів.

2. Показана доцільність виготовлення двошарових екрануючих конструкцій для екранування магнітних полів локальних джерел з великими напруженостями магнітних полів. Такі конструкції ефективніші за багатошарові структури, виготовлені з того ж матеріалу й мають меншу вагу. Зазор між двома шарами конструкції доцільно заповнювати звукопоглинальним матеріалом, що знижує шумність екранованого пристрою.

3. Досліджено залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти від індукції екранованого магнітного поля аморфних кобальтових сплавів. Встановлено, що така залежність немонотонна й має чіткий максимум. Термічна обробка аморфного сплаву у постійному магнітному полі значно підвищує коефіцієнти екранування. Встановлено амплітудні залежності коефіцієнтів екранування аморфним сплавом магнітного поля низької частоти, які також немонотонні. Для отримання універсального широкосмугового електромагнітного екрана обґрунтовано розроблення композиційного матеріалу з наповнювачем із дрібнодисперсного аморфного сплаву.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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>
2. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика. Зі змінами. Київ. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго», 2016.
3. MPR II. The Swedish government standard for maximum video terminal radiation. URL: <https://www.computerlanguage.com/results.php?definition=TCO>
4. Changtao Pu, Jiaxin Yang, Shuang Jin, Yuhui Zhou, Wei Gong. (2025). Engineered Self-Blown Nonisocyanate Polyurethanes with Synchronously Enhanced Electromagnetic Interference Shielding and Dimensional Stability. Applied Polymer Materials, 7600-7611, <https://doi.org/10.1021/acsapm.5c012350000>

5. Rajendrakumar Sharma, Dibyanjan Das, Prafulla K. Dash, Asutosh Acharya, Kajal Parashar, SKS Parashar. 2025. Electromagnetic interference shielding of Zn-50%-Al alloy-coated polypropylene flexible conducting film. *Intelligent Computing Techniques and Applications*, 4 p.
6. Bharath, V., & Basa Reddy, S. (2025). Sustainable Electromagnetic Interference Shielding with Biomass Waste. *IntechOpen*. doi: 10.5772/intechopen.1009943
7. Барпій М.М., Левченко Л.О., Тихенко О.М., Колумбет В.П., Резнік Д.В. Розроблення та дослідження властивостей текстильного матеріалу від впливу електромагнітних полів. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування*. 2019. Вип. 1(85). С. 237-244
8. 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. <https://doi.org/10.15407/technd2018.04.014>.
9. Senyk I., Kuryptia Y., Barsukov V., Butenko O., Khomenko V. Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21(4). Pp. 771–778.
10. Рябов Ю.Г., Гуров И.Б. Экранирование встроенных трансформаторных подстанций. *Технологии ЭМС*. 2014. № 3. С. 21–28.
11. Y. Wang, C. Ma, S. Xie, Z. Wu, Z. Ji. An ultra-wideband electromagnetic shielding concrete based on multi-scale conductive fillers. 2025. *Materials Letters*, Volume 399, 15 November 2025, 139080. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.139080>
12. Панова О.В., Тихенко О.М., Ніколаєв К.Д., Ходаковский 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.
13. 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.
14. Левченко О.Г., Левчук В.К., Тимошенко О.Н. Экранирующие материалы и средства индивидуальной защиты сварщика от магнитных полей. *Автоматическая сварка*. 2011. № 3. С.49–55.
15. Екрануючий комплект: пат. 90892 Україна: МПК G12B 17/00. № 201400841; заявл. 30.01.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11. 4 с.
16. Глива В. А. Моніторинг та нормалізація фізичних факторів виробничого середовища при експлуатації автоматизованих систем: дис. ...д-ра техн. наук: 05.26.01. Київ, 2012. 320 с.

Received (Надійшла) 15.08.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бурдейна Наталія Борисівна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Nataliia Burdeina – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: burdeina.nb@knuba.edu.ua, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220047954>.

Підлісний Ярослав Анатолійович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна;

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

e-mail: Pidlisnyi97@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-4906-3164>.

Means of normalising the levels of magnetic fields of local sources

Nataliia Burdeina, Yaroslav Pidlisnyi

Abstract. The protective properties of soft magnetic metal alloys for shielding ultra-low frequency magnetic fields have been investigated. The dependence of the shielding coefficients of industrial frequency magnetic fields by the most common electrical steels on the induction of the shielded magnetic field has been established. It has been determined that this dependence is non-monotonic. The presence of the maximum shielding coefficient is due to the achievement of the saturation induction of the material. The values of the shielding coefficients depend on the specific losses in steel, which are reference values. It has been shown that for the manufacture of shielding structures, it is advisable to use low-grade electrical steels, which are least suitable for their main application – the manufacture of cores and magnetic conductors. A two-layer structure is proposed for shielding high-intensity magnetic fields, for example, in built-in transformers. A two-layer structure made of electrical steel with a gap between the layers has higher industrial frequency magnetic field shielding coefficients than several layers of the same steel. This reduces the weight of the shielding structure and increases its efficiency. Filling the gap between the layers reduces equipment noise, which is a regulatory parameter. The dependence of the magnetic field shielding coefficients of amorphous cobalt alloys on the induction of an external magnetic field has been studied. This dependence is non-monotonic, which must be taken into account in the design of shielding structures. Amorphous ferromagnetic alloys are also effective in shielding low-frequency magnetic fields. The advantages of such alloys are high magnetic permeability and low thickness. Thermomagnetic treatment of amorphous alloys significantly increases their protective properties. The feasibility of developing a composite material with a filler of finely dispersed amorphous soft magnetic alloy is shown.

Keywords: magnetic shield, ultra-low frequency, amorphous soft magnetic alloy.