

О. В. Панова¹, О. М. Тихенко², К. Д. Ніколаєв², О. В. Ходаковський³, О. Ю. Сапельнікова¹

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

² Національний авіаційний університет, Київ, Україна

³ Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ЇХ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Захисні властивості сплавів у різних частотних діапазонах екрануючих матеріалів мають складний характер. Предмет дослідження даної роботи – визначення амплітудно-частотних залежностей коефіцієнта екранування електромагнітних полів сучасними металевими сплавами. Досліджено: традиційні матеріали; електротехнічні сталі різного класу та алюмінієвого сплаву, які мають різну ширину захисного екрану; металовмісні шнури різного (двошарового та тришарового) сплетіння. Досліджено залежності захисних екранувальних властивостей магнітного поля за рахунок відбиття для електротехнічної сталі класу 121 та сплаву з дюралюмінію та електротехнічної сталі. Мета роботи – визначення коефіцієнтів екранування у низькочастотній та середньо-частотній областях електромагнітного спектра на основі вимірювання коефіцієнтів екранування найбільш поширених металевих захисних матеріалів та надати обґрунтовані рекомендації щодо їх найбільш ефективного використання у робітничих умовах для захисту від електромагнітних полів та випромінювань працюючих та сумісності електричного та електронного технічного обладнання. Розроблено амплітудно-частотні залежності коефіцієнта екранування електромагнітних полів сучасними стандартними металевими сплавами для захисту людей і для забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного технологічного обладнання. Запропоновано захисні заходи захисту від впливу від електромагнітних полів та випромінювань, що засновані на принципах розумної достатності, з урахуванням мінімальних витрат. Доведено експериментально та економічно обґрунтовано, що найбільш ефективним засобом захисту від електромагнітної безпеки на підприємствах в умовах складної дії різноманітних електромагнітних полів, є електротехнічні сталі. В результаті отриманих співвідношень захисних властивостей (за рахунок електромагнітної енергії та відбиття електромагнітних хвиль) раціоналізовано захисні модифікаційні конструкції з мінімальним коефіцієнтом відбиття електромагнітних хвиль у небажаному напрямку в різному частотному діапазоні. Такі висновки надали змогу запропонувати методологію розрахунку щодо необхідної оптимальної товщини захисного магнітного екрана найбільш сприятливої ефективності у даних умовах. Це дозволяє мінімізувати обсяг довідникових та експериментальних даних та одночасно визначити товщину екрана необхідної ефективності, а також зменшує загальну вартість захисної конструкції.

Ключові слова: електромагнітні поля; випромінювання; екранування; електромагнітна сумісність; технічні засоби.

Вступ

У сучасних умовах складних амплітудно-частотних характеристик електромагнітних полів, притаманних виробничим умовам найбільша увага приділяється розробленню композитних електромагнітних екранів. Але, у багатьох випадках, особливо за наявності відносно вузької частотної смуги електромагнітного поля, достатньо ефективними можуть бути традиційні металеві захисні конструкції. У першу чергу це стосується енергетичної галузі, де превалюють електричні та магнітні поля наднизької частоти, а також виробничих умов з незмінною у часі електромагнітною обстановкою.

Такі захисні екрани мають низку переваг – виготовляються з матеріалів широкої номенклатури, що виробляється металургійною галуззю, до того ж відносно дешеві.

Але недоліком сплавів чорних та кольорових металів є складність залежностей коефіцієнтів екранування від частоти та амплітуди поля, яке потребує екранування.

Такі залежності не монотонні, тобто потребують дослідження саме ці параметри, що надає змогу обґрунтувати найбільш сучасні рекомендації ефективного застосування металевих електромагнітних екранів.

Дослідження, виконані у попередні роки здійснювалися здебільшого з використанням несертифікованого лабораторного обладнання, або стандартних вимірювачів електричного та магнітного поля промислової частоти з максимальними похибками вимірювань до 3 дБ.

На теперішній час це не прийнятне, наприклад через те, що загальноєвропейські стандарти з електромагнітної сумісності, які набули чинності в Україні методом підтвердження, дуже жорсткі.

Тому, необхідно мати надійні й максимально точні дані щодо коефіцієнтів екранування найбільш поширених металевих екрануючих матеріалів з урахуванням специфіки реальних виробничих умов. Це дасть змогу надання рекомендацій щодо їх ефективності у залежності від амплітудних та частотних характеристик екранованого поля й електрофізичних характеристик екрануючих матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чинні санітарні норми електромагнітної безпеки [1] рекомендують у якості електромагнітних екранів використання міді й алюмінію та їх сплавів, електротехнічних сталей та їх пермалоїв. Не дивлячись на це, у довідковій літературі практично відсутні дані щодо їх захисних властивостей.

Здебільшого показано, що коефіцієнти екранування мають тенденцію до підвищення зі збільшен-

ням частоти екранованого поля. Частина досліджень розрахункового характеру оперує абстрактним провідним матеріалом з фіксованими електрофізичними властивостями [2–4].

Такі роботи сприяють обиранню потрібного класу захисних сплавів, але не надають конкретних рекомендацій щодо їх застосування у реальних виробничих умовах різного призначення.

У роботі [5] надано результати досліджень залежностей коефіцієнтів екранування деяких сталей від амплітудних та частотних характеристик магнітного поля, зокрема показано, що у багатьох випадках ці залежності немонотонні. Але дослідження виконані з використанням отриманого обладнання [6], яке заздалегідь має великі похибки вимірювань, про що свідчить калібровочний графік.

Виконано ряд досліджень та розрахунків, щодо захисних властивостей матеріалів відносно нового класу – аморфних металевих сплавів. Так, у роботі [7] наведено результати вимірювань коефіцієнтів екранування магнітом'якого аморфного сплаву на основі кобальту (до 70 %). Дослідження виконані з використанням осцилографу та індукційного датчика без осердя. Це обумовлює низькі рівні сигналів та великі приладні похибки.

Останнім часом аморфні сплави набули поширення для виготовлення радіотехнічних комплектуючих через їх високі магнітні проникності (до 800000) та стабільність магнітних властивостей. Щодо їх використання як екрануючих матеріалів, то дані дуже суперечливі.

Виробники аморфних сплавів (ГАММЕТ, МАРІК, ММР50) не надають їх хімічного складу, але представлені коефіцієнти екранування дуже різняться як за значеннями, так і за амплітудно-частотними залежностями.

Враховуючи високу міцність, малу товщину та великі магнітні проникності доцільно дослідити параметри аморфних сплавів, які виробляються в Україні (висококобальтові) та порівняти їх з властивостями традиційних магнітом'яких матеріалів (пермалоїв) з близькими магнітними властивостями.

Але усі ці матеріали досить дорогі у виробництві і доцільні до застосування в умовах, коли інші серійні матеріали недостатньо ефективні.

Наведене обумовлює необхідність проведення комплексних досліджень захисних властивостей усіх поширених класів металевих матеріалів з уточненням амплітудно-частотних залежностей коефіцієнтів екранування.

Постановка завдання. Мета дослідження – на основі вимірювання коефіцієнтів екранування найбільш поширених металевих захисних матеріалів надати обґрунтовані рекомендації щодо їх найбільш ефективного використання у реальних виробничих умовах різного призначення.

Виклад основного матеріалу

Для визначення коефіцієнтів екранування у низькочастотній та середньо-частотній областях електромагнітного спектра використовувався повірений аналізатор електромагнітного спектра SPECTRA

NNF 5035. Максимальна основна похибка вимірювань перевищувала 1 % (згідно паспортних даних).

Враховуючи, що максимальна частота для цього приладу складає 2 МГц, для вимірювань коефіцієнтів екранування електромагнітного поля вищих частот використовувався калібрований вимірювач напруженості електричного та магнітного поля ПЗ-31.

Максимальна основна похибка вимірювань не перевищувала 3 %. У областях низьких частот електромагнітний екран був геометрично замкнений. Для дуже високих і вищих частот екран був плоский, вміщений у отвір суцільного металевого листа, що виключало проникнення поля поза екраном.

Кольорові метали не знайшли широкого використання у якості екрануючих матеріалів. Тільки мідна фольга використовується для захисту окремих електронних блоків для захисту від зовнішніх впливів, тобто забезпечення електромагнітної сумісності.

Найбільш поширеними є захисні конструкції з алюмінієвих сплавів, які використовуються як декоративні покриття [7]. Вони виготовляються зі сплавів Al, Cu, Mg (дуралюміні).

Було проведено дослідження впливу таких покриттів на електромагнітну обстановку у середині будівель. Так, у діапазоні частот 30 МГц–3 ГГц, коефіцієнти екранування алюмінієвого сплаву, нанесеного на бетонну стіну складала 20-24. Для суцільної будівлі з цього сплаву (ангару) цей показник складав 38-40.

Враховуючи малу товщину металевого листа (0,8 мм), можна зробити висновок, що значна частина захисту припадає на відбиття електромагнітних хвиль, що потребує уточнення.

Особливо це стосується електромагнітних полів низьких частот.

У загальному випадку дослідження захисних властивостей матеріалів повинні складатися з визначення загального коефіцієнта екранування та імплантації в нього захисту за рахунок відбиття.

На рис.1 та 2 представлені результати залежності коефіцієнта екранування найбільш розповсюджених електротехнічних сталей від частот екранованого магнітного поля.

Як видно з отриманих даних, захисні властивості (характеристики матеріалу) сплавів суттєво відрізняються, що потребує з'ясування.

Відомо, що поглинальні властивості феромагнітних матеріалів залежать, в основному, від їх магнітних властивостей (втрати на гістерезис, вихрові струми).

Так, питомі втрати сталі марок 2011 на частоті 50 Гц за магнітної індукції, числове значення якої 1,0 Тл, складають 3,8 Вт/кг. Ці параметри для сталей марок 2211 та 2312 за магнітної індукції 1,4 Тл складають відповідно 2,6 Вт/кг та 1,75 Вт/кг.

Але виявляється, що у практичній роботі визначення показників питомих втрат матеріалів досить складне.

Тому, можливо керуватися питомими опорами сплавів, які легко визначити компенсаційним методом подвійного мосту.

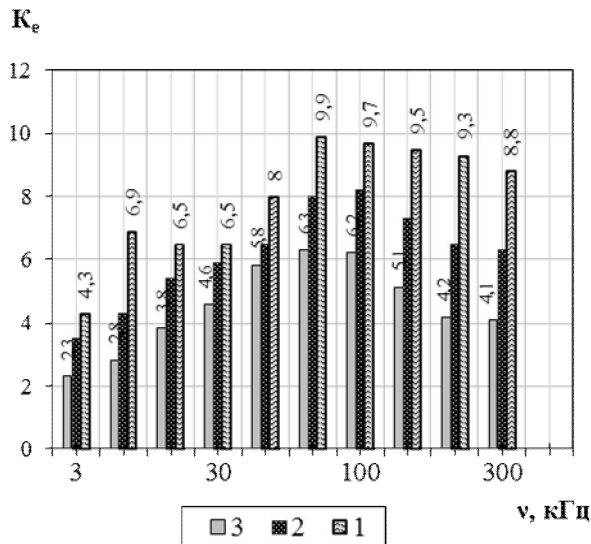


Рис. 1. Залежність екранувальних властивостей електротехнічних сталей (шириною 0,5 мм) від частоти магнітного поля, де 1; 2; 3 – сталі марок 2011, 2211, 2312 (відповідно)

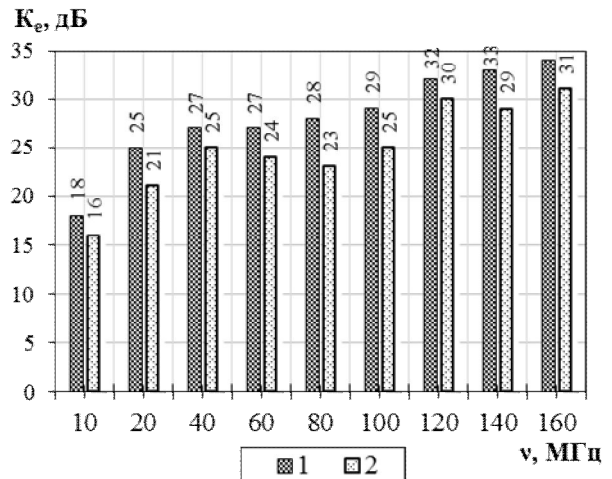


Рис. 2. Залежність екранувальних характеристик матеріалу з металовмісних шнурів від частоти екранованого поля, де 1 – тришарове ткане плетіння, 2 – двошарове ткане плетіння

Залежність коефіцієнтів екранування марок сталей від їх питомих опорів, показано на рис. 3.

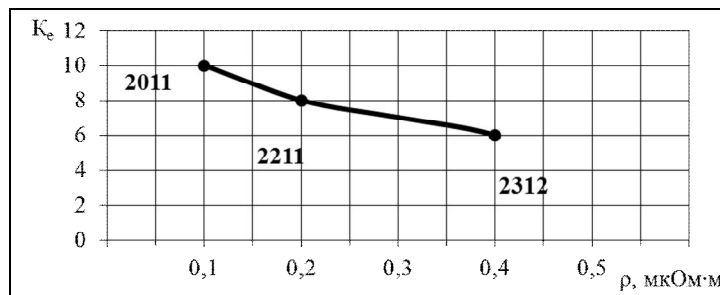


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів екранування електротехнічних сталей марок 2011, 2211, 2312 від їх питомих опорів на частоті 6 кГц

Отримані результати свідчать, що для цілей електромагнітного захисту найбільш доцільно використовувати електротехнічні сталі, найменш придатні для основного застосування (осердя та магнітопроводи).

Значна частина захисних властивостей сплавів у височастотній області припадає на відбиття електромагнітних хвиль. Це питання потребує додаткових досліджень та з'ясування причин його виникнення

Це пояснюють тим, що відбиття хвиль може відбуватися у небажаному напрямку.

Результати випробувань екранування магнітного поля за рахунок поглинання для електротехнічної сталі 121 класу та алюмінієвого сплаву показано на рис. 4 та 5. Дослідження проводились із зразками електротехнічної сталі та дуралюмінію різної товщини.

Криві на рис. 4 відповідають загальним функціям:

$$K_n = A \nu^n$$

де A - коефіцієнт пропорційності, ν - частота поля).

Наведені дані доцільно використовувати для розроблення організаційно-технічних заходів з електромагнітної безпеки у конкретних виробничих

умовах, коли критичними є відбиття електромагнітних хвиль та необхідність одночасного забезпечення електромагнітної сумісності електричних та електронних технічних засобів [8].

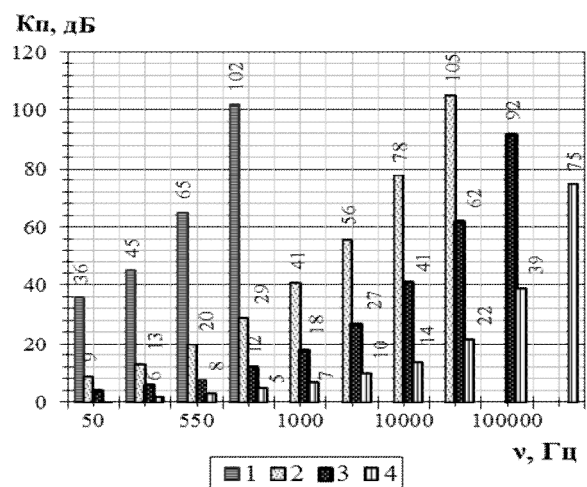


Рис. 4. Співвідношення екранування магнітного поля за рахунок поглинання для електротехнічної сталі класу 121 та алюмінієвого сплаву, де 1, 2 – сталь електротехнічна 3 мм та 0,5 мм (відповідно); 3, 4 – дуралюміній Д1 3 мм і 0,5 мм (відповідно)

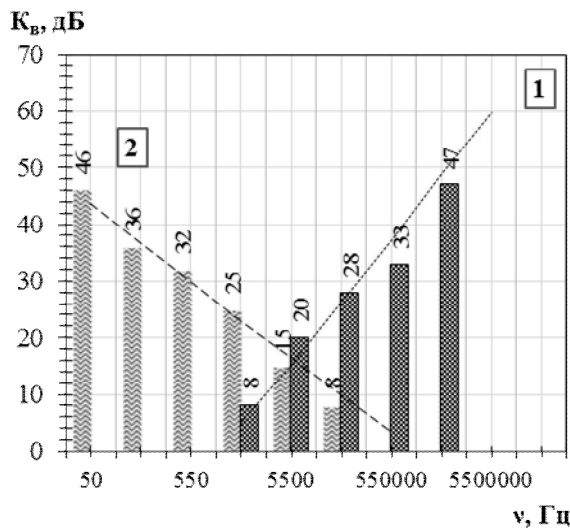


Рис. 5. Залежність екранувальних властивостей магнітного поля за рахунок відбиття для електротехнічної сталі класу 121 та алюмінієвого сплаву; де 1 – дуралюміній; 2 – електротехнічна сталь

Необхідно також враховувати, що екранування потребують поля поширеного частотного спектра, а довідкові дані щодо електромагнітних властивостей серійних матеріалів описуються для частот 50 Гц та 400 Гц у магнітних полях індукцією, числове значення яких складає 1,0–1,7 Тл, та напруженостями 0,4 А/м та 10 А/м (відповідно).

Зазвичай використовуються матеріали, зокрема електротехнічні сталі, з номенклатури, що виробляються промисловістю 0,15 – 5,0 мм.

Для захисту від магнітних полів малих напруженостей (до 10 А/м) товщина листа майже не критична. Для більших напруженостей ефективність екранування необхідно розраховувати.

Співвідношення, наведені у багатьох джерелах, наприклад [5, 8, 9] не завжди прийнятні через необхідність наявності експериментальних даних, щодо коефіцієнта відбиття, погонного ослаблення поля тощо. Для визначення необхідної товщини екрана доцільно спиратися на фундаментальні співвідношення:

$$H_1 = H_0 e^{-\alpha d},$$

де $\alpha = \sqrt{\rho f \mu_a \delta}$, H_1 – напруженості вихідних електричного і магнітного полів; d – товщина екрана; f – частота екранованого поля; μ_a – абсолютна магнітна проникність матеріалу; δ – питома провідність матеріалу.

Питоми провідності сплавів або відомі, або визначаються як величини, зворотні питомим опорам.

Щодо μ_a , та її значенням є ефективна магнітна проникність за конкретних параметрів екрана. Але у разі потреби ця величина може бути розрахована та екстрапольована з використанням професійного пакету COMSOL [9].

Для більшої корисності результатів у подальшому доцільно отримати експериментальні дані щодо ефективних магнітних проникностей найбільш поширених екрануючих матеріалів з наданням рекомендацій щодо їх максимальної ефективності для захисту працюючих на виробництвах для різного класу призначення.

Висновки

1. Уточнені амплітудно-частотні залежності коефіцієнта екранування магнітних полів стандартними металевими сплавами дозволяють застосовувати їх як для захисту працюючих, так і для забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного технологічного обладнання.

2. Отримані експериментальні дані свідчать, що для цілей електромагнітної безпеки найефективнішими є електротехнічні сталі, найменш придатні для основного застосування.

Це дає змогу здійснювати захисні заходи на принципах розумної достатності з мінімальними витратами.

3. Отримані співвідношення захисних властивостей за рахунок поняття електромагнітної енергії та відбиття електромагнітних хвиль дозволить раціоналізувати захисні конструкції з мінімізацією відбиття електромагнітних хвиль у небажаному напрямку.

4. Надана методологія розрахунку необхідної товщини магнітного екрана дозволяє за мінімальних обсягів довідникових та експериментальних даних однозначно визначити товщину екрана необхідної ефективності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів: Д Сан Пін 3.3.6.096-2002. [Чинний від 2003-01-04]. К.: МОЗ України, 2003. 16 с. (Державні санітарні норми України).
2. Резинкина М. М., Гринченко В. С., Думанский Ю. Д., Медведев С. В. Экранирование магнитного поля промышленной частоты в рабочих зонах электростанций. *Гигиена населенных місць*. 2010. Вип. 55. С. 249–255.
3. Резинкина М. М. Использование численных расчётов для выбора средств экранирования от действия магнитных полей. *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77., № 11. С. 17–24.
4. Bhattacharjee S. Protective Measures to Minimize the Electromagnetic Radiation. *Electronic and Electric Engineering*. 2014. Vol. 4. P. 375–380.
5. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Державна установа «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». Київ, 2014. 151 с.
6. Пристрій контролю захисних властивостей електромагнітних екранів: пат. 58604 Україна: МПК G01L9/00; заяв. 15.03.2011; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.
7. 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.

8. Панова О.В. Загальні критерії застосування електромагнітних екранів для забезпечення електромагнітної безпеки та сумісності технічного обладнання. *Вісник Донецького гірничого інституту*. 2018. Вип. 2. URL: https://jdmi.donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/02/Panova_JDMI_2_2018.pdf
9. Glyva V. A., Podoltsev A. D., Bolibrukh B. V., Radionov A. V. A thin electromagnetics field of a composite structure made on the basis of a magnetic fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P. 14–18.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. А. Глива,
 Національний авіаційний університет, Київ
 Received (Надійшла) 28.08.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2019

Исследование защитных свойств металлических электромагнитных экранов и определения условий их максимальной эффективности

Е. В. Панова, О. Н. Тихенко, О. В. Ходаковский, О. Ю. Сапельникова

Защитные свойства сплавов в различных частотных диапазонах экранирующих материалов имеют сложный характер. Предмет исследования данной работы - определение амплитудно-частотных зависимостей коэффициента экранирования электромагнитных полей современными металлическими сплавами. Исследованы традиционные материалы; электротехнические стали различного класса и алюминиевого сплава, которые имеют разную ширину защитного экрана; металлосодержащие шнуры различного (двухслойного и трехслойного) сплетения. Также исследованы зависимости защитных экранирующих свойств магнитного поля за счет отражения для электротехнической стали класса 121 и сплава из дюралюминия и электротехнической стали. Цель работы - определение коэффициентов экранирования в низкочастотной и среднечастотной областях электромагнитного спектра на основе измерения коэффициентов экранирования наиболее распространенных металлических защитных материалов; предоставить обоснованные рекомендации для их наиболее эффективного использования на производстве для защиты от электромагнитных полей и излучений работающих людей и совместимости электрического и электронного технического оборудования. Исследованы амплитудно-частотные зависимости коэффициента экранирования электромагнитных полей современными стандартными металлическими сплавами для защиты людей и для обеспечения электромагнитной совместимости электрического и электронного технологического оборудования. Предложено меры по защите от воздействия от электромагнитных полей и излучений, основанных на принципах разумной достаточности, с учетом минимальных затрат на производство таких мероприятий. Доказано экспериментально и экономически обосновано, что наиболее эффективным средством защиты от электромагнитной безопасности на предприятиях в условиях сложного действия различных электромагнитных полей, является электротехнические стали. В результате полученных соотношений защитных свойств (за счет электромагнитной энергии и отражения электромагнитных волн) рационализировано защитные модификационные конструкции с минимальным коэффициентом отражения электромагнитных волн в нежелательном направлении в разном частотном диапазоне. Такие выводы предоставили возможность предложить методологию расчета по определению интересующей оптимальной толщины защитного магнитного экрана наиболее благоприятной эффективности в данных условиях. Это позволяет минимизировать объем справочных и экспериментальных данных и однозначно определить толщину экрана необходимой эффективности, а также уменьшает общую стоимость защитной конструкции.

Ключевые слова: электромагнитные поля; излучения; экранирование, электромагнитная совместимость, технические средства.

Researching the protective properties of metallic electromagnetic screens and determining their maximum efficiency conditions

E. Panova, O. Tykhenko, O. Khodakovsky, O. Sapelnikova

Protective properties of alloys used in shielding materials of various frequency range are complex. The subject of this study is to determine the amplitude-frequency dependences of modern metal alloy electromagnetic fields' screening coefficient. Researched: traditional materials; electrical steel of various classes and aluminum alloys, which have different widths of protective screen; metal-containing cords of various (two-layer and three-layer) plexus. The dependences of the protective shielding properties of the magnetic field due to reflection for Class 121 electrical steel and an alloy of duralumin and electrical steel have also been investigated. The purpose of this work is to determine screening coefficients in low-frequency and mid-frequency regions of electromagnetic spectrum based on measuring the screening coefficients of the most common metal protective materials; to provide reasonable recommendations for their most effective use in production for protecting the workers and electronic technical equipment against electromagnetic fields and radiation. Measures of protection against electromagnetic field and radiation exposure, based on the principles of reasonable sufficiency, taking into account the least possible spending on them are proposed. It has been proved experimentally and economically that the most effective means of protection against electromagnetic safety in enterprises under the complex effects of various electromagnetic fields is electrical steel. As a result of the obtained ratios of protective properties (due to electromagnetic energy and electromagnetic wave reflection), protective modification designs with a minimum coefficient of electromagnetic wave reflection in an unwanted direction in a different frequency range have been rationalized. Such conclusions provided an opportunity to propose a calculation method for determining the optimal thickness of the protective magnetic shield, for the most favorable efficiency in these conditions. This minimizes the amount of referencial and experimental data and also determines the thickness of the screen for the required efficiency, reducing the total cost of the protective structure.

Keywords: electromagnetic fields; radiation; shielding, international standards, electromagnetic compatibility, technical means.