

УДК 538.69.331.45

к.е.н., доцент Левченко Л.О.,
larlevch@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7227-9472,
Колумбет В. П., vksvarog@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0871-9402,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Багрій М.М., baw1973@ukr.net, ORCID:0000-0003-3543-4741,
Національний авіаційний університет, м. Київ

ГРАФО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

Для ефективного захисту працюючих від впливу електромагнітних полів використовують екранування. Однак у нормативних документах не зазначені умови використання електромагнітних екранів, які залежать від характеристик поля та конфігурації екранів. У статті розглянуто застосування електромагнітних екранів як метод зниження рівнів магнітних полів наднизьких та низьких частот. Надані співвідношення відстаней від джерела поля до екрана та розміри екрана. Було визначено, що найбільш критичним параметром для підвищення ефективності екранування є довжина екрана уздовж лінійного джерела магнітного поля: збільшення довжини дозволяє підвищувати коефіцієнти екранування до необхідних значень. В той же час ширина екрана, починаючи із співвідношення напівширини екрана до відстані до джерела 12 – 14, стає некритичною і може бути зафіксованою у реальних умовах перед впровадженням заходів з електромагнітної безпеки. В якості найбільш ефективних матеріалів для екранування магнітних полів наднизьких і низьких частот визначені феромагнітні сплави з відносними магнітними проникностями у межах 200-400.

Ключові слова: екранування; магнітне поле; електромагнітний екран; захисні властивості; наднизькі частоти; низькі частоти.

Вступ. Сучасні будівлі і споруди характеризуються значними рівнями енергонасиченості як за загальним електронавантаженням, так і за частотним складом та амплітудними значеннями електромагнітних полів у окремих приміщеннях та у будівлі в цілому.

Найбільш ефективним засобом захисту працюючих від впливу електромагнітних полів є їх екранування відповідними екранувальними матеріалами.

Зниження рівня електричної складової електромагнітного поля не викликає труднощів та здійснюється будь-яким металевим матеріалом.

В той же час екранування магнітної складової є складною технічною задачею, пов'язаною, зокрема, з намагніченістю екрана у зовнішньому магнітному полі.

Стан питання. Останнім часом як в Україні, так і за кордоном виконано багато досліджень щодо екранування магнітних полів.

Більшість з них спрямовані на захист чутливого, щільно розміщеного електронного обладнання від зовнішніх електромагнітних впливів, наприклад, у аерокосмічній техніці [1-3].

Значною мірою це обумовлене проблемами, пов'язаними з електромагнітною сумісністю технічних засобів [4]. Частина досліджень присвячено захисту людей від впливу електромагнітних полів екрануванням.

У роботі [5] розглянуто критерії вибору захисного матеріалу в залежності від частоти та амплітуди магнітного поля, як потребує екранування.

Необхідність та актуальність таких досліджень підтверджується вимогами Директиви Євросоюзу з питань електромагнітної безпеки (Стаття 5, п. 2с) та додатком до неї у вигляді міжнародного стандарту щодо електромагнітної безпеки населення та працюючих [6, 7].

Однак, як ці документи, так і відповідний національний стандарт [8] висувають вимоги щодо використання електромагнітних екранів та надають перелік (далеко не повний) матеріалів для їх виготовлення, не надаючи умов їх використання як за характеристиками поля, так і за конфігураціями екранів.

Останнє уявляється дуже важливим з огляду хвильового характеру електромагнітних полів.

У більшості робіт електромагнітні екрани представлені дещо абстрактно: як нескінченні площини, циліндри тощо [9, 10].

Прикладні розробки [11, 12] щодо захисту від низькочастотних магнітних полів мають експериментальний характер та не дають узагальнених критеріїв використання екранів тих чи інших конфігурацій.

Зміни коефіцієнтів екранування електромагнітних полів в залежності від розмірів екрана та відстані від джерела поля до екрана досліджено у роботі [13].

Але вона стосується випромінювань надвисоких частот.

Ґрунтовне дослідження [14] розглядає варіації коефіцієнтів екранування з урахуванням дифракційних явищ у екрані кінцевих розмірів з наданням усіх необхідних відстаней та розмірів (відстані від джерела поля до екрана, довжина електромагнітної хвилі тощо).

Недоліком цих робіт є те, що вони розглядають джерело електромагнітного поля як точкове.

Це принципово неприйнятно для низькочастотних полів, які фактично є квазістаціонарними, та характеризуються, зазвичай, великими розмірами – електротехнічне обладнання, розподільчі пристрої, лінії електропередачі та ін.

Мета статті. Метою статті є дослідження та надання кількісних характеристик щодо розмірів і розташування електромагнітних екранів для зниження рівнів магнітних полів наднизьких та низьких частот.

Дослідження з електромагнітної безпеки, а саме: екранування джерел електромагнітних полів свідчать, що формальне виконання вимог санітарних норм і правил при роботі з джерелами електромагнітних полів [8] не завжди забезпечують бажаний ефект.

У деяких випадках магнітне поле, генероване технічним засобом, не тільки не знижується при його екранування феромагнітним матеріалом, але й підвищується у просторі за екраном.

Так, при екрануванні блока живлення технічного засобу при його підключенні до мережі електроживлення промислової частоти спостерігалось підвищення напруженості магнітного поля у наднизькочастотній області (приклад на рис. 1).

У якості електромагнітного екрана використовувалася рекомендоване нормативом електротехнічна сталь класу 201. Як видно з рисунку (рис. 1), ефективність екранування для частот більше 200 Гц поступово зростає, що теоретично обґрунтовано та досліджено експериментально.

В той же час на частотах 0 Гц – 200 Гц спостерігається підвищення напруженості магнітного поля (крім частоти 150 Гц).

Втім, у переважній більшості випадків застосування феромагнітного екрана знижує напруженості поля в усьому діапазоні зі зростанням коефіцієнту екранування за збільшенням частоти поля.

Для електротехнічної сталі класу 201 за зростанням частоти магнітного поля від 0 Гц до 1000 Гц коефіцієнт екранування підвищується від 2 до 6; для сталі класу 221 – від 2 до 3,5; для сталі класу 231 – від 1,5 до 2,2.

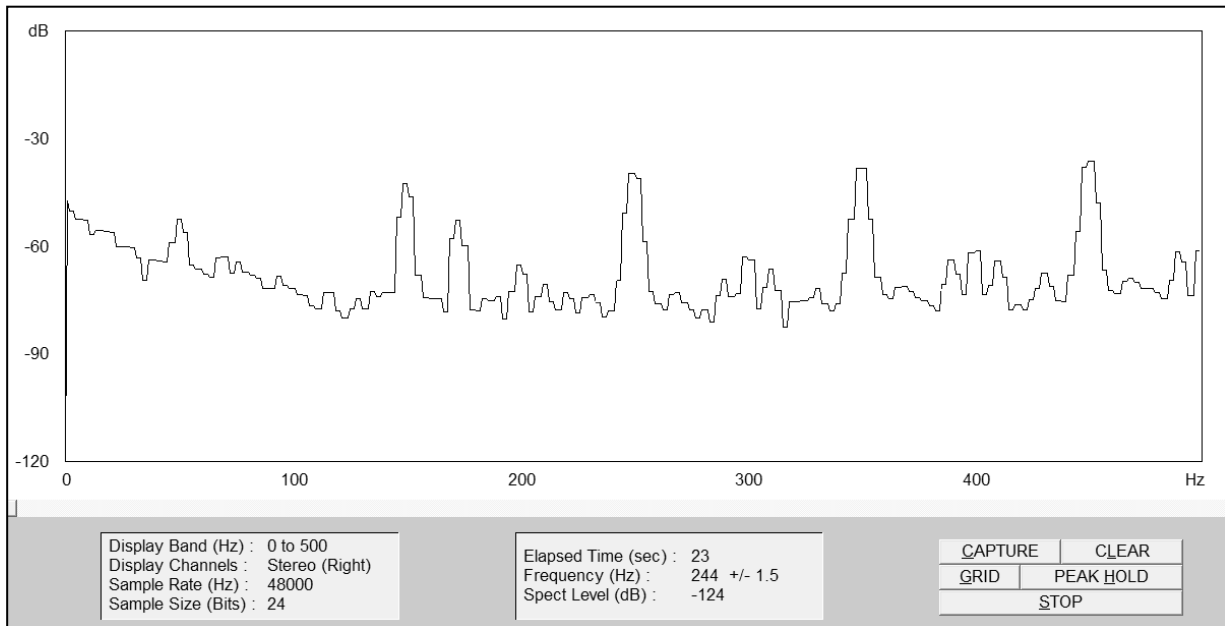
Враховуючи відмінності магнітних властивостей цих сталей (магнітних проникненостей) на фіксованих частотах є очевидним, що виявлене підсилення магнітного поля обумовлене саме власним магнітним полем екрану.

При цьому, існують відстані, на яких це явище відсутнє, що підтверджене численними експериментами.

У практичній діяльності з електромагнітної екології та електромагнітної безпеки довільне розташування екранів відносно джерел магнітних полів не завжди можливе через обмежені площі приміщень, розміри будівель тощо. Тому доцільним є визначення, принаймні, основних просторових критеріїв щодо раціоналізації (оптимізації) розміщення екранів відносно джерел

магнітних полів з врахуванням як розмірів джерел, так і розмірів екранів, за яких забезпечуються потрібні або прийнятні коефіцієнти екранування.

а).



б).

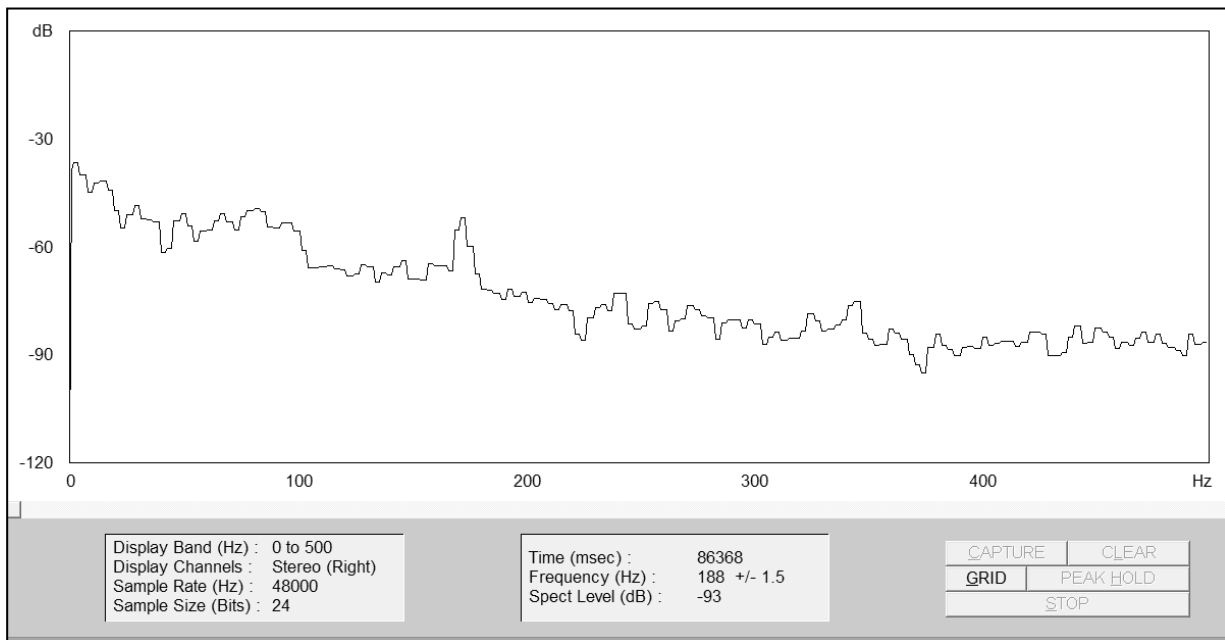


Рис. 1. Спектр магнітного поля джерела електроживлення
а – без використання електромагнітного екрану; б – за екраном

Розглянемо найпоширеніше джерело змінного магнітного поля – лінійний електричний струм промислової частоти, що потребує екранування.

Розподіл магнітного поля характеризується напруженостями та потенціалами. У комплексній формі рівняння Максвелла має вигляд (1):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = (\sigma + j\omega \epsilon_0 \epsilon) \vec{E} + \vec{j}^{\text{ext}} \quad (1)$$

де \dot{H} – комплексна амплітуда вектора напруженості магнітного поля; \dot{E} – комплексна амплітуда вектора напруженості електричного поля; J^{ext} – комплексна амплітуда вектора густини електроструму сторонніх джерел; σ – питома електропровідність; ε – відносна діелектрична проникність; ω – циклічна частота; ε_0 – діелектрична стала; j – комплексна одиниця.

Напруженість електричного поля \dot{E} та індукція магнітного \dot{B} поля зазвичай визначають через векторний магнітний потенціал \dot{A} та скалярний електричний потенціал φ (2, 3):

$$\dot{E} = -j\omega\dot{A} - \text{grad}\varphi \quad (2)$$

$$\dot{B} = \mu\mu_0\dot{H} = \text{rot}\dot{A} \quad (3)$$

де μ – відносна магнітна проникність; μ_0 – магнітна стала.

З умови нормування (4) [15]

$$\square \varphi = -\frac{\text{div}\dot{A}}{(\sigma - j\omega\varepsilon_0\varepsilon)\mu\mu_0},$$

тобто:

$$\dot{J} = (\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon)\dot{E} = (\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon) \cdot \left(-j\omega\dot{A} + \text{grad}\left(\frac{\text{div}\dot{A}}{(\sigma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon)\mu\mu_0}\right) \right) \quad (4)$$

Для визначення рівнів магнітних полів за екраном скористаємося ітераційним методом розв'язку наведених співвідношень [2]. Через громіздкість розрахунків приводити їх повністю недоцільно.

Розташування електромагнітного екрана відносно лінійного джерела магнітного поля наведено нижче (приклад на рис. 2).

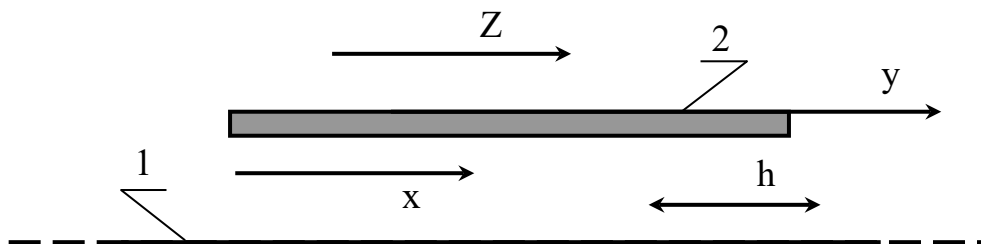


Рис. 2. Схема розташування екрана

1 – лінійний електрострум; 2 – електромагнітний екран, розташований у площині xu ; x – вісь Ox ; y – вісь Oy ; z – вісь Oz ; h – відстань від струмопроводу до екрана

При проведенні розрахунків були використані наступні початкові умови: довжина екрана уздовж лінійного електроструму $L_z = 2$ м, ширина $L_x = 4$ м, відстань від струмопроводу до екрана $0,2$ м, сила струму промислової частоти 50 Гц – 10 А, питома провідність екрана – $9 \cdot 10^7$ см/м (електротехнічна сталь), товщина екрана – $0,63$ мм.

Коефіцієнтом екранування K_e зазвичай вважається (5):

$$K_e = |B_0|/|B|, \quad (5)$$

де $|B_0|$ – модуль індукції магнітного поля без застосування екрана; $|B|$ – за екраном.

При цьому розглядається співвідношення напівдовжини екрана L_y та відстані до джерела поля h і на півширини екрана L_x до h . Результати розрахунку наведені на рис. 3.

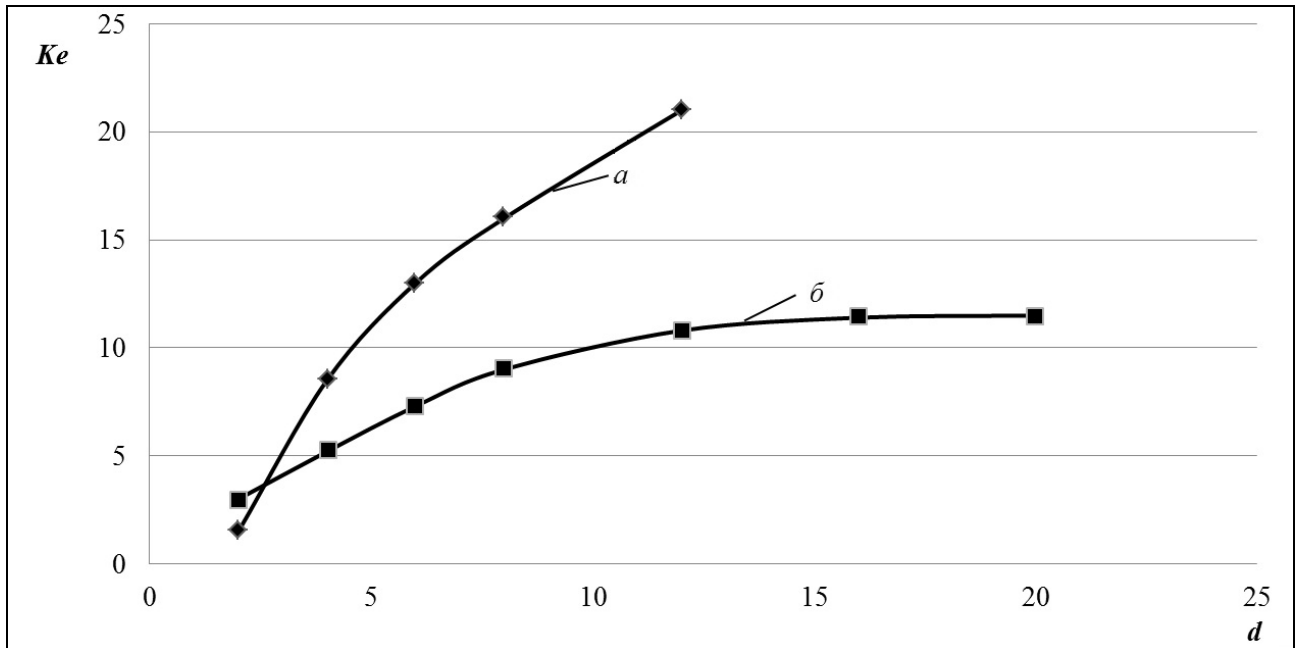


Рис. 3. Залежності захисних властивостей електромагнітного екрана від його розмірів:

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найбільш критичним параметром для підвищення ефективності екранування є довжина екрана уздовж лінійного джерела магнітного поля: збільшення довжини дозволяє підвищувати коефіцієнти екранування до необхідних значень. В той же час ширина екрана, починаючи із співвідношення напівширини екрана до відстані до джерела 12 – 14, стає некритичною і може бути зафіксованою у реальних умовах перед впровадженням заходів з електромагнітною безпеки.

Викликає інтерес визначення просторових критеріїв внеску власної намагніченості феромагнітного екрана у сумарне магнітне поле. Очевидно, що індукване магнітне поле буде майже пропорційне магнітній проникності матеріалу екрана, що впливає з фундаментальних фізичних принципів. У загальному випадку – це лінія первинного намагнічування у петлі гістерезису.

Зазвичай, сертифікати усіх магнітних матеріалів містять інформацію щодо форми петлі та кількісних значень залишкової намагніченості. Магнітні поля наднизьких частот є квазістаціонарними. Втім, розрахунки щодо

поширення власного магнітного поля феромагнітного екрана навіть з великою похибкою проблематичні. У загальному випадку відносну магнітну проникність не можна вважати постійною величиною навіть у межах одного екрана через різні магнітні впливи на його окремі зони з боку джерела.

Крім того, однорідне власне магнітне поле, наведене зовнішнім полем притаманне тільки тілам обертання еліпсоподібної форми. Розрахунки щодо поля суцільно циліндричного об'єкта мають вже приблизний характер і придатні виключно для орієнтовного визначення його впливу на електромагнітну обстановку.

Щодо плаского екрана кінцевих розмірів, то багатофакторність впливу на структуру поля за екраном (розміри екрана, відстані від джерела до екрана та від екрана до необхідної точки, магнітні та електричні властивості екрана тощо) роблять такі розрахунки малоперспективними.

$$\alpha - d = L_x / 2h ; \sigma - d = L_y / 2h$$

Експериментальні дослідження дозволяють дійти висновку, що для ефективного використання феромагнітних матеріалів у якості електромагнітних екранів наднизьких частот їх відносні магнітні проникності не повинні перевищувати значень 200–400, що притаманне більшості конструкційних сталей. При цьому коефіцієнти екранування зростають зі збільшенням електропровідності матеріалів. Для частот магнітного поля, більших за 500 Гц, зростання магнітної проникності екрана обумовлює значне підвищення його захисних властивостей.

На сьогоднішній день нез'ясованим і таким, що потребує проведення окремих ретельних досліджень, є визначення захисних властивостей електромагнітних екранів при наявності кількох струмонесучих джерел поля, що відповідає реальним умовам експлуатації промислових струмопроводів, причому за умови, що відстані між лінійними струмами та між струмами та екранами – є величинами одного порядку. Це саме стосується й варіацій форм захисних екранів у залежності від геометрії джерел електромагнітних полів, що є перспективним напрямом досліджень.

Висновки

1. Проведені дослідження свідчать, що для ефективного екранування наднизькочастотних магнітних полів лінійних джерел необхідно враховувати співвідношення відстаней від джерела поля до екрана та розмірів екрана. Найбільш критичним є розмір екрана, розташований паралельно джерелу поля.

2. Наведені аналітичні співвідношення доцільно використовувати для ітераційного методу розрахунку фактичних коефіцієнтів екранування.

Враховуючи великі обсяги обчислень доцільне розроблення відповідного прикладного програмного забезпечення.

3. Найбільш ефективними матеріалами для екранування магнітних полів наднизьких частот є феромагнітні сплави з відносними магнітними проникненостями у межах 200 – 400, що притаманне більшості конструкційних сталей. Коефіцієнти екранування монотонно зростають зі збільшенням питомої провідності (зниженням питомого опору) матеріалів.

Список літератури

1. Широкодиапазонные экраны СМД для систем защиты информации и защиты биологических объектов / [Лыньков Л.М., Богущ В.А., Борботько П.В. и др.]. Докл. НАН Беларуси, Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники, 2004, № 3. – С.152-167.
2. 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.
3. Розов В.Ю. Магнетизм космических аппаратов / В.Ю. Розов, А.В. Гетьман, С.В. Петров // Технічна електродинаміка. – 2010. – Тематичний випуск. Ч. 2. Проблеми сучасної електротехніки. – С. 144 – 147.
4. Гетьман А.В. О нормировании уровня магнитного поля с помощью мультипольных магнитных моментов / А.В. Гетьман // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. - № 5. – С. 7–10.
5. Панова О. В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис.... канд.. техн.. наук: 05.26.01/ Панова Олена Василівна. – К., 2014. – 152 с.
6. 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). <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:EN:PDF>.
7. 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.
8. Державні санітарні правила при роботі з джерелами електромагнітних полів: Д Сан Пін 3.3.6.096-2002. [Чинний від 2003-0104]. – К.: МОЗ України, – 2003. – 16 с. – (Державні санітарні норми України).
9. Резинкина М.М. Расчётный метод оценки эффективности средств защиты от действия магнитных полей / М.М. Резинкина // Вестник НТУ «ХПИ», 2005. – Вып. 49. – С. 46–52.

10. Аполлонский С.М. Построение моделирующих устройств для исследования внешних электрических полей источников / С.М. Аполлонский, И.Д. Логинова // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 2009. – № 1. – С. 104-110.

11. Пат. Україна, МПК G12B17/02. Фартух електрозварника / Лобанов Л.М., Левченко О.Г., Левчук В.К. та ін.; заявник і патентоотримувач ІЕЗ ім. Є.О. Патона; заявл.18.03.1010; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10.

12. 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.

13. Островский О.С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О.С. Островский, Е.Н. Оддаренко, А.А. Шматько // Физическая инженерия поверхности. – 2003.- Т. 1. - № 2. – С. 161–173.

14. Глыва В.А. Исследование геометрических критериев электромагнитных экранов / В. . Глыва, Е.В. Панова // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. №1 (19), 2014. – С. 10–17.

15. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А.Самарский. – М.: Наука, 1997. – 736 с.

к.э.н., доцент Левченко Л.А., Колумбет В.П.,
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Багрий М.М., Национальный авиационный университет, г. Киев

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ

Для эффективной защиты работающих от воздействия электромагнитных полей используют экранирование. Однако в нормативных документах не указаны условия использования электромагнитных экранов, которые зависят от характеристик поля и конфигураций экранов. В статье рассмотрено применение электромагнитных экранов как метод снижения уровней магнитных полей сверхнизких и низких частот. Предоставлены соотношения расстояний от источника поля к экрану и размеры экрана. Было определено, что наиболее критичным параметром для повышения эффективности экранирования является длина экрана вдоль линейного источника магнитного поля: увеличение длины позволяет повышать коэффициенты экранирования до требуемых значений. В то же время ширина экрана, начиная с соотношения полуширины экрана к

расстоянию до источника 12-14 становится некритичным и может быть зафиксированной в реальных условиях перед внедрением мероприятий по электромагнитной безопасности. В качестве наиболее эффективных материалов для экранирования магнитных полей сверхнизких и низких частот определены ферромагнитные сплавы с относительными магнитными проницаемостями в пределах 200-400.

Ключевые слова: экранирование; магнитное поле; электромагнитный экран; защитные свойства; сверхнизкие частоты; низкие частоты.

PhD of economic of Economic Sciences, Levchenko L.,
Senior Lecturer, Columbet V.,
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Leading specialist, Bahrii M.,
National Aviation University

GRAPHICAL ANALYTICAL METHOD OF OPTIMIZATION GEOMETRICAL PARAMETERS ELECTROMAGNETIC SCREENS

Shielding is using for effective protection workers from the effects of electromagnetic fields. But, regulatory documents do not specify the conditions for the use of electromagnetic shields, which depend on field characteristics and screen configurations. This article discusses the use of electromagnetic screens as a method of reducing the levels of magnetic fields of ultra-low and low frequencies. Ratios of the distance from the field source to the screen and the screen size were provided. It was determined that the most critical parameter for increasing screening efficiency is the screen length along a linear source of magnetic field: an increase in length allows the screening coefficients to be increased to the required values. At the same time, the width of the screen, starting with the ratio of the half width of the screen to the distance to the source 12-14, becomes uncritical and can be fixed in real conditions before introducing electromagnetic safety measures. As the most effective material for shielding magnetic fields ultralow and low frequencies were defined ferromagnetic alloys with relative magnetics conduction within 200-400.

Keywords: shielding; a magnetic field; electromagnetic screen; protective properties; ultralow frequencies; low frequencies.