

УДК 538.69:331.45

к.т.н., доцент Панова О.В.,
доцент Азнаурян І.О., Кандур М.П.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ЗАСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКРАНУВАННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ НАДНИЗЬКИХ ЧАСТОТ

Розглянуто підходи до екранування магнітних полів наднизької частоти з урахуванням змінності у часі і просторі переважного напрямку магнітного поля. Визначено, що найбільш ефективними є тришарові екрани. Ефективність досягається використанням у якості внутрішнього шару феритів та магнітом'яких аморфних сплавів. Необхідні коефіцієнти екранування прогнозуються виходячи із співвідношення електрофізичних характеристик внутрішнього і зовнішніх шарів.

Показано, що в умовах набуття чинності європейських нормативів з електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання при організації екранування слід враховувати як проблему захисту людей, так і забезпечення стабільності роботи обладнання і надійності функціонування бездротового зв'язку.

Ключові слова. Коефіцієнт екранування; електромагнітний екран; поляризація; електротехнічна сталь; ферит.

Вступ

Не дивлячись на значну увагу, що приділяється захисту працюючих від впливу електромагнітних полів низьких частот, у цій галузі є низка невирішених задач. Особливо це стосується наднизькочастотних магнітних полів промислової частоти та їх гармонік. Труднощі, пов'язані з таким захистом, полягають у надвеликій довжині хвилі таких полів. Тобто, з точки зору поширення їх можна вважати квазістаціонарними. Це обумовлює неможливість використання незамкнених магнітних екранів малих площ. Крім того, намагніченість феромагнітних екранів у таких полях в багатьох випадках не знижує, а підвищує напруженості полів у зонах захисту, що потребує розроблення геометричних критеріїв їх конфігурацій та розташування відносно джерела поля.

Стан проблеми.

Найпростішим і ефективним методом екранування низькочастотних електромагнітних полів є оточення їх джерел суцільними феромагнітними

оболонками (так звана електрогерметизація) [1,2]. Але у реальних умовах експлуатації технічних засобів це не завжди можливо через необхідність постійного доступу до них, або великі лінійні розміри.

У попередньому дослідженні [3] визначені критерії щодо розташування екрана відносно джерела поля і розраховані зони «тіні» та «напівтіні» у залежності від його частоти та розмірів екрана. Але при цьому джерело поля вважалось «точковим» об'єктом, тобто незначних розмірів відносно відстані до екрана. Робота [4] присвячена визначенню співвідношень ширини та довжини магнітного екрана та його відстані від джерела поля з точки зору ефективності екранування, тобто забезпечення максимального коефіцієнта екранування за прийнятних геометричних характеристик магнітного екрана. Ця розробка стосується протяжних джерел поля. Актуальною задачею сьогодення є забезпечення прийнятних коефіцієнтів екранування локальних, але великих за розмірами і потужностями електричних технічних засобів. Це – потужний електропривод, розподільчі щити, трансформатори тощо. На особливу увагу заслуговують магнітні поля вбудованих трансформаторів. Навіть сучасні будівельні норми дозволяють використання вбудованих трансформаторів сухого типу [5]. Захист від магнітних полів трансформаторів розглянуто у роботах [6, 7]. Не дивлячись на ґрунтовність досліджень та прийнятну ефективність прогнозованого захисту, деякі аспекти методологічного та технічного характеру викликають сумніви. У першу чергу це використання об'ємної каркасної феромагнітної решітки у якості понадмежного хвилеводу, що на промисловій частоті та її гармоніках принципово неможливе. Крім того, пропонована конструкція занадто громіздка, що не виправдовує зміну поляризації поля. Втім, врахування поляризації у даному випадку є слухним і заслуговує подальших досліджень.

Мета статті

Дослідити умови та розробити загальні засади екранування магнітних полів наднизькочастотної області електромагнітного спектра.

Особливостями формування електромагнітної обстановки у сучасних виробничих приміщеннях, крім досить широкого частотного спектра, є зміна характеру наднизькочастотних електромагнітних полів. Таких змін, в основному, дві: поява майже непередбачуваної кількості гармонік та інтергармонік магнітного поля промислової частоти і постійно змінювана спрямованість максимальної напруженості (індукції) магнітного поля. Якщо першій тенденції приділяється досить багато уваги, наприклад [8], то друга - залишається майже поза увагою.

Але таке явище дуже важливе при розробленні заходів з електромагнітної безпеки, особливо з використанням екранування магнітних полів. Причиною постійної зміни переважної спрямованості магнітного поля є зсув фаз електрострумів у трифазних мережах електроживлення. У таких умовах магнітне поле є обертовим, еліптично поляризованим, тобто вектор напруженості (індукції) магнітного поля у кожній точці змінюється у просторі і часі за законом еліпса, маючи максимуми і мінімуми. Цей факт добре відомий електротехнікам.

В той же час, при визначенні ефективності електромагнітного екрана електромагнітні хвилі зазвичай вважають плоскими, а їх поляризацію при відбиванні та заломленні – лінійною. У реальних умовах принаймні для низькочастотних полів, поляризація еліптична. Фактично ми маємо обертові електромагнітні поля, що неоднозначно впливає на ефективності екранів. Сумарне магнітне поле повинне розраховуватися зі співвідношення:

$$B = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [B_x^2(t) + B_y^2(t) + B_z^2(t)] dt} =$$
$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [B_x^2(t)] dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [B_y^2(t)] dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [B_z^2(t)] dt}$$
$$H = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [H_x^2(t) + H_y^2(t) + H_z^2(t)] \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [H_x^2(t)] \cdot dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [H_y^2(t)] \cdot dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [H_z^2(t)] \cdot dt}$$

Практично уся ефективність екранування у низькочастотній області досягається за рахунок поглинання електромагнітної енергії (відбиття електромагнітних хвиль довжиною навіть кілька десятків метрів не варто розглядати). Тому, магнітні екрани для цих частот (принаймні їх складові) – феромагнітні. Поглинання енергії магнітного поля досягається за рахунок вихрового ефекту та гістерезисного перемагнічування. Енергія вихрових струмів витрачається на нагрівання. Втрата енергії екранованого поля за рахунок вихрових ефектів залежить від електричної провідності та відносної магнітної проникності металу екрана. Збільшення провідності і магнітної проникності металу призводить до збільшення втрат на вихрові струми, що й забезпечує бажаний ефект. Слід враховувати, що поглинання енергії полів гармонік металом екрана збільшується пропорційно номеру гармоніки [9]. Але в умовах еліптичної поляризації поля наведений вихровий електрострум може протікати як уздовж екрана, так і у впоперек. Очевидно, що у останньому

випадку незначна товщина екрана обумовлює малий струм і мале поглинання енергії. Це меншою мірою стосується втрат на гістерезис, але теж суттєве.

У таких умовах найбільш ефективними екранами є екрани, що складаються з двох, або більше шарів, що забезпечує зміну поляризації поля на лінійну і підвищує гістерезисні втрати енергії. Можна не враховувати співвідношення глибини проникнення поля та товщини екрана. Не вдаючись у фізичні механізми процесів, можна сказати, що ефективність екранування з мінімальним відбиттям електромагнітної енергії від поверхні екрана зростає за певних співвідношень електрофізичних характеристик вільного простору матеріалу екрана та окремих його шарів. Найбільший коефіцієнт екранування досягається за хвильового опору екрана, який дорівнює хвильовому опору вільного простору (377 Ом):

$$Z_{ex} = \frac{Z_1 - jZ_2 \cdot \operatorname{tg}(k_2 d)}{Z_2 - jZ_1 \cdot \operatorname{tg}(k_2 d)} Z_2,$$

де, Z_1 – хвильовий опір металевій компоненти, Z_2 – хвильовий опір неметалевій компоненти, k – хвильове число, d – товщина екрана.

Найкраще поглинання досягається варіаціями непровідної компоненти Z_2 :

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

Найкращим основним матеріалом для таких екранів є магнітом'які електротехнічні сталі, властивості яких було розглянуто у [9].

Міжшаровим наповнювачем доцільно обрати ферити будь-якої дисперсності. Така доцільність обумовлюється невеликою вартістю феритів і наявністю широкої їх промислової номенклатури з різними частотними характеристиками (ферорезонансний ефект).

Дослідження показали, що для магнітних полів з напруженостями, характерними для переважної більшості обладнання, величина такого зазору металевими шарами може не перевищувати 0,5 см.

Більш ефективним є тришаровий електромагнітний екран, у якому у якості другого шару використовується аморфний магнітом'який сплав. Ефективність такого екрана обумовлюється надвисокою магнітною проникністю аморфного сплаву за низької, відносно електротехнічної сталі, провідності. Спосіб зшивання шарів такого екрана, тобто якість електричного контакту, принципового значення не мають. Недоліком такого екрана є велика вартість аморфних магнітом'яких сплавів. Тому такі екрани доцільно

використовувати в умовах невеликих розмірів джерел магнітного поля та для вирішення задач електромагнітної сумісності технічних засобів.

Для захисту від магнітних полів великих електрострумів критичним стає зазор між шарами екрана. Але у будь-якому випадку він не перевищує кількох сантиметрів.

Дослідження показали, що наявність внутрішнього шару з електрофізичними характеристиками, які значно відрізняються від характеристик інших двох шарів, забезпечує ефективне поглинання гармонік усіх порядків.

Пропоновані конструкції екранів доцільно використовувати в умовах обмежених площ, тобто при неможливості обрати найбільш прийнятне з точки зору електромагнітної безпеки місце розташування екрана.

Наявні дані свідчать, що у випадках, коли генеровані поля мають досить широкий спектр (до радіодіапазону) і є технічна можливість забезпечити перебування людей поза зонами впливу намагніченості екрана за рахунок наведеного поля, достатнім є двошаровий екран, виготовлений з електротехнічної сталі, з зазором між шарами 0,5-1,0 см. Такі поля притаманні усім колекторним електричним машинам великої потужності.

Враховуючи подібність просторових поширень магнітних полів електротехнічного обладнання різного за потужністю, але однаковою за конструкцією [10], доцільним є розроблення типових конструкцій магнітних екранів для обладнання різних класів. Це потребує створення бази даних щодо вихідних даних для раціоналізації ефективності екранування.

При забезпеченні екранування магнітних полів, що розглядаються слід враховувати два принципових моменти.

Перший: з 01.01.2016 року в Україні методом підтвердження вводяться загально європейські стандарти з електромагнітної сумісності технічних засобів, що накладає деякі додаткові вимоги та обмеження на застосування екранування (наприклад, вплив магнітного поля в умовах обмеженого простору чи об'єкта). Це фактично – обмеження використання електрогерметизації, що є дуже критичним для стабільності функціонування технічних засобів великої вартості і важливими за призначенням [11].

Другий: в Україні підвищується гранично допустимі рівні випромінювань частот мобільного зв'язку з 2,5 мкВт/см² (або 3 В/м), до 10 мкВт/см² (або 6 В/м), які відповідають європейським нормам.

Таким чином, необхідно одночасно вирішувати задачі електромагнітного захисту, електромагнітної сумісності та потреб зв'язку. Останнє, до того ж обумовлюється широким використанням засобів бездротового зв'язку у середині приміщень. Частково врахування задач

електромагнітної сумісності обладнання було враховано у попередній роботі [12]. Виходячи з цього, необхідно зберігати мінімальні вимоги, щодо забезпечення стабільної роботи бездротового зв'язку та впливу зовнішніх і внутрішніх джерел електромагнітних полів на нестабільну роботу обладнання.

На нашу думку, ефективним підходом до забезпечення захисту від впливу електромагнітних полів низьких частот є попереднє моделювання їх поширення навколо джерела конкретного типу. Так, у роботі [13] стверджується, що у навколо чотириполюсних електричних машин існують зони мінімального магнітного поля, що частково спрощує розв'язання задачі екранування. Особливістю таких машин є наявність колекторного вузла, який є джерелом високочастотних полів. Тобто у даному випадку, необхідно одночасне екранування полів широкого спектра. У цьому випадку ефективним є саме шаровий екран.

Висновки

1. При розробленні та впровадженні організаційно-технічних засобів із захисту працюючих від впливу від електромагнітних полів наднизької частоти слід враховувати їх еліптичну поляризацію.

2. Ефективність захисту багат шаровими магнітними екранами обумовлена перетворенням поля в шарах у лінійне поляризоване.

3. Внутрішній шар екрана повинен відрізнятися від зовнішніх електрофізичними властивостями. Співвідношення магнітної та електричної проникностей обирається в залежності від задач та потрібної ефективності екранування.

4. Для екранів великих площ у якості внутрішнього шару доцільно використовувати ферити потрібних частотних характеристик. А для екранів малих площ – магнітом'які аморфні сплави.

5. Розв'язання задач електромагнітного екранування необхідно розробити з урахуванням набуття чинності в Україні загальноєвропейських стандартів з електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання.

Перспективним уявляється створення бази даних з переліком матеріалів їх товщин та електрофізичних властивостей і співвідношеннями між ними для отримання необхідного коефіцієнта екранування магнітного поля визначеної напруженості.

Література

1. Кечиев Л.Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л.Н. Кечиев, Б.Б. Акбашев, П.В. Степанов. – М.: ООО «Группа ИТД», 2010. – 470с.

2. Демский Д.В. Автоматизация расчёта эффективности экранирования / Д.В. Демский, И.А. Фомина, М.В. Марченко // Технологии ЭМС. М.: – 2013, № 1, С. 44-54.
3. Панова Е.В. Исследование геометрических критериев электромагнитных экранов / Е.В. Панова // Технологии техносферной безопасности: Муром. - 2014.– Вып. № 1 (53). – 12 с. – Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/>
4. Глыва В.А. Условия использования экранирования низкочастотных магнитных полей / В.А. Глыва, Т.Н. Перелёт // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика», 17-18 вересня 2015. – Херсон, 2015. – С.81-85.
5. Проективання висотних житлових і громадських будинків ДБН В.2.2. – 24: 2009 – [Чинний від 01-10-09]. – К.: Мінрегіонбуд, 2009. – 103с. (Державні будівельні норми України).
6. Многослойный электромагнитный экран для защиты среды обитания от электромагнитного воздействия / Ю.Г. Рябов, И.Б. Гуров, Г.В. Ломаев и др. // Энергобезопасность и энергосбережение. – М.: 2011. - №1. - С. 3-7.
7. Рябов Ю.Г. Экранирование встроенных трансформаторных подстанций / Ю.Г. Рябов, Г.Б. Гуров // Технологии ЭМС. М.: – 2014. - №3. - С. 21-28.
8. Перельот П.М. Гармоніки Електричних струмів промислової частоти та їх вплив на електромагнітну обстановку у приміщеннях / Т.Н. Перельот // Гігієна населених місць. К.:– 2014. – Вип. 64. – С.192-198.
9. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд.техн.наук: 05.26.01 / Панова Олена Василівна – К., 2014. – 151 с.
10. Здановський В.Г. Дослідження рівнів магнітних полів енергетичних об'єктів / В.Г. Здановський, В.А. Глива, Х.В. Паньків // Проблеми охорони праці України. К.:– 2013. – Вип. 25. – С. 22-29.
11. Розов В.Ю. Магнетизм космических аппаратов / В.Ю. Розов, А.Ю. Гетьман, С.Ю. Петров // Технічна електродинаміка. – 2010. – Тематичний випуск. Ч.2. Проблеми сучасної електротехніки. К.:– С.144-147.
12. Панова О.В. Екранування електромагнітних полів та забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання / О.В. Панова // Управління розвитком складних систем. К.: – 2015. – Вип. 22. – 8 с.
13. Глива В.А. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання / В.А. Глива, Л.О. Левченко, Х.В. Паньків // Управління розвитком складних систем. К.: – 2014. Вип. 20. – С. 174-179.

Аннотация.

В статье рассмотрены подходы к экранированию магнитных полей сверхвысокой частоты с учетом изменения во времени и пространстве преобладающего направления магнитного поля. Определено, что наиболее эффективными являются трехслойные экраны. Эффективность достигается использованием в качестве внутреннего слоя ферритов и магнитомягких аморфных сплавов. Необходимые коэффициенты экранирования прогнозируются исходя из соотношения электрофизических характеристик внутреннего и внешних слоев.

Показано, что в условиях вступления в силу европейских нормативов по электромагнитной безопасности и электромагнитной совместимости электрического и электронного оборудования при организации экранирование

следует учитывать, как проблему защиты людей, так и обеспечения стабильности работы оборудования и надежности функционирования беспроводной связи.

Рассмотрены перспективные направления разработки электромагнитных экранов, создания защитных поверхностей с учетом широкого спектра электромагнитных полей различных амплитуд, генерируемым современным оборудованием. Для упрощения проектирования экранов целесообразно предварительное моделирование пространственных распространений полей вокруг технических средств конкретного типа.

Ключевые слова. Коэффициент экранирования; электромагнитный экран; поляризация; электротехническая сталь; феррит.

Annotation.

The article discusses approaches to screening magnetic fields of ultrahigh frequency taking into account changes in time and space of the prevailing direction of the magnetic field. It was determined that the most effective are the three layer screens. The efficiency is achieved by using as an inner layer of ferrites and soft magnetic amorphous alloys. Necessary screening rates are predicted based on the ratio of electro physical characteristics of the inner and outer layers.

It is shown that in the conditions of European standards for electromagnetic safety and electromagnetic compatibility of electrical and electronic equipment in organizing the screening should be considered as an issue of protecting people and ensure the stability of the equipment and the reliability of the wireless communication.

Promising areas of development for the electromagnetic screens, by creating protective surfaces based on a wide spectrum of different amplitudes of electromagnetic fields, generated by modern equipment are considered. To simplify the design of screens, preliminary modeling of the spatial distribution of fields around a particular type of hardware is expedient.

Keywords. Factor screening; electromagnetic screen; polarization; electrical steel; ferrite.