

Л. О. Левченко¹, М. М. Багрій²

¹Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Національний авіаційний університет, Київ, Україна

МЕТОДИ ПОПЕРЕДНЬОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ

Предметом даного дослідження є процеси формування електромагнітної обстановки у виробничому середовищі в умовах впливу на неї джерел електромагнітних полів різних амплітудно-частотних характеристик. **Мета роботи** – розроблення методологічного підходу до попереднього оцінювання електромагнітної обстановки у приміщеннях різного призначення у залежності від типу та характеристик технологічного обладнання, параметрів електричних мереж та впровадження відповідних організаційно-технічних заходів захисту людей. Завданням дослідження є аналіз математичних методів розрахунку рівнів електромагнітних полів у залежності від поставлених задач та характеристик електромагнітних полів. **Використано** аналітичний метод оцінювання адекватності математичних функцій умовам формування електромагнітної обстановки. У роботі показано, що розрахункові та експериментальні методи не можуть бути використані окремо. Це пояснюється обов'язковою присутністю припущень та спрощень при моделюванні поширення електромагнітного поля навколо джерела та наявністю великих обсягів експериментальних даних за їх окремого використання. Зазначено, що більшість розроблених засобів оцінювання електромагнітної обстановки стосуються одного джерела поля або групи однотипних джерел, що не відповідає сучасним вимогам. **Надано** прикладний розрахунковий апарат для оцінювання зниження високочастотного електромагнітного поля неоднорідними (перфорованими) екрануючими поверхнями. Показано необхідність попереднього експериментального визначення електрофізичних властивостей використаних матеріалів для двокомпонентних захисних матеріалів. Зроблено **висновок**, що крім аналітичного оцінювання електромагнітної обстановки традиційними методами доцільним є розроблення програмно-технічного комплексу з моделювання поширення електромагнітного поля від джерела. Таке програмне забезпечення має враховувати геометричні характеристики приміщень та відбивні характеристики обмежуючих поверхонь.

Ключові слова: електромагнітне поле, електромагнітне навантаження, екранування, захисні властивості, шум.

Вступ

Сучасні виробничі приміщення у багатьох випадках мають складну електромагнітну обстановку. Це обумовлено використанням у технологічних процесах електричного та електронного обладнання з різними амплітудно-частотними характеристиками генерованих електричних, магнітних та електромагнітних полів. При цьому у багатьох випадках електромагнітне навантаження на виробниче середовище підвищується за рахунок зовнішніх впливів – засобів мобільного зв'язку, ліній електропередачі, пристроїв розподілу електроенергії, електричного транспорту тощо. Це потребує розроблення та впровадження відповідних засобів захисту людей.

Найбільш ефективним з них є електромагнітні екрани. Але сучасні матеріали для екранування магнітних та електромагнітних полів мають велику вартість через складність технологій виготовлення, вартість компонентів. Тому, для раціоналізації організаційно-технічних заходів зі зниження впливу електромагнітних полів на людей необхідне попереднє оцінювання електромагнітної обстановки, що надасть змогу проектувати електромагнітні екрани на принципах розумної достатності захисних властивостей.

Стан питання. Проблематиці оцінювання потрібної ефективності матеріалів для зниження рівнів магнітних та електромагнітних полів приділяється багато уваги. Але у багатьох випадках розрахунковий апарат занадто складний для прикладного використання [1]. При цьому у більшості випадків дослідження стосується якогось одного джерела чи групи однотипних джерел [2, 3]. Це стосується навіть робіт з оптимізації електромагнітного навантаження на

середовище без втрати функціональних можливостей обладнання [4].

Ефективним засобом визначення потрібної ефективності засобів захисту є моделювання просторових розподілів електромагнітних полів навколо джерел [5, 6]. Досвід практичної роботи свідчить, що адекватність отриманих моделей не завжди задовільна. Це стосується навіть досліджень, у яких аналітичні методи поєднуються з експериментальними [7]. Для отримання чітких критеріїв достатності ефективності захисних матеріалів потрібні великі обсяги експериментальних робіт [8], що не завжди виправдане з економічних міркувань та часових витрат. Тому доцільно розглянути можливості розроблення прийнятних для використання фахівцями-практиками методів оцінювання електромагнітної обстановки у виробничому середовищі та надати рекомендації щодо їх застосування.

Метою статті є розроблення методологічного підходу до попередньої оцінки електромагнітної обстановки у приміщеннях різного призначення залежно від типу і характеристик використовуваного обладнання, параметрів електромережі та впроваджених організаційно-технічних заходів із захисту людей.

Результати досліджень

Методики оцінки рівнів відповідних фізичних факторів умовно можна розділити на розрахунково-теоретичні та експериментальні. При цьому, як показує досвід, кожна з них не може бути використана у повному обсязі. Тобто, для виконання розрахунків необхідна наявність базових експериментальних даних (або припущень), а експериментальні дослідження потребують використання відповідного

математичного апарата для оброблення отриманих результатів та прогнозування змін обстановки залежно від часових та просторових факторів.

Особливістю задачі оцінки та прогнозування електромагнітної обстановки є різноманітність технічних засобів, які є джерелами полів, широкий спектр частот та різні їх прояви (наявність ближньої і хвильової зон) що особливо важливе для оцінки рівнів полів у обмежених просторах (приміщеннях).

На сьогодні досить добре розроблені електродинамічні моделі випромінювальних властивостей засобів радіозв'язку, радіомовлення та телебачення, лінійних джерел низькочастотних електромагнітних полів. Проте, електродинамічне моделювання побутової та офісної техніки залишається не вирішеним на задовільному рівні. Не існує загальної концепції розрахункового прогнозування електромагнітної обстановки, яка б враховувала усю різноманітність наявних у приміщеннях джерел, а також специфіку їх просторової та часової локалізації.

Розрахунки квазістационарних полів від лінійних джерел, а також Г-подібних та Г-подібних розгалужень не викликають труднощів. Значно складніше отримати достовірні результати щодо джерел, локалізованих у просторі (електрогенератори, трансформатори тощо), особливо в умовах обмежених просторів. Методологічні підходи до використання неоднорідних екранів для захисту від шуму та електромагнітного випромінювання однакові і побудовані на дифракційних явищах. Різниця полягає у різній довжині падаючої хвилі. До визначеної частоти хвилі будь-який отвір (хвилевод) знижує (до певної міри) інтенсивність хвилі (частоти зрізу). Для електромагнітного випромінювання ця частота складає [11]:

– для круглого отвору:

$$f_{ПК} = 1,75 \cdot 10^5 / D, \text{ МГц}; \quad (1)$$

– для прямокутного отвору

$$f_{ПК} = 1,5 \cdot 10^5 / a, \text{ МГц}; \quad (2)$$

де D – діаметр, а a – довжина прямокутного отвору.

Ефективність екранування для частот, нижчих за наведені, складає:

– для круглого отвору

$$A_{ПК} = 32 \cdot d / D; \quad (3)$$

– для прямокутного отвору

$$A_{ПК} = 27,3 \cdot d / a, \quad (4)$$

де d – товщина екрана.

Тобто, підвищити коефіцієнти поглинання можна за рахунок не просто збільшення товщини, а виготовлення отворів у вигляді хвилеводів.

Для екранування електромагнітних випромінювань більш низьких частот, для яких неможливо використовувати дифракційний ефект, використовують суцільні електромагнітні екрани. Для розрахунку коефіцієнтів екранування як загального, так внаслідок відбиття, доцільно взяти за основу фундаментальне співвідношення електродинаміки суцільних середовищ. Так, коефіцієнт ослаблення електромагнітної хвилі K_e (за потужністю) визначаються так:

$$K_e = \frac{(n+1)+\chi^2}{4n} \exp \frac{z\chi \cos \alpha}{c}; \quad (5)$$

Коефіцієнт відбивання K_B у випадку нормально падаючої хвилі визначається як:

$$K_B = \frac{(n-1)^2 + \chi^2}{((n+1)^2 + \chi^2)}, \quad (6)$$

де n – коефіцієнт заломлення матеріалу; χ – товщина зразка; ω – циклічна частота випромінювання; χ – коефіцієнт екстинкції матеріалу, який визначає швидкість затухання хвилі; z – імпеданс матеріалу.

Коефіцієнти n , χ і z легко визначаються зі співвідношень дійсної і уявної частин комплексної діелектричної проникності матеріалу та електрофізичних властивостей матеріалу:

$$\chi = \sqrt{\frac{\epsilon_1 + \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}} \quad \text{або} \quad \chi = \sqrt{\frac{\epsilon_1 - \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}}{2}} \quad (7)$$

де: ϵ_1 та ϵ_2 – дійсна та уявна частини комплексної діелектричної проникності $\epsilon = \mu + j \cdot 4\pi\sigma/\omega$.

$$Z = \sqrt{j\mu\omega / (\sigma + j\mu\omega)}, \quad (8)$$

де σ – питома проникність матеріалу; μ – відносна магнітна проникність матеріалу; ϵ – діелектрична проникність матеріалу. Зазвичай, джерелами електромагнітних випромінювань є випромінювальні контури. Середня інтенсивність випромінювань контуру зі струмом I_{cp} розраховується так:

$$I_{cp} = \frac{S_0^2 \omega^4 t_0^2}{12\pi\epsilon_0 c^5} \left| \frac{S^2 t^2}{12\pi\epsilon_0 c} \right| \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right), \quad (11)$$

де S – площа контура; λ – довжина хвилі; J_0 – амплітуда струму $J = J_0 \sin \omega t$. При цьому кутовий розподіл випромінювання від лінійного сегмента контуру, усередненого за часом, визначається так

$$\frac{dI}{d\Omega} = \frac{j_0^2}{8\pi^2 \epsilon_0 c} \begin{cases} \sin^2((n\pi/2) \cdot \cos \Theta) / \sin^2 \Theta, & n - \text{парне}; \\ \cos^2((n\pi/2) \cdot \cos \Theta) / \sin^2 \Theta, & n - \text{непарне}, \end{cases}$$

де Ω – тілесний кут; Θ – кут між лінійним сегментом і напрямком до точки спостережень.

Недоліком методу є те, що для отримання чисельних результатів необхідне визначення чисельних значень магнітного та електричного моментів диполів, густин електрострумів тощо.

Виходячи з цього, найбільш доцільним методом оцінки електромагнітної обстановки у приміщеннях з багатьма однотипними джерелами є визначення параметрів одного з приладів і екстраполяція відповідних функцій. При цьому амплітудні значення відповідних полів є функціями відстаней і не потребують відомостей про інші параметри обладнання. Аналогічний підхід може бути використано для оцінки рівнів шуму, генерованого сукупністю технічних засобів, розташованих у приміщенні. При цьому можна використовувати як результати сертифікаційних випробувань обладнання, такі вимірювання, виконані для окремих приладів в лабораторних умовах, або у обстежуваному приміщенні за умови, що решту обладнання вимкнено. Припущення, використані при

розрахунках акустики приміщень – дифузне поле у приміщенні ізотопне та однорідне за умови, що у приміщенні відсутні фокусуєчі елементи, розмір приміщення більший за середню довжину хвилі, поглинальна здатність поверхонь не дуже велика – слухні і доцільні та не впливають на достовірність результату.

Розрахунки можливих рівнів електромагнітних полів та шуму у приміщеннях дозволяють провести попередню оцінку умов перебування людей за наявності визначеної кількості технічних засобів і прогнозувати зміну обстановки при збільшенні їх кількості. Важливим засобом зниження рівнів цих фізичних факторів, причому таким, що піддається попередній оцінці, є екранування та ослаблення полів оздоблювальними і спеціально призначеними для цього матеріалами. Фізичні механізми ослаблення електромагнітних та акустичних полів мають як принципові відмінності, так і спільні риси. Електромагнітні поля низької частоти можуть ослаблюватися або взагалі екрануватися провідними магнітом'якими матеріалами за рахунок генерації зустрічного поля, що впливає з фундаментальних фізичних принципів. Магнітні властивості феромагнітних матеріалів відомі, тому прогнозування ступеня екранування поля цілком можливе. Крім того, для зниження рівнів електромагнітних полів біля окремого приладу можливе використання явища дзеркального відбиття відносно провідної поверхні.

Таким чином, можливе попереднє планування організаційно-технічних заходів зі зниження рівнів електромагнітних полів як на окремих робочих місцях, так і у робочих та побутових приміщеннях.

Використання сучасних екрануючих матеріалів, таких як відпалені пермалой з високим вмістом нікелю (до 80 %) та магнітом'яких аморфних сплавів різного складу дозволяють послаблювати низькочастотні поля у 50 – 100 разів. Щодо високо- частотних полів, то їх екранування можливе за використання будь-якого провідного матеріалу. При цьому слід враховувати наявність вторинних полів (внаслідок відбиття від провідної поверхні), що буде розглянуто далі. Зменшення шумового навантаження у приміщеннях досягається за рахунок послаблення шуму окремих технічних засобів та зниження рівнів дифузного звукового поля. Зниження рівнів дифузного звукового поля досягається облицюванням стін, стелі та підлоги шумопоглинальними матеріалами із заздалегідь відомими коефіцієнтами поглинання. Максимальні ефекти досягаються у разі використання перфорованих поверхонь та клинових конструкцій. Ефекти поглинання обумовлені дифракційними явищами в отворах та відбиттям хвиль від боків клиноподібних поверхонь. При цьому частотні смуги поглинання обумовлюються розмірами отворів та величинами кутів клинів. Аналогічні конструкції використовуються для поглинання електромагнітних випромінювань. Пірамідальні або клиноподібні поглинальні елементи з малими кутами при вершинах (18° – 20°)

мають досить широкий діапазон (0,03 – 40 ГГц) та високу ефективність поглинання (10 – 40дБ). Це надає можливість використання відповідних покриттів для одночасного поглинання електромагнітних та звукових хвиль. Частотні смуги поглинання визначаються швидкостями їх поширення у просторі. Так, наприклад, покриття однакових геометричних характеристик можуть одночасно поглинати електромагнітні випромінювання частотою 900 Гц та звукові хвилі частотою 1 кГц, електромагнітні частотою 2,4 ГГц – звукові частотою 2,7 кГц тощо. Розширення частотного діапазону одночасної дії захисних екранів можливе за умови використання кількох шарів матеріалу (як однорідних, так і з різними електромагнітними властивостями). При цьому пріоритетними є саме електромагнітні властивості.

За умови використання кількох шарів вони повинні підвищуватися від шару до шару за ефективністю у обраному частотному діапазоні. Умовою підвищення акустичних властивостей є створення зазорів між шарами екрана. Величини цих зазорів легко розраховуються з використанням стандартного математичного апарату.

Висновки

1. Проведено аналіз переваг та недоліків розрахункових і експериментальних методів оцінки і прогнозування електромагнітної та акустичної обстановки в приміщеннях. Цей аналіз та експериментальні дослідження дозволяють дійти висновку, що одночасна оцінка та прогнозування електромагнітного і шумового навантаження як у окремих приміщеннях, так і у будівлях в цілому можливі і доцільні.

2. Ступінь достовірності результатів залежить від коректності визначення попередніх умов і припущень та точності базових експериментальних даних навантаження на силову електромережу, випромінювальні властивості технічних засобів тощо.

3. Використання виключно аналітично- розрахункових методів (моделювання окремих джерел і електромагнітних та акустичних полів, які вони генерують) трудомістке і не забезпечує достатність відомостей щодо очікуваної електромагнітної та акустичної обстановок та просторових розподілів полів у приміщеннях.

4. Найбільш доцільними є попереднє визначення випромінювальних властивостей одного з однотипних технічних засобів та подальший розрахунок електромагнітних полів та рівнів шуму в необхідних точках приміщень.

5. Необхідним є розроблення та тестування в реальних умовах програмно-технічного комплексу з моделювання розподілу електромагнітних полів від джерел з відомими випромінювальними властивостями та просторово-часовими змінами генерованих полів. Програмне забезпечення має враховувати геометричні параметри приміщень, відбивні характеристики обмежуючих поверхонь тощо.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Резинкина М.М. Численное исследование магнитного поля разномерных объектов / М.М. Резинкина, В.С. Гринченко, Л.Э. Лобжанидзе // Техн. электродинамика. – К., - 2010. –Ч.1. – С. 189-192.

2. Khalifa T. Electromagnetic Pollution Emitted from Base Station. // International Journal of Science and Research / A. Alnabi // International Journal of Science and Research. – 2015. – Vol. 4. – P. 1125 – 132.
3. Мордачев В.И. Электромагнитная нагрузка на территорию в неоднородной радиоэлектронной обстановке / В.И. Мордачев // Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2012. – № 8(70). – С. 23 – 31.
4. Мордачев В.И. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM / В.И. Мордачев, А.С. Свистунов // Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. – 2013. – № 7. – С. 44 – 50.
5. Подольцев А.Д. Многомасштабное моделирование в электротехнике / А.Д. Подольцев, И.Н. Кучерявая. – К.: Институт электродинамики НАН Украины, 2011. – 255 с.
6. Скобликов Ю.А. Результаты моделирования процесса проникновения электрического поля внутрь структурно-неоднородного электромагнитного экрана / Ю.А. Скобликов // Электротехніка і Електромеханіка. – 2011. – №. 4 – С 66 – 71.
7. Kasar V. A Novel Approach to Electromagnetic Interference Shielding for Cell Phones / V. Kasar, A. Pawar // International Journal of Science and Research. – 2014. – Vol. 3. – P. 1869 – 1872.
8. Singh J. Computer Generated Energy Effects on Users and Shielding Interference / J. Singh // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. – 2015. Vol. 3. – P. 10022 – 10027.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. А. Глива,

Національний авіаційний університет, Київ

Received (Надійшла) 28.11.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.01.2019

Методы предварительной оценки электромагнитной обстановки для проектирования средств защиты

Л. А. Левченко, М. М. Багрий

Предметом данного исследования являются процессы формирования электромагнитной обстановки в производственной среде в условиях воздействия на нее источников электромагнитных полей различных амплитудно-частотных характеристик. Цель работы - разработка методологического подхода к предварительной оценке электромагнитной обстановки в помещениях различного назначения в зависимости от типа и характеристик технологического оборудования, параметров электрических сетей и внедрение соответствующих организационно-технических мер защиты людей. Задачей исследования является анализ математических методов расчета уровней электромагнитных полей в зависимости от поставленных задач и характеристик, электромагнитных полей. Использован аналитический метод оценки адекватности математических функций условиям формирования электромагнитной обстановки. В работе показано, что расчетные и экспериментальные методы не могут быть использованы отдельно. Это объясняется обязательным присутствием предположений и упрощений при моделировании распространения электромагнитного поля вокруг источника и наличием больших объемов экспериментальных данных для их отдельного использования. Отмечено, что большинство разработанных средств оценки электромагнитной обстановки касаются одного источника поля или группы однотипных источников, что не отвечает современным требованиям. Предоставлено прикладной расчетный аппарат для оценки снижения высокочастотного электромагнитного поля неоднородными (перфорированными) экранирующими поверхностями. Показана необходимость предварительного экспериментального определения электрофизических свойств использованных материалов для двухкомпонентных защитных материалов. Сделан вывод, что кроме аналитического оценивания электромагнитной обстановки традиционными методами целесообразным является разработка программно-технического комплекса по моделированию распространения электромагнитного поля от источника. Такое программное обеспечение должно учитывать геометрические характеристики помещений и отражательные характеристики ограничивающих поверхностей.

Ключевые слова: электромагнитное поле, электромагнитная нагрузка, экранирование, защитные свойства, шум.

Methods of the previous evaluation of electromagnetic situation for projecting protecting means

L. Levchenko, M. Bahrii

The sub of this study is the formation of the electromagnetic environment in the production environment in terms of exposure to it to sources of electromagnetic fields of different amplitude-frequency characteristics. The aim of the work is to develop a methodological approach to the preliminary assessment of the electromagnetic environment in various premises depending on the type and characteristics of the process equipment, electrical network parameters and the introduction of appropriate organizational and technical measures to protect people. The task of the study is to analyze mathematical methods for calculating the levels of electromagnetic fields, depending on the tasks and characteristics of electromagnetic fields. An analytical method to assess the adequacy of mathematical functions for the formation of an electromagnetic environment was used. The paper was shown that computational and experimental methods cannot be used separately. This is due to the mandatory presence of assumptions and simplifications in modeling the propagation of an electromagnetic field around a source and the presence of large amounts of experimental data for their separate use. It is noted that most of the developed tools for assessing the electromagnetic environment relate to a single field source or a group of sources of the same type, which does not meet modern requirements. An applied calculating device for estimating the reduction of a high-frequency electromagnetic field by non-uniform (perforated) shielding surfaces is provided. Based on the ratios of electrodynamics of continuous media, the calculating apparatus is presented to determine the influence on the electromagnetic environment of continuous electromagnetic screens. It is noted that electromagnetic screens, if necessary, can be used to protect against noise and provide numerous data. It was concluded that in addition to the analytical assessment of the electromagnetic environment by traditional methods, it is expedient to develop a software and hardware complex for modeling the propagation of an electromagnetic field from a source. Such software should take into account the geometric characteristics of the premises and the reflective characteristics of the bounding surfaces.

Keywords: electromagnetic field, electromagnetic load, shielding, protective properties, noise.