

Л. О. Левченко¹, Я. А. Підлісний², Б. В. Бурдейний¹, А. В. Карачун¹

¹ Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

² Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація. Досліджено застосування моделювання поширення електромагнітних полів надвисоких, ультрависоких і вищих частот для оптимізації захисних властивостей та розташування електромагнітних екранів. Проведено моделювання розподілу магнітного поля промислової частоти у тілі людини, вкритому захисним одягом. Встановлено, що за певних умов ущільнення магнітного потоку можливе підвищення рівня магнітного поля. Отримана модель, яка дозволяє проєктувати захисний одяг високої ефективності, на основі моделювання поширення магнітних полів електричних машин, надано рекомендації щодо розташування магнітних екранів потрібної ефективності. Показано, що за умови немонотонності зміни напруженості магнітного поля з відстанню від електричної машини, магнітний екран повинен розташовуватися як надалі від точок зміни напрямку вектора магнітного поля (точок нульового значення напруженості поля). Методом моделювання зміни напруженості техногенного та геомагнітного поля захисною феромагнітною конструкцією визначено межі максимально можливого екранування техногенного магнітного поля без зниження напруженості природного магнітного поля нижчої за нормативні значення. Показано, що моделювання поширення електромагнітних полів частот мобільного зв'язку доцільно використовувати не тільки для розроблення схем розташування базових станцій, а й для зниження рівнів випромінювання самих засобів зв'язку. Сигнали базових станцій навіть за забезпечення надійного зв'язку не повинні бути нижчі за $0,12-0,15$ мкВт/см². У цьому випадку випромінювальні властивості більшості мобільних телефонів залишаються на мінімальному рівні. В умовах переходу мобільного зв'язку на стандарт 5G відбувається підвищення гранично допустимих рівнів, що обумовлене збільшенням робочих частот обладнання та підвищенням згасання потужності з відстанню. У таких умовах частина будівель потребує додаткового екранування від електромагнітних впливів. Наголошено, що магнітні та електрофізичні властивості захисних матеріалів мають частотну залежність. Тому розрахункові результати разом з певними спрощеннями і припущеннями при здійсненні моделювання можуть давати певні похибки. З урахуванням цього у проєктні рішення доцільно закладати запас ефективності захисту людей та впливу на стабільність роботи обладнання.

Ключові слова: моделювання, електромагнітне поле, електромагнітний екран, оптимізація.

Вступ

Моделювання поширення електричних, магнітних та електромагнітних полів різних амплітудно-частотних характеристик є найбільш ефективним методом прогнозування електромагнітної обстановки на стадіях проєктування забудови, розміщення електротехнічного обладнання тощо. Це дозволяє оцінити вплив електромагнітних полів на населення і працюючих та забезпечити нормативні рівні електромагнітної сумісності електричних та електронних пристроїв.

У процесі моделювання завжди необхідно враховувати похибки обчислень внаслідок наявності певних припущень у математичних функціях, які описують закономірності розповсюдження електромагнітних полів у залежності від їх амплітудно-частотних характеристик. У багатьох випадках моделювання повинне враховувати наявність перешкод, наприклад, магнітних та електромагнітних екранів, стін будівель, зелених насаджень тощо. Але при цьому недостатньо уваги приділяється межах моделювання, тобто відстаням, на яких прогноуються напруженості полів, щільності потоків енергії. Формально електромагнітне поле розповсюджується на нескінченній відстані, тому доцільно визначити критерії просторових обмежень моделювання. Крім того, для електромагнітних полів різних частот та амплітуд існують гранично допустимі рівні впливу на біологічні об'єкти та електронні прилади. Коректне визначення таких критеріїв підвищить ефективність застосування моделювання поширення електромагнітних полів та знизить обсяги обчислень.

Стан питання

Існує багато досліджень щодо моделювання поширення електричних, магнітних та електромагнітних полів. З урахуванням практичних потреб найбільше уваги приділяється поширенню магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти та електромагнітних полів ультрависоких та надвисоких частот (усі види бездротового зв'язку). Дослідження [1] присвячено визначенню поширення магнітних та електричних полів високовольтних ліній електропередачі. Методологія такого моделювання добре опрацьована [2]. Але у деяких випадках структури магнітних полів досить складні. Це стосується електротехнічного обладнання, яке генерує кілька просторових гармонік магнітного поля [3]. У дослідженні [4] надано методологію моделювання поширення магнітних полів множинних джерел. Верифікація результатів моделювання свідчить про прийнятну збіжність теоретичних та експериментальних даних. Моделювання поширення електромагнітних полів ультрависоких та вищих частот здійснюється, виходячи з потужності випромінювачів або на основі їх технічних даних [5]. Закономірності поширення таких електромагнітних полів добре відомі і враховують навіть вплив відбиваючих поверхонь [6]. Діаграми спрямованості таких полів досить прості – сферична або опуклий тілесний кут. Але самі по собі моделі поширення електромагнітних полів можна застосувати тільки для визначення межі граничного допустимого рівня, напруженості поля або щільності потоку енергії. У багатьох випадках цього недостатньо. За високих

значень полів необхідно визначити найбільш оптимальні місця розташування і конфігурації захисних конструкцій – магнітних та електромагнітних екранів. Ця задача неоднозначна. Захисні властивості матеріалів залежать від амплітудно-частотних характеристик екранованих полів, що впливає з фундаментальних співвідношень електродинаміки суцільних середовищ. До того ж, сучасні композиційні матеріали для екранування електромагнітних полів з керованими коефіцієнтами екранування мають високу вартість через складність технології виготовлення [7]. Тому доцільно дослідити можливість оптимізації застосування та розташування захисних конструкцій для підвищення електромагнітної безпеки людей та забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання.

Метою дослідження – застосування моделювання поширення електромагнітних полів для оптимізації захисних властивостей і розташування екрануючих конструкцій.

Викладення основного матеріалу

Методологічні підходи до моделювання низькочастотних та високочастотних електромагнітних полів відрізняються. У багатьох випадках для визначення поширення магнітного поля промислової частоти необхідно забезпечити високу точність, що обумовлене необхідністю його поширення у обмежених об'ємах на малих відстанях. Це проектування трансформаторів, високовольтних кабелів. Для такого моделювання здебільшого використовують засоби COMSOL. Моделювання поширення магнітного поля було застосовано для проектування захисного одягу, виготовленого з текстильного матеріалу, насиченого феромагнітними наночастинками. Випробування цього матеріалу у лабораторних умовах з використанням повіреного вимірювального обладнання та коректної методики показало, що він має великий коефіцієнт екранування магнітного поля промислової частоти і його можливо використовувати для виготовлення захисного одягу працівників, які обслуговують електротехнічне обладнання. При здійсненні моделювання вважалося, що усе тіло людини вкрите захисним матеріалом (рис. 1).

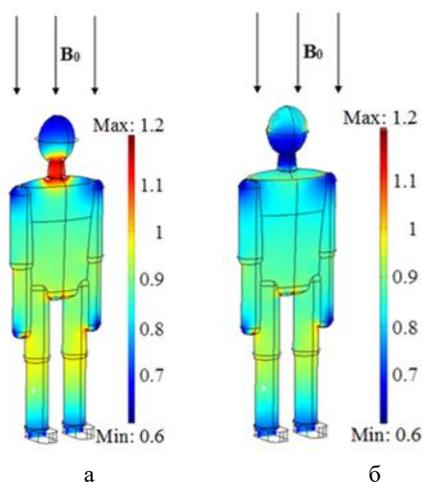


Рис. 1. Розподіл індукції магнітного поля у тілі людини, вкритої захисним матеріалом: а – людина повністю вкрита захисним матеріалом; б – захисний матеріал вкриває голову і спадає на плечі у вигляді накидки

Як видно з рис. 1, а, захисний шар в цілому екранує зовнішнє магнітне поле, але в області шиї індукція магнітного поля не знижується, а підвищується. Таке явище можна пояснити тим, що лінії магнітного поля, протікаючи феромагнітним шаром ущільнюються у області шиї. Тобто збільшується магнітний потік в усьому місці і поле проникає у внутрішній об'єм. Це неможливо виявити за використання стандартних методик визначення ефективності захисного одягу, які передбачають вимірювання у області голови, грудної клітки та паху. На рис. 1, б видно, що за розподілом магнітного потоку по більшій площі захисні властивості одягу підвищуються. Очевидно, що одночасне вимірювання значень полів у багатьох точках дуже складне, тому застосування моделювання поширення магнітного поля дозволяє досягти бажаного результату.

У [3] показано, що для чотирипольних електричних машин магнітне поле характеризується кількома просторовими гармоніками. Ці гармоніки мають різні закономірності зниження з відстанню, тому сумарне магнітне поле змінюється не монотонно: зниження магнітного поля досягає нульового значення, змінює напрям і знову підвищується за модулем. Моделювання поширення магнітного поля електричних машин здійснюється на основі розв'язку рівняння Гауса для скалярного потенціалу. З практики відомо, що критичними для інтегрального значення магнітного поля є дві просторові гармоніки. Для найбільш поширених чотирипольних машин це дипольна та квадрупольна гармоніки. Напруженість сумарного магнітного поля визначається з підсумкового співвідношення:

$$H = (R_0/R)^3 \times a_{11} \times \cos \phi \times \sin \theta + (R_0/R)^4 \times a_{22} \cos 2\phi \times \sin^2 \theta.$$

де R_0 – умовний радіус електричної машини, R – відстань до електричної машини, a_{11} , a_{22} – амплітудні значення дипольної та квадрупольної гармонік магнітного поля, ϕ , θ – кути полярних координат.

Було здійснено моделювання поширення магнітного поля для різних значень просторових гармонік магнітного поля біля корпусу електричної машини. Вважалося, що $R = 2k$ (рис. 2).

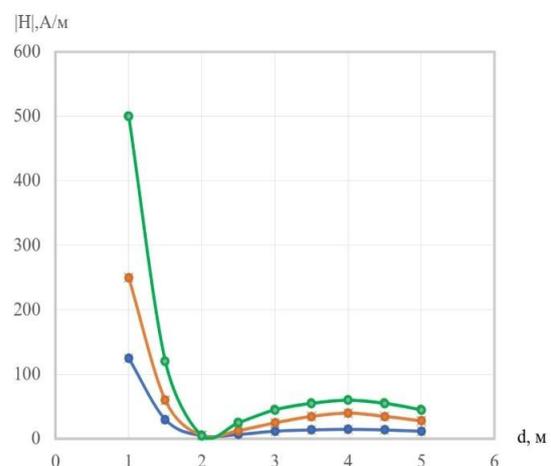


Рис. 2. Зміна модуля напруженості магнітного поля електричної машини з відстанню за різних значень дипольної та квадрупольної гармонік

мобільного інтернету тощо. У середньому різке підвищення випромінювання мобільних телефонів відбувається за сигналів базових станцій 0,08–0,12 мкВт/см². Іноді цей показник для окремих пристроїв застарілих моделей складає 0,2 мкВт/см². Тому при моделюванні інтенсивностей електромагнітних полів базових станцій мобільного зв'язку та визначення оптимального розташування випромінювачів слід керуватися мінімальним сигналом на рівні 0,12–0,15 мкВт/см². У зв'язку з поступовим переходом мобільного зв'язку на стандарт 5G постає проблема підвищення щільності встановлення базових станцій, що пов'язане з підвищенням робочої частоти або підвищення потужностей випромінювачів для забезпечення належного покриття. Більшість країн обрало останній шлях, обумовлений економічними міркуваннями. Тому, наприклад, у Німеччині гранично допустимий рівень щільності потоку енергії складає 450 Вт/см², в Україні – 100 мкВт/см². У таких умовах висувається вимога екранування деяких будівель для забезпечення умов перебування людей – закладів здоров'я та освіти. При цьому необхідно одночасно знизити рівні зовнішнього високочастотного електромагнітного поля та стабільний мобільний зв'язок.

Ефективність екранування електромагнітного поля можна характеризувати коефіцієнтом екранування, який показує, у скільки разів знизилась щільність потоку енергії або напруженість поля внаслідок застосування екранування. Цей показник також визначають у логарифмічних одиницях – децибелах. Для високочастотних випромінювань зазвичай використовують такий показник, як еквівалентна глибина проникнення поля у захисний матеріал, який показує товщину, за якої рівень електромагнітного поля знижується у e разів, (приблизно у 2,7 рази). Це пояснюється експоненціальним зниженням рівня поля у матеріалі:

$$\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu \sigma)},$$

де δ – еквівалентна глибина проникнення поля, f – частота електромагнітного поля, μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу, σ – питома електропровідність матеріалу.

Для оптимізації захисних властивостей електромагнітного екрана на основі моделювання поширення електромагнітного поля необхідно зв'язати фактичну потрібну товщину екрану з коефіцієнтом екранування $k = 8,686 \cdot d/\delta$, де d – товщина матеріалу, який забезпечує коефіцієнт екранування k . Це співвідношення виглядає емпіричним, але коефіцієнт 8,686 обумовлений переходом від натурального до десяткового логарифму при стандартному визначенні ефективності екранування ($20 \lg = 8,685$ дБ). Таким чином $k = 8,686d \sqrt{\pi f \mu \sigma} = 15,4d \sqrt{f \mu \sigma}$.

Для оптимізації коефіцієнта екранування достатньо обрати необхідну товщину матеріалу з відомими магнітними та електрофізичними властивостями. Слід врахувати, що магнітна проникність та

електрична провідність є комплексними величинами і мають частотну залежність. Ці показники для певних частот не завжди є довідковими даними навіть для стандартних металевих сплавів. Тому у практичній діяльності необхідно враховувати можливість виникнення деяких розбіжностей з експериментальними даними. Враховуючи, що при моделюванні поширення електромагнітних полів також використовується певні спрощення і припущення у проектні рішення необхідно закладати певний запас захисних властивостей екрануючих матеріалів і конструкцій.

Висновки

1. Показано, що моделювання поширення електромагнітних полів наднизьких та ультрависоких частот дозволяє прогнозувати необхідну ефективність засобів захисту. Застосування моделювання дозволяє визначити недоліки захисних конструкцій, що не можливо, із застосуванням стандартних методів.

2. Надано методики визначення структури магнітного поля електричних машин, що дозволило на основі моделювання поширення магнітного поля визначити оптимальні зони розташування магнітних екранів. Визначено межі застосування магнітних екранів для екранування магнітних полів промислової частоти з урахуванням одночасного екранування геомагнітного поля, межі зниження якого регламентовані відповідними нормативами.

3. Показано, що застосування моделювання поширення електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот дозволяє не тільки оптимізувати схему розташування базових станцій мобільного зв'язку, а й мінімізувати випромінювання мобільних телефонів за рахунок визначення мінімально допустимих рівнів сигналів базових станцій, які не призводять до підвищення випромінювання самих засобів зв'язку.

4. Надано зручний у використанні розрахунок, який дозволяє оптимізувати параметри конструкції для екранування високочастотних електромагнітних полів. Показано, що у проектні рішення необхідно закладати певний запас захисних властивостей через частотні залежності магнітних та електрофізичних властивостей захисних матеріалів та наявність певних спрощень і припущень, які закладаються у моделі поширення електромагнітних полів.

Конфлікт інтересів. Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Левченко Л.О. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. Системи обробки інформації. 2016. № 1. С. 29–37. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2016_1_9
2. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. Техническая электродинамика. 2015. № 2. С. 3–15. URL: https://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/mulfmo.pdf

3. Levchenko, L., Ausheva, N., Karaieva, N., Glyva, V., & Burdeina, N. (2024). Modeling of the external magnetic field of electric machines. *Advanced Information Systems*, 8(1), 24–30. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.03>
4. Glyva, V., Murr, P., Biruk, Y., Dolia, O., & Levkivskyi, R. (2025). Modelling the propagation of magnetic fields from multiple diverse sources. *Advanced Information Systems*, 9(4), 5–10. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.4.01>
5. Khalifa T., Alnabi A. Electromagnetic Pollution Emitted from Base Station. *International Journal of Science and Research. Int. Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4. P. 1125–132. <https://www.ijsr.net/getabstract.php?paperid=SEP14708>
6. Ходаковський, О., Левченко, Л., Колумбет, В., Козачук, А. і Кужавський, Д. Розрахунковий апарат моделювання поширення електромагнітних полів різнорідних джерел. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. 5, 1 (Чер. 2021), С. 34–38. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04>.
7. Tudose I.V., Mouratis K., Ionescu O.N., Romanitan C., Pachiou C., Popescu M., Khomenko V., Butenko O., Chernysh O., Kenanakis G., Barsukov V.Z., Suche M.P., Koudoumas E. Novel Water-Based Paints for Composite Materials Used in Electromagnetic Shielding Applications. *Nanomaterials*. 2022, 12(3). P. 487. <https://doi.org/10.3390/nano12030487>.
8. Розов В.Ю., Реуцкий С.Ю., Левин С.В. Дослідження явища ослаблення статичного геомагнітного поля сталевую колоною. *Технічна електродинаміка*. 2014. №1. С. 12–19. http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2014_1_4

Received (Надійшла) 28.11.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.02.2026

Publication date (Дата публікації) 27.02.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Левченко Лариса Олексіївна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна;
Larysa Levchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: larlevch@ukr.net; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-7227-9472>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57194577942>.

Підлісний Ярослав Анатолійович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. 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>.

Бурдейний Борис Владиславович – студент кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, м. Київ, Україна;
Borys Burdeinyi – student of Department Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: borysburdeyniy@gmail.com, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0004-7055-3994>.

Карачун Анастасія Володимирівна – студентка кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна, м. Київ, Україна;
Anastasiia Karachun – student of Department Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;
e-mail: anastasia.karachun7@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0006-6567-119X>.

Modelling the propagation of electromagnetic fields and optimising the effectiveness of protective structures

Larysa Levchenko, Yaroslav Pidlisnyi, Borys Burdeinyi, Anastasiia Karachun

Abstract. The application of modelling the propagation of extremely low, ultra-high and higher frequency electromagnetic fields for optimising the protective properties and location of electromagnetic screens has been investigated. Modelling of the distribution of the industrial frequency magnetic field in the human body covered with protective clothing has been carried out. It was established that under certain conditions of magnetic flux compression, an increase in the magnetic field level is possible. A model was obtained that allows the design of highly effective protective clothing based on the modelling of the propagation of magnetic fields of electrical machines, and recommendations were given on the location of magnetic screens of the required effectiveness. It has been shown that, given the non-monotonic change in magnetic field intensity with distance from the electric machine, the magnetic screen should be located as far as possible from the points of change in the direction of the magnetic field vector (points of zero field intensity). By modelling the change in the intensity of the man-made and geomagnetic fields by a protective ferromagnetic structure, the limits of the maximum possible shielding of the man-made magnetic field without reducing the intensity of the natural magnetic field below the normative values are determined. It has been shown that modelling the propagation of mobile communication frequency electromagnetic fields is useful not only for developing base station layout schemes, but also for reducing the radiation levels of the communication devices themselves. Even when ensuring reliable communication, base station signals should not be lower than 0.12–0.15 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. In this case, the radiation properties of most mobile phones remain at a minimum level. With the transition of mobile communications to the 5G standard, the maximum permissible levels are increasing, due to the increase in the operating frequencies of the equipment and the increase in power attenuation with distance. Under such conditions, some buildings require additional shielding from electromagnetic influences. An easy-to-use calculation is provided, which allows optimising the shielding coefficients of electromagnetic fields of certain frequencies while ensuring the protection of people and stable mobile communication. It is emphasised that the magnetic and electrophysical properties of protective materials are frequency-dependent. Therefore, the calculation results, together with certain simplifications and assumptions made during modelling, may give rise to certain errors. With this in mind, it is advisable to include a margin of safety for the protection of people and the stability of equipment operation in design solutions.

Keywords: modelling, electromagnetic field, electromagnetic screen, optimisation.