

УДК 621.3.013

Моделювання ґратчастого багат шарового екрану для зниження магнітного поля ліній електропередачі

Димерець^f А. В., ORCID [0000-0002-7617-5291](https://orcid.org/0000-0002-7617-5291)Красножон^s А. В., к.т.н., ORCID [0000-0002-6215-7535](https://orcid.org/0000-0002-6215-7535)Красножон^s О. В., к.т.н., ORCID [0000-0003-2500-254X](https://orcid.org/0000-0003-2500-254X)Чернігівський національний технологічний університет, ROR [048mcz794](https://ror.org/048mcz794)

Чернігів, Україна

Анотація—У зв'язку з шкідливим впливом магнітного поля на здоров'я людини актуальною є задача зниження індукції магнітного поля у місцях тривалого перебування людей поблизу ліній електропередачі. Проведено моделювання магнітного поля ліній електропередачі та визначено величину індукції в області, що знаходиться поблизу межі охоронної зони за умови використання пасивного ґратчастого електромагнітного екрану в різних конфігураціях. Порівняно ефективність екранування одношарового вертикального та горизонтального екранів. Представлено конфігурацію багат шарового екрану, який дозволяє за тієї ж металоемності забезпечити краще екранування магнітного поля, ніж одношаровий.

Ключові слова — лінія електропередачі; індукція магнітного поля; охоронна зона; ґратчастий електромагнітний екран; COMSOL Multiphysics.

I. ВСТУП

Останнім часом велику увагу приділяють розробці та дослідженню методів зниження рівня електромагнітного поля (ЕМП), створюваного лініями електропередачі (ЛЕП). В першу чергу це пов'язано з результатами проведених в США та Швеції в кінці 20-го сторіччя медико-санітарних досліджень [1-2], які виявили небезпечний вплив магнітного поля (МП) на здоров'я людей, що проживають поблизу ЛЕП.

В більшості країн світу вводяться більш жорсткі санітарні норми по рівню індукції МП в середовищі тривалого перебування людей, або приймаються обмеження по гранично допустимій відстані від ЛЕП до житлових і громадських споруд. В Україні встановлено гранично-допустимий рівень індукції МП для житлових приміщень, що складає 0,5 мкТл.

Межі охоронних зон вітчизняних ЛЕП встановлювались з врахуванням лише їх класу напруги. Це призвело до того, що на межі охоронної зони та поза нею забезпечується безпечний рівень лише напруженості електричного поля (ЕП). Рівень індукції магнітного поля досягає безпечного значення далеко за межами охоронної зони [3-5].

II. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

На даному етапі досліджено багато методів зниження індукції МП ЛЕП [3]. Проектно-технологічні методи, такі як зменшення відстані між дротами різних фаз [6-7]; оптимізація геометрії підвісу [3], можуть бути застосовані на етапі розробки та будівництва нових повітряних ЛЕП.

Технічні методи засновані на використанні пасивних та активних електромагнітних екранів та можуть бути застосовані на працюючих ЛЕП. Активні екрани є більш ефективними, але досить складними в розробці та дорогими в реалізації [8-9]. Пасивні екрани простіші та дешевші, проте менш ефективні.

Більшість досліджень присвячена плоским екранам [10-11] або екранам, виконаним з набору металевих пластин [12-13]. Також детально досліджені U-подібні електромагнітні екрани для кабельних ліній [14-15]. З метою економії металу можна використовувати екрани з металевих стрічок [16-17] або ґратчасті екрани [18].

В роботі [18] досліджено зниження індукції МП ЛЕП за рахунок використання пасивного ґратчастого екрану. Проте в ній розглянуто лише вертикально розташований екран, який може бути розміщений, наприклад, на фасаді будинку або вмонтований в стіну. Силові лінії МП в такому випадку проходять під гострим кутом до екрану або навіть паралельно йому (рис. 1а). Теоретично максимальна ефективність досягається у випадку, коли силові лінії направлені перпендикулярно екрану [19] (рис. 1б). Тому доцільним є дослідження ефективності горизонтально розташованого екрану, який може бути розміщений в підлозі, перекритті між поверхами та даху.

Мета даної роботи полягає у дослідженні ефективності зниження індукції МП ЛЕП за допомогою одно- та багат шарового горизонтально розташованого пасивного ґратчастого електромагнітного екрану.



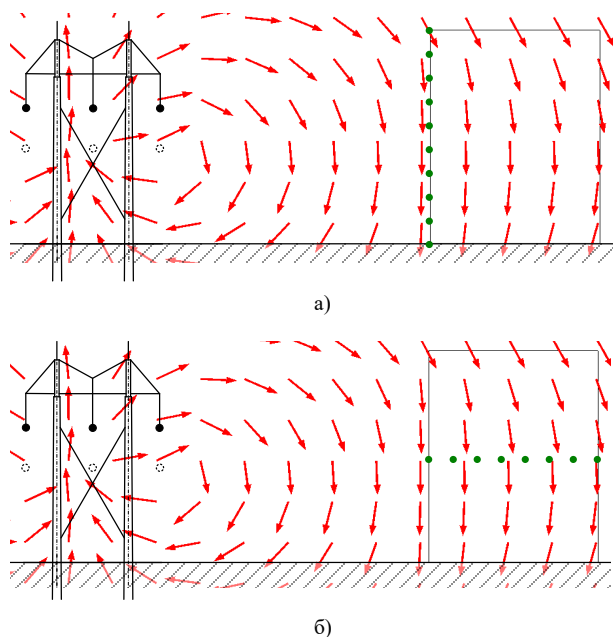


Рис. 1 Картина силових ліній МП відносно вертикального (а) та горизонтального (б) екранів

III. ОПИС ДОСЛІДЖУВАНОЇ МОДЕЛІ

Для моделювання МП ЛЕП та ґратчастого екрану було застосовано програмний пакет COMSOL Multiphysics.

У даній роботі використовувався модуль AC/DC, призначений для моделювання електрики, магнетизму та електромагнітних полів у стаціонарних і низькочастотних задачах.

Для розрахунку використовувалася стандартна двовимірна модель ЛЕП в декартовій системі координат (рис. 2). Розрахункова область задана у вигляді круга радіусом 100 м. Додатковий шар товщиною 30 м (Infinite element domain) розміщений для забезпечення умови затухання поля до нуля на нескінченно великій відстані.

Діаметр фазних дротів ЛЕП значно менший за інші лінійні розміри розрахункової моделі, тому вони представлені у вигляді точок з координатами:

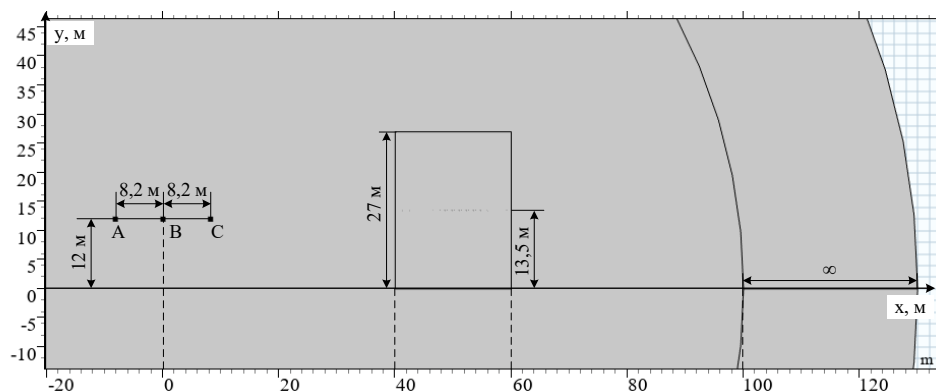


Рис. 2 Геометрична модель ЛЕП та досліджуваної області

$x_A = -8.2$ м; $x_B = 0$ м; $x_C = 8.2$ м; $y_A = y_B = y_C = 12$ м. Розміри взяті з повітряної ЛЕП 330 кВ «Чернігівська-Ніжинська» в Чернігівській області.

Область для якої проводиться дослідження – умовний 9-ти поверховий житловий будинок (без металевих конструкцій), розташований поза межею охоронної зони ЛЕП (для лінії 330 кВ це 30 м від крайнього дроту).

Дана область задана у вигляді прямокутника висотою 27 м (3 м на один поверх) та шириною 20 м. Стіни та перекриття між поверхами не враховувалися, адже вони майже не впливають на магнітне поле [4].

Електромагнітний екран представлено у вигляді масиву круглих провідників. Діаметр провідників та відстані між ними змінювалися в процесі дослідження.

Матеріали, що були використані у моделі: повітря (провідність 0 См/м, відносна діелектрична та магнітна проникність 1) для всієї розрахункової області; алюміній (провідність $3.77 \cdot 10^7$ См/м, відносна діелектрична та магнітна проникність 1) для електромагнітного екрану.

Для моделювання МП було використано інтерфейс Magnetic Fields. Струми в фазних дротах ЛЕП задавалися за допомогою інструмента Line Current, величина струму 1кА, зсув фаз між фазними струмами 120 градусів. Провідники ґратчастого екрану були об'єднані інструментом Coil, та задано прикладену напругу 0 В. Розрахунок проводився в частотній області (Frequency Domain) на частоті 50 Гц.

IV. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

На рис. 3 наведено карти розподілу індукції МП в досліджуваній області для трьох випадків: за відсутності екрану (рис. 3а); за наявності вертикального екрану (рис. 3б); за наявності горизонтального екрану (рис. 3в). Діаметр провідників екрану 10 мм, відстань між провідниками 0.5 м, матеріал – алюміній. Вертикальний екран розташований на стіні, яка знаходиться ближче до ЛЕП, горизонтальний – на половині висоти досліджуваної області.

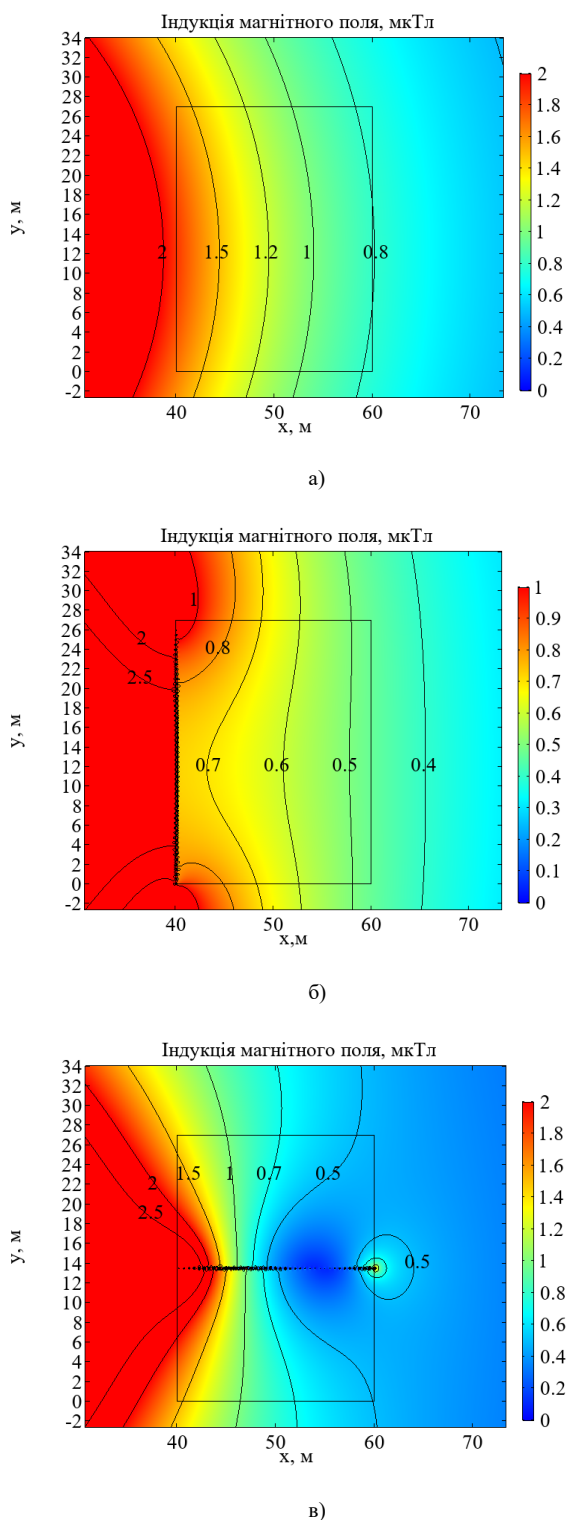


Рис. 3 Карты розподілу індукції МП в досліджуваній області за відсутності екрану (а), за наявності одношарового вертикального (б) та горизонтального (в) екранів

З картин поля бачимо, що у випадку відсутності екрану, індукція МП перевищує безпечний рівень в 2-3 рази в досліджуваній області.

Вертикальний екран зменшує величину індукції приблизно в два рази. Горизонтальний екран також дозволяє зменшити значення індукції магнітного поля, проте не так сильно як вертикальний екран.

Можна зробити висновок, що у випадку використання одношарового екрану вертикальний є більш ефективним, ніж горизонтальний.

На рис. 4 наведено карту розподілу індукції МП для випадку, коли екран розміщений у декілька горизонтальних шарів. Для більш коректного порівняння такий екран було складено з такої ж кількості провідників, що і вертикальний екран (10 шарів по 5 провідників) (рис. 4а). Відстань між горизонтальними шарами складала 3 м (висота одного поверху житлової будівлі), між провідниками в одному шарі – 5 м.

З рис. 4а бачимо, що за однакової кількості використаних провідників багатшаровий екран є значно ефективнішим за одношаровий. Майже у всій досліджуваній області індукція магнітного поля є значно меншою за небезпечний рівень. Перевищення спостерігається лише поблизу межі досліджуваної області, що знаходиться ближче до ЛЕП.

На рис. 4б бачимо, що при збільшенні кількості провідників (по 41 провіднику в кожному шарі), з яких складається екран та зменшенні відстані між ними (0.5 м) можливо ще більше знизити рівень індукції МП в усій досліджуваній області, до абсолютно безпечного рівня.

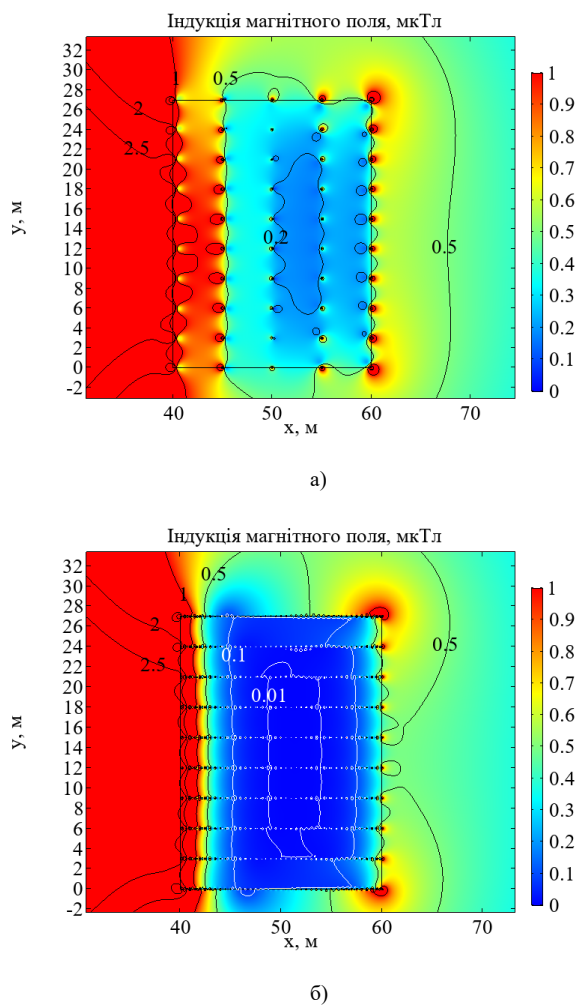


Рис. 4 Карты розподілу індукції МП в досліджуваній області за наявності багатшарового екрану з відстанню між провідниками 4 м (а) та 0.5 м (б)

Чисельна оцінка якості екранування різних конфігурацій екранів проводилася за допомогою коефіцієнта екранування [19], що визначається як відношення модуля індукції МП в точці простору за відсутності екрану $\left| \dot{B}_0 \right|$ до модуля індукції МП за наявності екрану $\left| \dot{B} \right|$. Для досліджуваної області розраховувався усереднений коефіцієнт екранування [16]:

$$k_{av} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{\dot{B}_0}{\dot{B}} \right|,$$

де N – кількість точок усереднення.

В таблиці 1 наведено середні значення індукції МП в досліджуваній області та коефіцієнта екранування для всіх досліджуваних конфігурацій екрану (кількість провідників була однаковою для всіх випадків).

ТАБЛИЦЯ 1 ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКРАНІВ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЙ

Конфігурація екрану	Ефективність	
	Середнє значення індукції МП, мкТл	Коефіцієнт екранування
Без екрану	1.2	1
Одношаровий вертикальний	0.64	1.88
Одношаровий горизонтальний	0.91	1.32
Багатошаровий горизонтальний (10 шарів по 5 провідників)	0.48	2.5
Багатошаровий горизонтальний (6 шарів по 9 провідників)	0.6	2
Багатошаровий горизонтальний (4 шари по 13 провідників)	0.67	1.8

Результати, наведені в таблиці 1, показали, що найбільш ефективним є більш рівномірне розподілення екрану – з більшою відстанню між провідниками в одному шарі, але з розташуванням шарів на кожному поверсі.

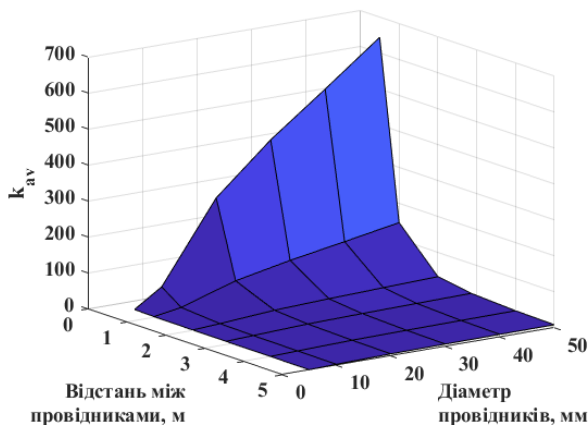


Рис. 5 Поверхня залежності коефіцієнта екранування від діаметру провідників, з яких складається екран, та відстані між ними

На рис. 5 наведено поверхню залежності коефіцієнта екранування багатошарового горизонтального екрану, розташованого на кожному поверсі, від діаметру провідників, з яких складено екран, та відстані між ними. З рисунку бачимо, що багатошаровий екран з товстих щільно розташованих провідників, хоча і потребує великої кількості металу на виготовлення, але дозволяє зменшити індукцію МП в сотні разів в області, що екранується.

ВИСНОВКИ

Проведено дослідження ефективності використання пасивного ґратчастого електромагнітного екрану для зниження індукції МП в місцях тривалого перебування людей поблизу ЛЕП.

Показано, що одношаровий екран є не достатньо ефективним та не здатним знизити індукцію МП до безпечного рівня (середнє значення індукції МП 0.64 та 0.91 мкТл). До того ж визначено, що для такого екрану більш ефективним є вертикальне розміщення (коефіцієнт екранування 1.88), а не горизонтальне (коефіцієнт екранування 1.32).

Запропоновано нову конфігурацію ґратчастого екрану – багатошаровий екран. Показано, що такий екран за тієї ж металоємності (такої ж кількості провідників) є ефективнішим за одношаровий (коефіцієнт екранування 2.5). Також такий екран може бути покращений за рахунок використання більшої кількості провідників.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] A. Giorgi, R. Conti, R. Rendina, L. Sartore and E. Sena, "Technical Solutions To Reduce 50 Hz Magnetic Fields from Power Lines," in *Proceedings of Power Tech Conference IEEE'2003, 23-26 June, 2003, Bologna (Italy), 2003*.
- [2] M. Feychting, B. Floderus and A. Ahlbom, "Parental occupational exposure to magnetic fields and childhood," *Cancer Causes and Control*, no. 11, pp. 151-156, 2000.
- [3] V. Yu. Rozov, S. Yu. Reutskiy, D. Ye. Pelevin, O. Yu. Pyliugina, "Magnitnoe pole liniy elektroperedachi i metody ego snizheniya do bezopasnogo urovnya [The magnetic field of power transmission lines and the methods of its mitigation to a safe level]," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 2, pp. 3-9, 2013. URL: http://techned.org.ua/2012_2/st8.pdf
- [4] D. Ye. Pelevin, "Ekranirovanie magnitnogo polya promyshlennoj chastoty stenami zhilyh domov [Screening magnetic fields of the power frequency by the walls of houses]," *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, no. 4, pp. 53-55, 2015. DOI: [10.20998/2074-272X.2015.4.10](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.4.10)
- [5] A. O. Pavlushko, A. V. Dymereets, A. V. Krasnozhon, "Matematychno modeliuвання parametriv elektromagnitnoho polia diuchoi PL 330 kV [Mathematical modeling of electromagnetic field parameters of the overhead power line 330 kV]," in *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia «Novitni Tekhnologii Suchasnoho Suspilstva» NTSS-2019, Chernihiv, Ukraine, 2019*.
- [6] M. Sh. Misrihanov, A. Yu. Tokarskiy, "Preimushstva i nedostatki prostyh kompaktnyh vozdushnyh liniy elektroperedachi [Advantages and disadvantages simple compact overhead power lines]," *Povyshenie effektivnosti raboty energosistem*, pp. 204-223, 2003.
- [7] M. Sh. Misrihanov, A. Yu. Tokarskiy, "Upravlyaemye kompaktnye linii elektroperedachi [Managed compact power lines]," *Trudy IGEU*, no. 6, pp. 238-248, 2003.



- [8] S. Celozzi, F. Garzia, "Active shielding for power-frequency magnetic field reduction using genetic algorithms optimization," *IEEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, vol. 151, no. 1, pp. 2-7, 2004.
- [9] B. I. Kuznetsov, T. B. Nikitina, A. V. Voloshko, I. V. Bovdyj, E. V. Vinichenko, B. B. Kobilyanskiy, "Sintez sistem aktivnogo ekranirovaniya magnitnogo polya vozdushnyh liniy elektropredachi na osnove mnogokriterialnoj optimizacii [Synthesis of an active shielding system of the magnetic field of power lines based on multiobjective optimization]," *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, no. 6, pp. 26-30, 2016. DOI: [10.20998/2074-272X.2016.6.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.6.05)
- [10] J. Burnett, P. Du Yaping, "Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings," *Building and Environment*, vol. 37, no 8-9, pp. 769-775, 2002. DOI: [10.1016/S0360-1323\(02\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00043-4).
- [11] M. De Wulf, P. Wouters, P. Sergeant, L. Duprer, E. Hoferlin, S. Jacobs, P. Harlet, "Electromagnetic shielding of high-voltage cables," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no 316, pp. 908-911, 2007. DOI: [10.1016/j.jmmm.2007.03.137](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137)
- [12] M. M. Rezinkina, V. S. Grinchenko, "Elektromagnitnye ekrany dlya snizheniya indukcii magnitnogo polya promyshlennoj chastoty na obektah energetiki [Usage of electromagnetic shields for power frequency magnetic field mitigation in power industry]," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 3, pp. 15-16, 2012. URL: http://techned.org.ua/2012_3/st5.pdf
- [13] D. Bavastro, A. Canova, F. Freschi, L. Giaccone, M. Manca, "Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no 3, pp. 2009-2016, 2015. DOI: [10.1109/TIA.2014.2369813](https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2369813)
- [14] A. Canova, D. Bavastro, F. Freschi, L. Giaccone, M. Repetto "Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines," *Electric Power Systems Research*, no 89, pp. 109-115, 2012. DOI: [10.1016/j.epsr.2012.03.003](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.003)
- [15] P. L. Cruz Romero, J. C. Del-Pino-Lypez, "Magnetic field shielding of underground cable duct banks," *Progress In Electromagnetics Research*, no 138, pp. 1-19, 2013.
- [16] M. M. Rezinkina, A. A. Shcherba, V. S. Grinchenko, K. O. Rezinkina, "Raschetnyj vybor parametrov elektromagnitnyh ekranov slozhnoj prostranstvennoj konfiguracii [Calculation choice of parameters of electromagnetic screens of complicated three-dimensional configuration]," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 1, pp. 10-16, 2012. URL: http://techned.org.ua/2012_1/st2.pdf
- [17] E. Salinas, M. Rezinkina, J. Atalaya, "Some 2D–3D aspects of shielding of longitudinal sources of extremely low frequency magnetic fields," *The Environmentalist*, vol. 29, no 2, pp. 141-146, 2009. DOI: [10.1007/s10669-008-9206-0](https://doi.org/10.1007/s10669-008-9206-0).
- [18] V.S. Grinchenko, "Znyzhennya mahnitnoho polya tryfaznykh liniy elektropredachi hrachastym elektromahnitnym ekranom [Mitigation of three-phase power line magnetic field by grid electromagnetic shield]," *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 4, pp. 29-32, 2018. DOI: [10.15407/techned2018.04.029](https://doi.org/10.15407/techned2018.04.029)
- [19] D.N. Shapiro, Basis of electromagnetic screening, Leningrad: Energiia, 1975, 109 p.

Надійшла до редакції 19 липня 2020 року



Simulation of a Grid Multi-Layer Shield to Reduce the Magnetic Field of Power Lines

A. V. Dymerecs^f, ORCID [0000-0002-7617-5291](https://orcid.org/0000-0002-7617-5291)

A. V. Krasnozhon^s, PhD, ORCID [0000-0002-6215-7535](https://orcid.org/0000-0002-6215-7535)

O. V. Krasnozhon^s, PhD, ORCID [0000-0003-2500-254X](https://orcid.org/0000-0003-2500-254X)

Chernihiv national university of technologies, ROR [048mcz794](https://ror.org/048mcz794)
Chernihiv, Ukraine

Abstract—Seeing the harmful effects of the magnetic field on human health, the task of reducing the magnetic flux density in places of people long-term stays near power lines is actual. One of the ways to solve this problem is a passive shielding.

Analyze of shielding efficiency was performed by computer simulation using COMSOL Multiphysics software. It was created a 2D model of a three-phase 330 kV overhead power transmission line and the research area, which is a conventional residential building located outside the security zone.

The magnetic field was simulated and the value of magnetic flux density in the research area was determined for cases of using a passive grid electromagnetic screen of different configurations. The efficiency comparison of different shields was performed qualitatively on the color and contour maps of the magnetic flux density distribution in the research area and quantitatively on the average value of the shielding factor.

The efficiency of a single layer vertical shield, located on the building wall closest to the power line, and a horizontal shield, located at the average height of the building, were compared. It is shown that with the same metal content (the same diameter of the shield conductors and the same number of them) the vertical shield is more efficient than the horizontal, but it also cannot always provide a safe level of magnetic flux density.

The configuration of the multilayer shield, which can be placed in overlapping between floors of the building, is presented. It is shown that with the same metal content such shield can provide better reducing of the magnetic field than a single-layer, and it is able, under the same conditions, to decrease the magnetic flux density to a safe level. But this configuration has one disadvantage. In the part of the building closer to the power line (approximately 4 m from the wall) the value of magnetic flux density exceeds the safe level. It is possible to reduce the width of such zone due to a denser placement of shield conductors. It was also found that the placement of the shield horizontal layers on each floor is more effective, i.e. as evenly as possible over the research area.

In addition, a research the dependence of the shielding factor of the multilayer shield on the conductor's diameter and the distance between them. It is shown that such shield allows reducing the average value of magnetic flux density in the research area hundreds of times, although with a fairly large metal content.

Keywords — *power line; magnetic flux density; security zone; grid electromagnetic shield; COMSOL Multiphysics.*