

ЗНИЖЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТРИФАЗНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ГРАТЧАСТИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ЕКРАНОМ

В.С. Грінченко, канд.техн.наук

ДУ “Інститут технічних проблем магнетизму НАН України”,

вул. Індустріальна, 19, Харків, 61106, Україна,

e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

Розглянуто зниження магнітного поля трифазної лінії електропередачі за допомогою гратчастого електромагнітного екрана, який виконано з набору проводів, розташованих в одній площині та з'єднаних паралельно. Шляхом чисельного моделювання досліджено екрануючі властивості трьох гратчастих екранів еквівалентної металоемності, що складаються з різного числа проводів та відповідно мають різну площу поперечного перерізу проводів і відстань між ними. Для обґрунтування можливості ефективного зниження магнітного поля трифазної лінії електропередачі розраховано розподіл магнітного поля при використанні гратчастого та плоского екранів еквівалентної металоемності. Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: лінія електропередачі, магнітне поле, електромагнітний екран, гратчастий екран, чисельне моделювання.

У ряді випадків виникає необхідність зниження рівня магнітного поля (МП) трифазних ліній електропередачі. Наприклад, рівень МП повітряної лінії електропередачі може перевищувати гранично допустимий у розташованих поблизу будівлях, а МП кабельної лінії електропередачі може перевищувати гранично допустимий рівень на поверхні землі вздовж своєї траси. Один із методів зниження МП полягає у застосуванні електромагнітних екранів. Найбільш поширеними є плоскі електромагнітні екрани [4,7] та екрани, виконані з набору електропровідних пластин [1,3]. Для зниження МП кабельних ліній також застосовують U-подібні електромагнітні екрани [5,6]. У деяких роботах пропонується використовувати екрани, виконані з електропровідних стрічок [2,10]. Крім зазначених електромагнітних екранів для зниження МП можуть застосовуватися гратчасті екрани. Гратчастий екран складається з набору проводів, здебільшого алюмінієвих, які з'єднані між собою певним чином і утворюють струмові контури. Наприклад, у [8] розглянуто зниження однорідного змінного МП за допомогою гратчастого екрана, що складається з проводів, розташованих у двох паралельних площинах. Проте зниження МП ліній електропередачі за допомогою гратчастого екрана в літературних джерелах не розглянуто.

Мета роботи – визначити ефективність зниження гратчастими екранами магнітного поля трифазної лінії електропередачі у віддаленій від неї області простору.

Дослідження проведено в припущенні, що проводи лінії електропередачі є нескінченно довгими, розташовані паралельно один одному та мають наступні координати: $x_1=x_2=x_3=-20$ м, $y_1=-4$ м, $y_2=0$, $y_3=4$ м. Лінія електропередачі працює в сталому режимі, струми в її провадах рівні за величиною та зсунуті за фазою один відносно одного на 120° . Відповідно діюче значення сили струму дорівнює 1000 А, а фази струмів $\varphi_1=-2\pi/3$, $\varphi_2=0$, $\varphi_3=2\pi/3$. Частота струмів дорівнює промисловій – 50 Гц. На рис. 1 показано ізолінії діючого значення магнітної індукції поля лінії електропередачі, розрахованого згідно з [9]. Область екранування віддалена на 20 м від лінії електропередачі та знаходиться праворуч від осі ординат. Електромагнітний екран розташовувався в площині $x=0$ таким чином, що ординати його крайніх точок склали -20 і 20 м. Місце, де розташовувався екран, показано пунктиром на рис. 1. Розглянуто зниження МП за допомогою трьох гратчастих та плоского екранів:

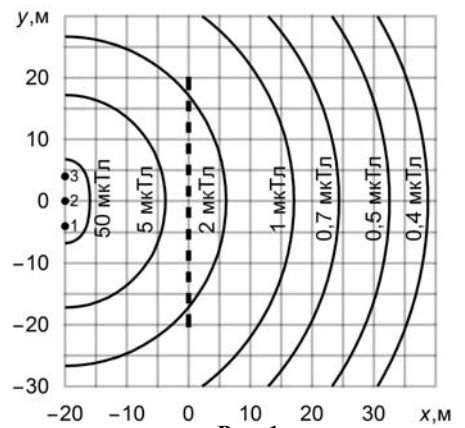


Рис. 1

– гратчастий екран №1 складається з 21 проводу, розташованих у площині $x=0$ на відстані 2 м один від одного; проводи екрана паралельні провадам лінії електропередачі; радіус поперечного перерізу кожного проводу (крім крайніх) дорівнює 17,8 мм, а радіус поперечного перерізу двох крайніх проводів в $\sqrt{2}$ раз менший і складає 12,6 мм; всі проводи з'єднані паралельно;

– гратчастий екран №2 складається з 41 проводу, відстань між сусідніми провадами – 1 м, радіус поперечного перерізу проводів – 12,6 мм, радіус поперечного перерізу крайніх проводів – 8,9 мм;

– гратчастий екран №3 складається з 81 проводу, відстань між сусідніми провадами – 0,5 м, радіус поперечного перерізу проводів – 8,9 мм, радіус поперечного перерізу крайніх проводів – 6,3 мм;

– плоский екран (екран №4) шириною 40 м і товщиною 0,5 мм.

© Грінченко В.С., 2018

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6195-3011>

Вважається, що довжина екрана в напрямку лінії електропередачі набагато більша за його інші лінійні розміри. Всі екрани виготовлено з алюмінію. Електрична провідність екранів – $3,5 \cdot 10^7$ См/м, відносна магнітна проникність екранів дорівнює 1. Слід зазначити, що металоемності всіх розглянутих екранів є тотожними.

Опис моделі магнітного поля. Частота струмів, індукованих в екрані, дорівнює промисловій. Відповідно результуюче МП, яке створюється струмами лінії електропередачі та струмами в екрані, є гармонічним та змінюється з промисловою частотою 50 Гц. Тому воно може бути розраховане в квазістационарному наближенні. Використовуючи перше рівняння Максвелла отримуємо

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \dot{\vec{A}}) + j\mu_0\omega\sigma \dot{\vec{A}} = 0, \quad (1)$$

де $\dot{\vec{A}}$ – комплексна амплітуда векторного потенціалу електромагнітного поля; $\omega = 2\pi \cdot 50$ с⁻¹ – циклічна частота струму; σ – електрична провідність тієї області, для якої записується рівняння; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; j – уявна одиниця.

Внаслідок прийнятих припущень МП є плоскопаралельним, і задача може бути розв'язана у двовимірній постановці. У такому випадку $\dot{\vec{A}} = \dot{A} \cdot \vec{e}_z$, де $\dot{A} = \dot{A}_i(x, y)$ – комплексна амплітуда компоненти векторного потенціалу електромагнітного поля по осі Z, яка спрямована паралельно лінії електропередачі; \vec{e}_z – орт. Підставляючи в (1), отримуємо рівняння для електропровідних областей (проводи лінії електропередачі та екран) і поза ними

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \dot{A}_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_i}{\partial y^2} - j\mu_0\omega\sigma \dot{A}_i = 0, & \text{якщо } \sigma \neq 0, \\ \frac{\partial^2 \dot{A}_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_e}{\partial y^2} = 0, & \text{якщо } \sigma = 0, \end{cases} \quad (2)$$

де індекси «i» та «e» відповідають точкам (x, y) всередині електропровідних областей та поза ними.

Оскільки повний струм у кожному проводі лінії електропередачі визначається як інтеграл від густини струму за його поперечним перерізом S_k , то система (2) має бути доповнена наступним рівнянням:

$$\dot{I}_k = -j\omega\sigma \cdot \int_{(S_k)} \dot{A}_i ds = I_0 e^{j\varphi_k}, \quad (3)$$

де $k = \overline{1,3}$ – номер проводу лінії електропередачі; \dot{I}_k та φ_k – відповідно комплексна амплітуда та фаза струму в k-му проводі; $I_0 = 1000\sqrt{2}$ А – амплітуда сили струму в проводах лінії електропередачі.

На границях поділу електропровідних і непровідних областей виконуються наступні умови:

$$\begin{cases} \dot{A}_i = \dot{A}_e, \\ \partial \dot{A}_i / \partial n = \partial \dot{A}_e / \partial n, \end{cases} \quad (4)$$

де \vec{n} – одиничний вектор нормалі до поверхні границі поділу цих областей.

Таким чином, для знаходження результуючого МП системи лінії електропередачі та екрана необхідно вирішити систему рівнянь (2), (3) спільно з умовами (4). Аналітичний розрахунок МП при використанні ґратчастих екранів є трудомістким, тому доцільно вдатися до чисельного моделювання. Для розв'язання задачі використано метод кінцевих елементів, для реалізації якого було обрано програмний пакет *COMSOL Multiphysics*. При моделюванні використовувався інтерфейс *Magnetic Fields*, який входить до *AC/DC Module* програмного пакета. Цей інтерфейс дає змогу проводити моделювання процесів, що описуються рівняннями (2). Електричні струми в проводах лінії електропередачі задавалися за допомогою функціоналу *Coil*. Для опції *Coil excitation* задавався варіант *Current*, що відповідає рівнянню (3). Відзначимо, що програмний пакет *COMSOL Multiphysics* автоматично задає умови (4), що накладаються на векторний потенціал на границях поділу середовищ з різними електрофізичними властивостями.

При побудові двовимірної моделі в декартовій системі координат для опції *Space Dimension* задавався варіант *2D*. Розрахункова область представляла собою коло діаметром $L=100$ м з центром у точці $x=0, y=0$. На периферії розрахункової області розташовувався шар *Infinite element domains* товщиною $L/3$. Його електрофізичні параметри є такими, що поле в ньому затухає та не відбивається всередину розрахункової області. Використання цього додаткового шару дає змогу істотно зменшити розміри розрахункової області. В областях проводів лінії електропередачі, проводів ґратчастого екрана та зовнішнього простору взято трикутну розрахункову сітку. Для її задання використовувався функціонал *Free Triangular*, а мінімальний розмір сітки не перевищував однієї п'ятої діаметра проводу. При розрахунку ефективності плоского екрана всередині його області використовувався прямокутна сітка, а для її задання – функціонал *Swept*: уздовж товщини (по осі X) екран розбивався на п'ять елементів, по ширині (по осі Y) – на 200 елементів.

Верифікація розробленої моделі проводилася у два етапи. По-перше, правильність чисельного розв'язку перевірялася шляхом порівняння з розв'язками, які були отримані при дворазовому збільшенні розміру роз-

рахункової області та при використанні більш густої сітки. По-друге, чисельне моделювання було проведено для випадку, коли відстань між лінією електропередачі та плоским екраном була набагато меншою його ширини, а результат розрахунку ефективності екранування МП зіставлено з відомим аналітичним розв'язком [8]. Розбіжність результатів моделювання та аналітичного розв'язку не перевищувала 2%.

Результати моделювання магнітного поля. На рис. 2 показано розподіли діючого значення магнітної індукції B по осі X при використанні ґратчастих екранів і плоского екрана. На рис. 3 показано розподіли по осі X ефективності екранування SF , яка визначається як відношення магнітної індукції власного поля лінії електропередачі до магнітної індукції при використанні екрана. На обох рисунках номер кривої відповідає номеру використовуваного екрана. Як і слід було очікувати, найбільше зниження МП забезпечує плоский екран, а найменше – ґратчастий №1, проводи якого віддалені один від одного на 2 м. У свою чергу, збільшення числа проводів ґратчастого екрана при збереженні його металоемності (та як наслідок, зменшення відстані між сусідніми проводами та їхнього поперечного перерізу) призводить до збільшення ефективності екранування.

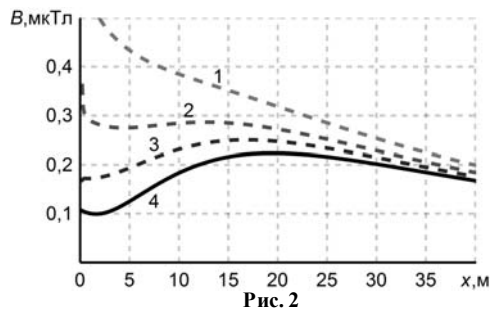


Рис. 2

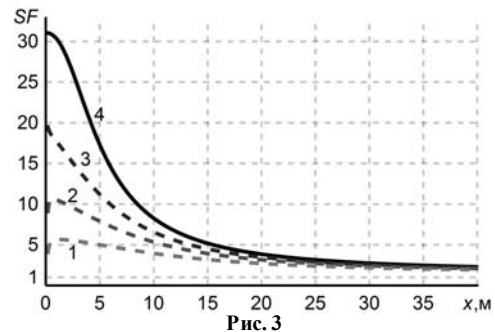


Рис. 3

На рис. 4 та рис. 5 показано ізолінії діючого значення магнітної індукції в області екранування при використанні відповідно ґратчастого екрана №3 (проводи якого віддалені один від одного на 0,5 м) та плоского №4. Як видно з представлених розподілів, області, в яких величина магнітної індукції не перевищує 0,2 мкТл, відмінні. Тоді як в обох випадках практично збігаються області, в яких значення магнітної індукції становить 0,3 мкТл і більше.

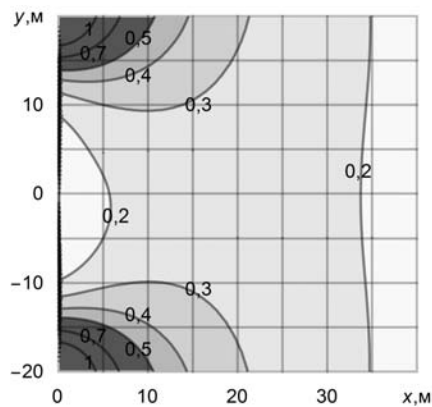


Рис. 4

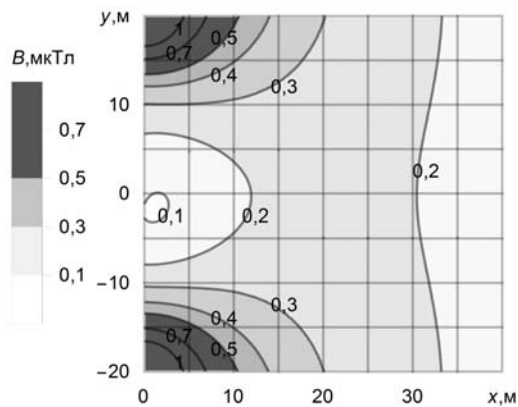


Рис. 5

Висновки. Показано, що магнітне поле лінії електропередачі може бути ефективно екрановано за допомогою ґратчастого екрана, що складається з набору алюмінієвих проводів, розташованих в одній площині та з'єднаних паралельно. При збереженні металоемності ґратчастого екрана ефективність екранування магнітного поля може бути підвищена шляхом збільшення числа його проводів і, як наслідок, зменшення площі їх поперечного перерізу та відстані між сусідніми проводами. Більш того, якщо відстань між проводами лінії електропередачі становить 4 м, а область екранування віддалена від неї на 20 м, то при відстані 0,5 м між сусідніми проводами ґратчастого екрана його ефективність еквівалентна ефективності плоского екрана, який має таку саму ширину та металоемність.

1. Rezinkina M.M., Grinchenko V.S. Usage of electromagnetic shields for power frequency magnetic field mitigation in power industry. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 15-16. (Rus)
2. Rezinkina M.M., Shcherba A.A., Grinchenko V.S., Rezinkina K.O. Calculation choice of parameters of electromagnetic screens of complicated three-dimensional configuration. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 1. Pp. 10-16. (Rus)
3. Bavastro D., Canova A., Freschi F., Giaccone L., Manca M. Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 51. No 3. Pp. 2009-2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2369813> .

4. Burnett J., Du Yaping P. Mitigation of extremely low frequency magnetic fields from electrical installations in high-rise buildings. *Building and Environment*. 2002. Vol. 37. No 8-9. Pp. 769-775.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00043-4) .
5. Canova A., Bavastro D., Freschi F., Giaccone L., Repetto M. Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines. *Electric Power Systems Research*. 2012. No 89. Pp. 109-115.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012.03.003> .
6. Cruz Romero P.L., Del-Pino-López J.C. Magnetic field shielding of underground cable duct banks. *Progress In Electromagnetics Research*. 2013. No 138. Pp. 1-19.
7. De Wulf M., Wouters P., Sergeant P., Dupre' L., Hoferlin E., Jacobs S., Harlet P. Electromagnetic shielding of high-voltage cables. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2007. No 316. Pp. 908-911.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2007.03.137>
8. Kaden H. Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik. Springer Berlin Heidelberg, 1959.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32570-3> .
9. Rozov Volodymyr, Grinchenko Volodymyr. Simulation and analysis of power frequency electromagnetic field in buildings closed to overhead lines. 2017 IEEE First Ukraine Conference on *Electrical and Computer Engineering*. 2017. Pp. 500-503.
DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100538> .
10. Salinas E., Rezinkina M., Atalaya J. Some 2D–3D aspects of shielding of longitudinal sources of extremely low frequency magnetic fields. *The Environmentalist*. 2009. Vol. 29. No 2. Pp. 141-146.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10669-008-9206-0> .

УДК 621.3.013

СНИЖЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ РЕШЕТЧАТЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ЭКРАНОМ

В.С. Гринченко, канд.техн.наук

ГУ “Институт технических проблем магнетизма НАН Украины”,

ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина,

e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

Рассмотрено снижение магнитного поля трехфазной линии электропередачи при помощи решетчатого электромагнитного экрана, который выполнен из набора проводов, расположенных в одной плоскости и соединенных параллельно. Путем численного моделирования исследованы экранирующие характеристики трех решетчатых экранов эквивалентной металлоемкости, состоящих из разного числа проводов и соответственно имеющих различную площадь поперечного сечения проводов и расстояние между ними. Для обоснования возможности снижения магнитного поля трехфазной линии электропередачи рассчитаны распределения магнитного поля при использовании решетчатого и плоского экранов эквивалентной металлоемкости. Библи. 10, рис. 5.

Ключевые слова: линия электропередачи, магнитное поле, электромагнитный экран, решетчатый экран, численное моделирование.

MITIGATION OF THREE-PHASE POWER LINE MAGNETIC FIELD BY GRID ELECTROMAGNETIC SHIELD

V.S. Grinchenko

State Institution Institute of Technical Problems of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine,

19, Industrialna st., Kharkiv, 61106, Ukraine,

e-mail: vsgrinchenko@gmail.com

This paper deals with the mitigation of the three-phase power line magnetic field by a grid electromagnetic shield. The shield is made of a set of wires located in the same plane and connected in parallel. Shielding characteristics of three equivalent metal capacity grid shields, consisting different number of wires and having different wire cross-sections and different distances between wires, is studied by numerical simulation. To justify the possibility of the three-phase power line magnetic field mitigation, the magnetic field distributions for a grid shield and an equivalent metal capacity flat shield are calculated. References 10, figures 5.

Key words: power line, magnetic field, shielding, electromagnetic shield, grid shield, simulation.

Надійшла 06.03.2018

Остаточний варіант 14.03.2018