

УДК 538.69:331.45

Запорожець Олександр Іванович

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки життєдіяльності
Національний авіаційний університет, Київ

Клапченко Василь Іванович

Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Левченко Лариса Олексіївна

Кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Панова Олена Василівна

Асистент кафедри фізики
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

**СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ЗМІН
ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У БУДІВЛЯХ ТА СПОРУДАХ**

***Анотація.** Досліджено зниження рівня геомагнітного поля у будівлях. Виявлено, що ослаблення геомагнітного поля залежить від загальної маси та просторового розташування феромагнітних елементів конструкцій. Для цілей прогнозування аномалій геомагнітного поля у будівлях на стадії проектування та будівництва доцільне використання моделювання просторових розподілів магнітних полів у приміщеннях. Запропоновано математичний апарат щодо проведення такого моделювання.*

***Ключові слова:** геомагнітне поле; напруженість; індукція; коефіцієнт ослаблення; моделювання; екранування; ослаблення*

Вступ

Дослідження останніх років у галузі електромагнітної безпеки присвячені переважно зменшенню впливу на працівників електромагнітних полів та випромінювань антропогенного походження, тобто полів та випромінювань, генерованих електричним та електронним обладнанням. Значною мірою це пояснюється наявністю надійних експериментальних даних, які свідчать про негативні зміни в організмі людини під впливом цього фізичного фактора. Однак, змінам впливу природного геомагнітного поля на людей уваги не приділялося. Останнім часом проведено низку досліджень, які свідчать про несприятливі зміни здоров'я людей, які постійно перебувають в умовах зниженого (гіпогеомагнітного) поля [1; 2]. Наслідком цього було розроблення і введення в дію міжнародного нормативу з допустимих знижень геомагнітного поля у виробничих та побутових умовах [3]. Системних досліджень щодо рівнів геомагнітних полів у наявних будівлях і спорудах в Україні не проводилось. Вимоги щодо мінімізації спотворень геомагнітного поля у Державних будівельних нормах України відсутні.

Виходячи з цього, актуальною є задача дослідження гіпогеомагнітних полів у введених в експлуатацію будівлях і спорудах та розроблення пропозицій щодо неможливості критичних спотворень геомагнітного поля у будівлях на стадії їх проектування.

Останнє можливе як за рахунок експериментальних досліджень, так і за рахунок моделювання спотворень геомагнітного поля металевими (феромагнітними) конструктивними елементами будівель.

Сучасний стан питання

Останнім часом проведено низку досліджень, в яких на основі експериментальних даних отримані аналітичні моделі просторового розподілу рівнів геомагнітного поля у будівлях [4–6]. У роботі [4] побудовано ізолінії рівнів геомагнітного поля у виробничих приміщеннях, які не пояснюють причин спотворень поля у тій чи іншій точці простору і не надають рекомендацій щодо шляхів нормалізації рівнів геомагнітного поля. У роботі [5] запропоновано моделювання розподілу модуля вектора індукції магнітного поля поблизу вертикальної феромагнітної колони та горизонтальної балки, які мають циліндричну

форму і однакові розміри, а також перебувають у природному геомагнітному полі. В обох випадках вісі балок збігалися з напрямком магнітного меридіану.

Таке моделювання дуже далеко від реальних умов експлуатації будівель та не враховує геометричні параметри феромагнітної конструкції (крім її циліндричності). Крім того, у реальних конструкціях циліндричні колони та горизонтальні балки майже не використовуються. Якщо за такі елементи вважати звичайну арматуру, то розрахунок змін поля відносно одного арматурного елемента немає сенсу через його незначний магнітний вплив. Більш ґрунтовне моделювання просторових змін геомагнітного поля поблизу колон розглядається у роботі [7]. Зокрема, враховується довжина колони і вводяться коефіцієнти ослаблення геомагнітного поля та гіпогеомагнітності.

У той же час у цій роботі моделюється розподіл поля навколо одного конструктивного елемента. Тобто, розглядається окремий випадок і не враховується електромагнітне середовище у приміщенні в цілому залежно від точки її визначення поля.

Мета роботи

Метою роботи є розроблення методичного підходу до моделювання спотворень геомагнітного поля у приміщеннях, будівлях і спорудах в цілому.

Виклад основного матеріалу

Для більшої достовірності моделювання змін геомагнітного поля у будівлях і спорудах доцільне використання як аналітичних залежностей змін поля за наявності феромагнітних конструкцій, так і експериментальних даних. Останнє використовується у якості граничних умов, що дозволяє отримати абсолютні кількісні дані з найменшою похибкою. При цьому бажаним є максимальне спрощення математичного апарата та спирання на фундаментальні фізичні співвідношення. Відомо, що феромагнітні матеріали намагнічуються у постійному магнітному полі. Індуковане магнітне поле спрямоване проти поля, яке його генерувало.

Намагнічування матеріалу J визначається співвідношенням:

$$J = \chi \cdot \mu_0 \vec{H},$$

де χ – магнітна сприйнятливність матеріалу; μ_0 – магнітна стала; \vec{H} – напруженість зовнішнього магнітного поля.

Використовуємо відоме співвідношення з курсу загальної фізики:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \cdot \vec{H},$$

де μ – магнітна проникність матеріалу; \vec{B} – магнітна індукція зовнішнього поля.

Отримуємо зміну сумарного магнітного поля поблизу такого магнітного матеріалу $\Delta \vec{B}$, за умови, що $\chi = \mu - 1$, визначається співвідношенням:

$$\Delta \vec{B} = (\mu - 1) \cdot \mu_0 \vec{H} = \mu_0 \mu \cdot \vec{H} - \mu_0 \cdot \vec{H}.$$

Напрямок індукованого магнітного поля Землі, показано на рис. 1.

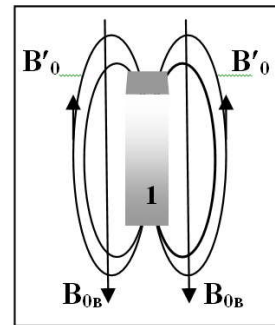


Рисунок 1 – Напрямок індукованого магнітного поля Землі: 1 – феромагнітна конструкція вертикальної орієнтації; B_{0B} – вертикальна складова геомагнітного поля; B'_{0} – індуковане поле феромагнітної конструкції

Розподіл змін індукції геомагнітного поля біля опорної залізобетонної конструкції на п'ятому поверсі виробничої споруди у зоні перебування працюючих (1-1,5 м над підлогою) наведено на рис. 2.

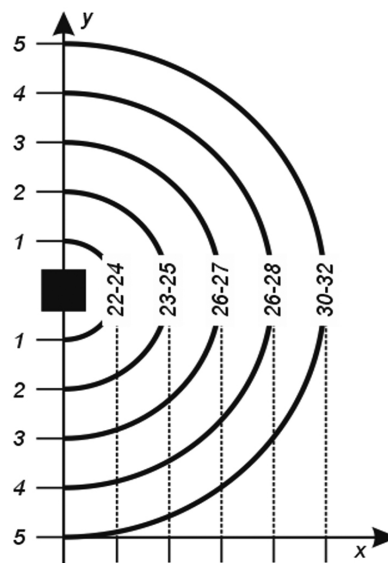


Рисунок 2 – Розподіл змін індукції геомагнітного поля поблизу залізобетонної конструкції (мкТл) у промисловій будівлі: висота над підлогою 1-1,5 м; висота стелі 5 м; висота над рівнем Землі 30 м

Аналогічна картина спостерігається для горизонтальної складової геомагнітного поля. Враховуючи, що результуюча вертикальна складова поля поблизу конструкції становить:

$$\vec{B}_{PB} = \vec{B}_{0B} - \vec{B}'_{0B},$$

відповідно горизонтальна складова поля:

$$\vec{B}_{Pr} = \vec{B}_{0r} - \vec{B}'_{0r},$$

то сумарне поле буде векторною сумою цих складових.

Таким чином, біля середньої частини конструкції слід очікувати зниження рівня поля, а біля її кінців – збільшення. Цей факт підтверджується натурними відмірюваннями з використанням повіреного магнітометра МТМ-01.

Розглянемо структуру зміни геомагнітного поля у місцях примикання вертикальних і горизонтальних елементів конструкцій (наприклад, залізобетонних панелей). Моделювання розподілів поля у таких місцях здійснювалося з використанням пакету програм [8; 9]. Перевагою використання цього програмного забезпечення є спирання на експериментальні дані, що дає малі похибки результатів моделювання відносно натурних вимірювань і забезпечує точність на порядок вищу, ніж у [10]. Результати такого моделювання показано на рис. 3, 4.

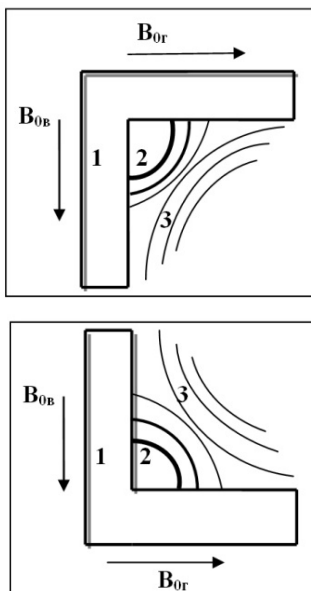


Рисунок 3 – Розподіл модуля вектора магнітної індукції у місцях примикання залізобетонних будівельних конструкцій: 1 – залізобетонна конструкція; 2 – зони підвищеного магнітного поля; 3 – зони зниженого магнітного поля (рисунок не у масштабі)

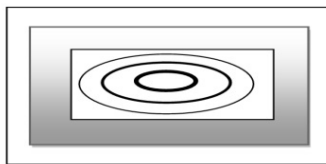


Рисунок 4 – Розподіл результуючого магнітного поля у розрізі приміщення, обмеженого залізобетонними конструкціями (рисунок не у масштабі)

Зниження рівня геомагнітного поля можна змоделювати, враховуючи екранувальні властивості будівельних матеріалів, використаних під час монтажу споруди [11].

Для переважної більшості будівель та приміщень розраховуються коефіцієнти екранування змінних електромагнітних полів. У даному випадку потребує розв'язку окрема пряма задача магнітостатики, а саме – розрахунок напруженості магнітного поля у просторі, захищеному суцільним металевим електромагнітним екраном. За відсутності електрострумів у системі «зовнішній простір – електромагнітний екран» та «екран-захищений простір» магнітне поле у ньому відповідає рівнянню Лапласа: $\Delta \varphi = 0$, (де φ – скалярний потенціал магнітного поля; Δ – оператор Гамільтона).

$$\Delta^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

$$\text{тобто } \Delta^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Для спрощення розрахунків доцільно вважати досліджуваний простір циліндричної форми (рис. 5).

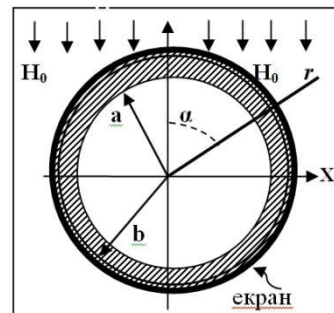


Рисунок 5 – Схема до розрахунку напруженості магнітного поля у екранованому просторі

У циліндричних координатах рівняння має вигляд:

$$\Delta \varphi = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0.$$

Враховуючи, що напрямок z збігається з віссю циліндра:

$$\Delta \varphi = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} = 0. \quad (2)$$

Відомо, що $\vec{H} = -\text{grad} \varphi$. У циліндричній системі координат:

$$\text{grad} \varphi = r_0 \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \alpha_0 \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha}.$$

Умова неперервності потенціалу еквівалентна умові рівності тангенціальних складових напруженості поля на межі поділу за $r = a$, тобто:

$$H_a = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial a}$$

Позначивши напруженість магнітного поля у екранованому просторі H_1 , а потенціал φ та виконавши стандартну процедуру розв'язку рівняння (2), отримуємо значення потенціалу у екранованій зоні:

$$\varphi = H_0 = \frac{2gb^2}{\Delta} \cdot \cos \alpha, \quad q = \frac{2\mu}{(1+\mu)^2} \approx \frac{2}{\mu},$$

де μ – відносна магнітна проникність матеріалу екрана.

$$\Delta = b^2 - \beta^2 a^2, \quad \beta = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \approx 1.$$

Напруженість магнітного поля у екранованому просторі обчислюється:

$$H_1 = H_0 \frac{2gb^2}{\Delta}.$$

Отримано співвідношення, яке приближене через припущення $\beta = 1$ та $q = 2/\mu$.

Для отримання коефіцієнтів екранування вертикальної та горизонтальної складових геомагнітного поля достатньо з прийнятною точністю визначити відносну магнітну проникність відповідного будівельного матеріалу або конструкції, що не складає великих експериментальних труднощів [11].

Коефіцієнтом екранування k вважається відношення напруженості зовнішнього магнітного поля H_0 до напруженості магнітного поля у екранованому просторі H_1 , тобто:

$$k = \frac{H_0}{H_1} = \frac{\mu(b^2 - a^2)}{4b^2}.$$

Досвід натурних вимірювань та моделювання просторових розподілів електромагнітних полів різних джерел свідчить, що для великих розмірів приміщення у реальних виробничих умовах використання припущення щодо циліндричної форми не дає суттєвої похибки і цілком виправдане.

Враховуючи, що ступінь спотвореності геомагнітного поля (зниження його рівня) напряму залежить від довжини як вертикальних, так і горизонтальних конструкцій, найбільш дієвим методом зниження такого ефекту є використання немагнітних вставок у феромагнітні конструкції. Це значно ускладнює моделювання розглянутого явища і є предметом перспективних досліджень.

Перспективним, на нашу думку, є використання конструкційних сталей з мінімальними магнітними проникностями (наприклад, 45Г17Ю3), які широко використовуються у суднобудівній промисловості: їх міцнісні характеристики практично аналогічні властивостям традиційних будівельних конструкційних сталей [12]. Такі сталі доцільно використовувати для проектування та будівництва споруд, в яких спотворення геомагнітного поля прогнозовано критично.

Важливим є врахування впливу статичних магнітних полів, генерованих технологічним обладнанням будівель, що потребує подальших досліджень з цієї проблематики.

Висновок

У будівлях і спорудах, побудованих з використанням великої кількості феромагнітних матеріалів, відбувається спотворення геомагнітного поля. У місцях примикання вертикальних та горизонтальних елементів конструкцій відбувається підвищення рівнів геомагнітного поля, а на відстанях від місць примикань – його зниження до рівнів, заборонених чинними нормативними актами.

Отримані експериментальні результати дозволили сформулювати підходи до моделювання просторових розподілів спотвореного геомагнітного поля у будівлях та спорудах. Запропонований математичний апарат на основі теорії екранування магнітних полів дозволяє здійснювати моделювання спотворення геомагнітного поля на стадії проектування будівлі.

Список літератури

1. Походзей Л.В. *Гипогеомагнитные поля как неблагоприятный фактор производственной среды: диссертация на соискание учёной степени докт. мед. наук: спец. 14.00.50 – Медицина труда / Л.В. Походзей. – М., ГУ НИИ медицины труда РосАМН. – 2004. – 198 с.*
2. Резинкина М.М. *Ослабление геомагнитного поля в многоквартирных домах различных проектов / М.М. Резинкина, Д.Е. Пелевин, Ю.Д. Думанский, С.В. Биткин // Гигиена населенных мест. – 2009. – Вып. 54. – С. 209–216.*
3. *Standard of Building Biology Biology Testing Methods: SBM–2008 – [acting from July 2008]. – Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008. – 5p. (<http://www.createhealthyhomes.com/SBM–2008.pdf>)*
4. Розов В.Ю. *Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определения путей их снижения до безопасного уровня / В.Ю. Розов, М.М. Резинкин, Ю.Д. Думанский, Л.А. Гвозденко // Технічна електродинаміка. Темат. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 2 – С. 3–8.*
5. Розов В.Ю. *Экспериментальные явления исследования ослабления статического геомагнитного поля в помещениях / В.Ю. Розов, Д.Е. Пелевин, С.В. Левина // Електротехніка і електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 70–75.*

6. Сердюк А.М. Екологічна значущість геомагнітного поля та медично-біологічні передумови гігієнічної регламентації його послаблення в умовах України / А.М. Сердюк, П.Є Григор'єв, В.Я. Акіменко, С.В. Протас // Довкілля і здоров'я. – 2010. – № 3. – С. 8–11.
7. Розов В.Ю. Исследование явления ослабления статистического геомагнитного поля стальной колонной // В.Ю. Розов, С.Ю. Реуцкий, С.В. Левина // Техн. электродинамика. – 2014. – № 1 – С. 12–19.
8. Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>
9. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach.–Jones and Bartlett Publishers, 2009. – 872 p.
10. Кузнецов А.В. Влияние строительных конструкций и этажности зданий на геомагнитного поле внутри помещений в г. Томске / А.В. Кузнецов, С.А. Карауш // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – №1. – С. 80–85.
11. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням: дис. ... канд.техн.наук: 05.26.01 / Панова Олена Василівна – К., 2014. – 151 с.
12. Тихонов Л.В. Механические свойства металлов и сплавов / [Л.В. Тихонов, В.А. Кононенко, Г.И. Прокопенко, В.А. Рафаловский]. – К.: Наукова думка, 1986. – 567 с.

Стаття надійшла до редколегії 22.01.2015

Рецензент: д-р техн. наук, доц. В. А. Глива, Національний авіаційний університет, Київ.

Запорожец Александр Иванович

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности
Национальный авиационный университет, Киев

Клапченко Василий Иванович

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой физики
Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

Левченко Лариса Алексеевна

Кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации проектирования энергетических процессов и систем
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев

Панова Елена Васильевна

Ассистент кафедры физики
Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ**

Аннотация. Исследовано снижение уровня геомагнитного поля в зданиях. Обнаружено, что ослабление геомагнитного поля зависит от общей массы и пространственного расположения ферромагнитных элементов конструкций. С целью прогнозирования аномалий геомагнитного поля в зданиях на стадии проектирования и строительства целесообразно использование моделирования пространственных распределений магнитных полей в помещениях. Предложен математический аппарат по проведению такого моделирования.

Ключевые слова: геомагнитное поле; напряжённость; индукция; коэффициент ослабления; моделирование; экранирование; ослабление

Zaporozhets A.I.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Life Safety
National Aviation University, Kiev

Klapchenko V.I.

Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Physics
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Levchenko L.A.

PhD, associate professor, assistant professor of design automation systems and energy processes
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev

Panova E.V.

Assistant of the Department of Physics
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

**CURRENT APPROACHES TO MODELING SPATIAL CHANGES IN THE GEOMAGNETIC FIELD
IN THE BUILDINGS AND STRUCTURES**

Abstract. In the paper it is investigated a decrease in the level of the terrestrial magnetic field in the buildings of different designation. The weakening of the geomagnetic field is dependent upon the amount of ferromagnetic masses of building structures, building materials and magnetic permeability coefficient of demagnetization, which is determined by the shape of the boundary surface of the object and its spatial orientation relative to the geomagnetic field induction vector. In many habitable buildings and buildings of another designation there is a decrease in the geomagnetic field, which does not correspond to the restriction on extreme deviation of the static magnetic field from the natural, recommended international standard. Meanwhile in the places of the contiguity of the vertical and horizontal elements of structures there are occurs raising of levels of the terrestrial magnetic field, and at the distances from the places of contiguities - their decrease. There are obtained the quantitative values of the distribution of the distorted terrestrial magnetic field in the accommodations. Simulation is the most effective method of predicting the distributions of the structures of the terrestrial magnetic field. Especially this is important for the designers of the construction objects, which use different types of building materials, which makes it possible to consider the anomalies of the terrestrial magnetic field in the buildings. Simple in the use mathematical apparatus for determining the coefficient of weakening the terrestrial magnetic field in the separate types of accommodations had developed. On the basis of these studies it is proposed to use structural steels with the minimum magnetic permeability, which has nonmagnetic inserts in the ferromagnetic constructions. Such steels are used in construction to reduce the distortions in the geomagnetic field.

Keywords: geomagnetic field, intensity, induction, attenuation coefficient, modeling, shielding, attenuation.

References

1. Pokhodzei, L.V. (2004). *Gipogeomagnitnye catches as an adverse factor in the production environment*. Doctor's thesis. Moscow: Institute of Occupational Medicine Russian Academy of Medical Sciences.
2. Rezinkina, M.M. (2009). *The weakening of the geomagnetic field in apartment buildings of various projects*. / Rezinkina, M.M., Pelevin, D.E., Dumanskiy, Y.D., Bitkin S.V. // *Hygiene human cities*, 54, 209–216. [In Russian].
3. *Standard of Building Biology Biology Testing Methods: SBM (2008) – [acting from July 2008]*. – Germany: Institut für Baubiologie +Ökologie IBN, 5p. (<http://www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf>)
4. Rozov, V.Yu. (2008). *The study of man-caused distortions in the geomagnetic field of residential and industrial buildings and to identify ways to reduce them to a safe level*/Rozov, V.Yu., Rezinkina, M.M., Dumanskiy, Yu.D, Glozdenko, L.A. // *Technical Electrodynamics. Thematic Issue "Problems of modern electrical engineering"*, 2, 3–8.
5. Rozov, V.Yu. (2013). *Experimental studies of the phenomenon of weakening static geomagnetic field in the smokers* / Rozov, V.Yu, Pelevin, D.E, Levina, S.V. // *Elektrotehnika i elektrodinamika*, 6, 70–75.
6. Serdiuk, A.M. (2010). *The ecological significance of the geomagnetic field and medical-biological conditions of the hygienic regulation of its weakening in Ukraine* / Serdiuk A.M., Grigoriev, P.Ye, Akimenko, V.Ya., Protas, S.V. // *Environment and Health*, 3, 8–11.
7. Rozov, V.Yu. (2014). *Investigation of statistical geomagnetic field weakening steel column* / Rozov, V.Yu., Reutskiy, S.Y., Levina, S.V. // *Technical Electrodynamics*, 1, 12–19.
8. *Comsol Multiphysics – <http://www.comsol.com>*
9. Pryor, R.W. (2009). *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*.–Jones and Bartlett Publishers, 872.
10. Kuznetsov, A.V. (2012). *Influence of building structures and the number of storey's of buildings on the geomagnetic field inside the premises in Tomsk* /Kuznetsov, A.V., Karaush, S.A.// *Bulletin of the Tomsk State Architectural University*, 1, 80–85.
11. Panova, E.V. (2014). *Protection of workers from exposure to electromagnetic fields via shielding*. Candidate's thesis. Kiev.
12. Tikhonov L.V., V.A. Kononenko, G.I. Prokopenko, V.A. Rafalovsky. (1986). *Mechanical properties of metals and alloys*. *Scientific Thought*, 567.

Посилання на публікацію

- APA Zaporozhets A.I, Klapchenko V.I., Levchenko L.A., & Panova E.V. (2015). *Current approaches to modeling spatial changes in the geomagnetic field in the buildings and structures*. *Management of Development of Complex Systems, Issue 21*, P. 133 – 138 [in Ukrainian].
- ГОСТ Запорожець О.І. *Сучасні підходи до моделювання просторових змін геомагнітного поля у будівлях та спорудах [Текст]* / О.І. Запорожець, В.І. Кляпченко, Л.О. Левченко, О.В. Панова // *Управління розвитком складних систем*. – 2015. - № 21. – С. 133 - 138.