

ТОНКИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ЕКРАН КОМПОЗИЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ, ВИКОНАНИЙ НА ОСНОВІ МАГНІТНОЇ РІДИНИ

В.А. Глива¹, докт.техн.наук, О.Д. Подольцев^{2*}, докт.техн.наук, Б.В. Болібрух³, докт.техн. наук, О.В. Радіонов⁴, канд.техн.наук

¹ Національний авіаційний університет,
пр. Космонавта Комарова, 1, Київ-58, 03058, Україна,

² Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: podol@ied.org.ua

³ Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

⁴ НППВ «Ферогідродинаміка»,
вул. Велика Морська, 45/5, Миколаїв, 54030, Україна

Розроблено тонкий електромагнітний екран (товщиною 0,25 – 0,5 мм), що має композиційну структуру і виконаний на основі магнітної рідини, нанесеної на діелектричну основу. Проведено експериментальні дослідження його екрануючих і електромагнітних властивостей. Показано, що коефіцієнт екранування низькочастотного магнітного поля для такого екрана складає 2,4 – 7,8, а для надвисокочастотного магнітного поля – 3,0 – 9,3, причому значення цих коефіцієнтів залежать від товщини екрана. Для визначення ефективної магнітної проникності композиційного матеріалу екрана запропоновано розрахунково-експериментальний метод, який використовує відоме аналітичне рішення магнітостатичної задачі для тонкої сферичної оболонки, що знаходиться у постійному магнітному полі, та результати вимірювання коефіцієнтів екранування для екрана сферичної (або близької до сферичної) форми. Отримані відносні значення ефективної магнітної проникності матеріалу для випадку низькочастотного магнітного поля становлять 420 – 1050. Ці значення слабо залежать від товщини екрана. Бібл. 10, табл. 2, рис. 2.

Ключові слова: електромагнітний екран, композиційний матеріал, магнітна рідина, коефіцієнт екранування, ефективна магнітна проникність.

Вступ. Дослідження останніх років показали, що електромагнітні поля стають одним із основних фізичних факторів несприятливого впливу на людей, тому дослідження і прикладні розробки в сфері електромагнітної безпеки є актуальними. На сьогодні традиційні методи захисту від електромагнітних полів за рахунок скорочення часу перебування у полі й збільшення відстані до джерела поля практично вичерпані. В таких умовах найбільш раціональним підходом є екранування електричних, магнітних й електромагнітних полів спеціальними захисними екранами. Незважаючи на значну кількість досліджень і розробок у цій галузі, недостатньо розробленими залишається багато аспектів загальної проблеми екранування – недостатньо висока ефективність екранів, незадовільні співвідношення коефіцієнтів поглинання й відбиття, великі вага і товщина екранів, висока вартість тощо.

Стан проблеми та постановка задачі. Традиційні матеріали, які рекомендуються для виготовлення електромагнітних екранів національними нормативними актами, алюмінієві та мідні сплави, сталі й пермалой не відповідають сучасним вимогам в основному через високі відбивальні спроможності й малі значення коефіцієнта поглинання. Тобто екранування здійснюється за рахунок відбиття електромагнітних хвиль, що підвищує щільність потоку енергії в інших (незахищених) зонах. Винятком є пермалой, однак його недоліком є значне зниження захисних властивостей при малих деформаціях. Цих недоліків позбавлені аморфні магнітом'які сплави. Але через специфіку технологічних процесів їхнього виготовлення такі матеріали можна виготовляти тільки у вигляді вузьких стрічок, що не зовсім зручно для практичного застосування [1]. До того ж він є дуже дорогим у виробництві. Останнім часом багато уваги приділяється захисним матеріалам на основі феритів [2]. Їхнім недоліком у цьому випадку є значна товщина при необхідності забезпечення високих значень коефіцієнтів екранування і «провали» захисних властивостей у смугах частот через резонансний характер поглинання електромагнітної енергії.

Розробки, представлені в дослідженнях [3, 4], мають спеціалізоване застосування для вузьких частотних смуг і забезпечують захист в основному за рахунок відбиття електромагнітних хвиль. У роботах [5, 6] показано, що застосування металовмісних наночастинок як наповнювача в полімерній матриці значно підвищує захисні властивості матеріалу й забезпечує прийнятні значення коефіцієнтів відбиття. Однак процес синтезу наночастинок безпосередньо в тілі матеріалу є складним і вартісним, а екран з такого матеріалу має значну товщину. Але такий підхід до підвищення функціональних можливостей електромагнітних екранів є перспектив-

ним. У роботах [7, 8] показано, що зі зменшенням розмірів металевих та металовмісних частинок значення коефіцієнтів відбиття істотно знижуються. При цьому при використанні частинок розмірами 5-10 мкм загальний коефіцієнт екранування незначно знижується в порівнянні з частинками розмірами 50-100 мкм, а при використанні частинок розмірами 100-300 нм обидва параметри поліпшуються.

Таким чином, актуальним є обґрунтування захисних властивостей композиційних матеріалів на основі металевих і металовмісних частинок високої дисперсності, які забезпечують необхідні значення коефіцієнта екранування при відносно малій товщині екрана.

Метою цієї роботи є дослідження можливості створення тонкого електромагнітного екрана композиційної структури, виконаного на основі магнітної рідини, нанесеної на діелектричну основу, експериментальне дослідження його електромагнітних і екрануючих властивостей, а також визначення ефективної магнітної проникності композиційного матеріалу такого екрана за допомогою запропонованого розрахунково-експериментального методу.

Експериментальне дослідження електромагнітних властивостей тонкого екрана на основі магнітної рідини. Відомо, що магнітне змінне поле є основним фактором несприятливого впливу на біологічні об'єкти. При цьому його екранування є більш складним, ніж екранування змінного електричного поля, а найбільш небезпечними є електромагнітні поля надвисокої частоти. Тому завданням цього дослідження є отримання і визначення захисних властивостей матеріалу на основі магнітної рідини щодо магнітного поля промислової частоти і надвисокочастотного поля.

Для виготовлення електромагнітного екрана у роботі використовувалася магнітна рідина ПЕС-3 виробництва ТОВ «НВВП «Ферогідродинаміка», м. Миколаїв, яка є однорідною суспензією з наповнювачем із полідисперсних частинок магнетиту середнім розміром 8-10 нм. Такі розміри частинок забезпечують хорошу адгезію з поверхнею практично будь-якого матеріалу. Був виготовлений замкнутий екран у формі паралелепіпеда розміром 10×10×10 см з діелектричного матеріалу (картону), на поверхню якого наносився один або два шари магнітної рідини. Вимірювальна антена розміщувалася у центрі внутрішньої області екрана крізь спеціальний технологічний отвір, який щільно закривався. Як джерело низькочастотного магнітного поля використовувався стабілізатор напруги, величина струму в якому змінювалася в широких межах. Вимірювання проводилися з використанням спеціалізованих вимірювальних приладів. Напруженості магнітного поля промислової частоти вимірювалися за допомогою вимірника ПЗ-50. Щільність потоку енергії – за допомогою приладу ПЗ-31. Похибка вимірювань в обох випадках не перевищувала 20%.

Результати вимірювань захисних властивостей такого екрана для магнітного поля промислової частоти для двох екранів різної товщини наведені в табл. 1 та 2.

Товщина екрана Δ , мм	Магнітне поле без екрана H_0 , А/м	Магнітне поле з екраном H_S , А/м	Коефіцієнт екранування $K_S = H_0/H_S$	Розраховане значення μ_{eff}
0,25	60-62	25-26	2,4	420
	40-43	16-18	2,44	440
	30-33	12-13	2,52	460
	20-24	6-7	3,4	720
	10-11	3,2-3,4	3,2	680
0,50	60-65	14-16	4,2	480
	40-42	11-12	3,6	400
	30-34	6-7	4,9	600
	20-24	4-5	4,9	600
	10-12	1,2-1,6	7,8	1050

Товщина екрана Δ , мм	Щільність потоку потужності поля без екрана W_0 , мкВт/см ²	Щільність потоку потужності поля з екраном W_S , мкВт/см ²	$K_W = W_0/W_S$
0,25	120-130	38-45	3
	80-90	18-22	4,25
	30-35	3-4	9,3
	10-15	2-3	5
	120-130	27-30	4,4
0,50	80-90	15-18	5,2
	30-35	5-6	5,9
	10-15	1-2	8,3
	10-15	1-2	8,3

Потрібно відзначити, що товщина екрана є досить умовною. Вона розраховувалася, виходячи з кількості магнітної рідини, що наноситься на певну поверхню. При цьому не враховувалося проникнення частинок всередину цієї поверхні. У табл. 1 також наведено отримані значення коефіцієнта екранування по магнітному полю $K_S = H_0/H_S$, де H_0 , H_S відповідно напруженість магнітного поля за відсутності та за наявності екрана. Як видно з табл. 1, при збільшенні товщини екрана збільшуються значення коефіцієнта екранування.

Вимірювання за стандартною методикою щільності потоку потужності електромагнітного поля без екрана W_0 та з екраном W_S були проведені для електромагнітного поля надвисокої частоти 1,8 – 2,4 ГГц, яка відповідає робочим частотам найбільш поширених засобів бездротового зв'язку. Результати наведено у табл. 2.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що один і той же матеріал дає змогу отримати гарантовані значення для коефіцієнта екранування магнітного поля промислової частоти $K_S = 2,4 – 7,8$, а для електромагнітного поля надвисокої частоти $K_W = 3,0 – 9,3$. Цього для більшості виробничих умов цілком достатньо.

Додатково були проведені вимірювання значень коефіцієнта відбиття електромагнітного поля на частоті 1,8 ГГц. Для цього екран розмірами 0,75×0,75 м розташовувався у хвильовій зоні джерела, вимірювальна антена – між джерелом і екраном. Результати свідчать, що для шарів обох товщин коефіцієнти відбиття не перевищують 0,15 – 0,25. Навіть з огляду на малу площу екрана, що може внести певну похибку у вимірювання, такий результат можна вважати цілком прийнятним у порівнянні з раніше отриманими результатами [8]. Очевидно, це пов'язано не тільки з розмірами частинок захисного шару, а й з щільністю їхньої упаковки.

Визначення ефективної магнітної проникності матеріалу екрана. Для проектування у кожному конкретному випадку системи екранування на основі магнітної рідини необхідно мати значення ефективної магнітної проникності μ_{eff} матеріалу такого екрана. Через те, що цей матеріал має композиційну структуру, у загальному випадку для розрахунку μ_{eff} можуть використовуватися методи, описано у роботі [9], де пропонується використовувати інший розрахунково-експериментальний метод визначення μ_{eff} матеріалу екрана, заснований на використанні експериментально отриманих значень коефіцієнта екранування і відомого аналітичного виразу для екрануючої дії тонкої оболонки сферичної форми.

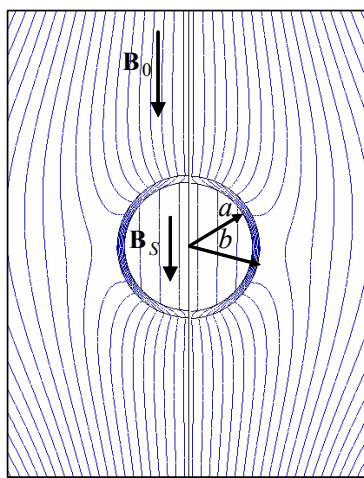


Рис. 1

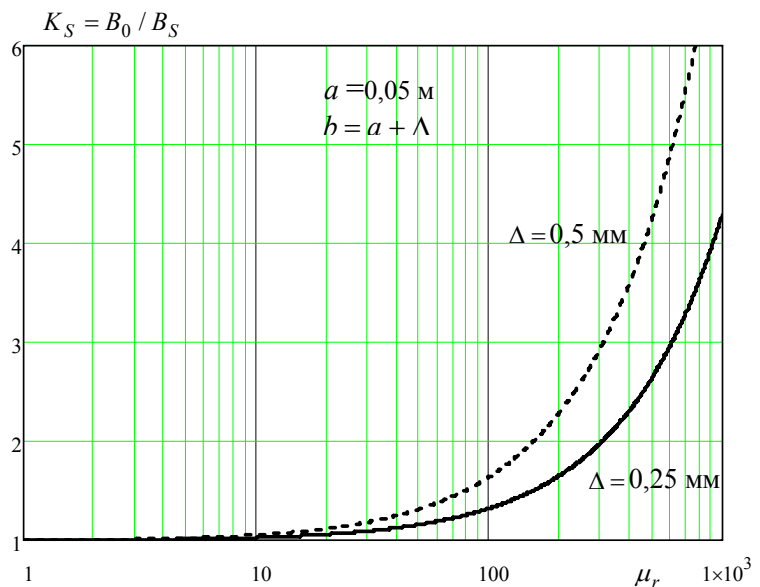


Рис. 2

Тонка сферична оболонка, що знаходиться у зовнішньому, просторово однорідному та постійному за часом магнітному полі B_0 (рис. 1), характеризується однорідним розподілом магнітного поля у її внутрішній області B_S , значення якого визначається на основі наступного відомого виразу [10]:

$$B_S = \frac{9\mu_r}{(2\mu_r + 1)(\mu_r + 2) - 2(\mu_r - 1)^2(a/b)^3} B_0,$$

де $B_{0,S} = |B_{0,S}|$ – модель вектора магнітної індукції, μ_r – відносне значення магнітної проникності оболонки, a і b – радіуси внутрішньої і зовнішньої сфери оболонки відповідно. Звідси залежність коефіцієнта екранування від величини μ_r має вигляд

$$K_S = H_0 / H_S = B_0 / B_S = \left(\frac{9\mu_r}{(2\mu_r + 1)(\mu_r + 2) - 2(\mu_r - 1)^2(a/b)^3} \right)^{-1}. \quad (1)$$

Графічне представлення цієї залежності для сферичного екрана з розмірами $2a=0,1$ м і $b = a + \Delta$, де $\Delta = 0,25$ і $0,5$ мм – товщина екрана, показано на рис. 2. З використанням цих залежностей може бути вирішена зворотна задача – за вимірними значеннями коефіцієнта екранування K_S . Використовуючи аналітичну залежність (1) або відповідну їй графічну на рис. 2 для екрана заданих розмірів, можна визначити ефективну магнітну проникність матеріалу екрана $\mu_{eff} = \mu_r$.

Отримані за вказаною методикою значення μ_{eff} наведені у табл. 1, права колонка. Тут використовувалися такі припущення: 1) використовуваний на практиці екран у формі куба може розглядатися як екран сферичної форми; 2) процеси у матеріалі екрана, що відбуваються в низькочастотному полі, можуть розглядатися у магнітостатичному наближенні.

З табл. 1 видно, що матеріал екрана характеризується відносно високими значеннями ефективної магнітної проникності $\mu_{eff} = 420 - 1050$, тоді як характерне значення магнітної проникності магнітної рідини становить $\sim 2-10$. Це пов'язано з тим, що базова рідина та частинки малих розмірів проникають всередину матеріалу екрана, а найбільші частинки лишаються на його поверхні, призводячи до зростання їхньої концентрації у поверхневому шару. З таблиці також видно, що товщина екрана слабо впливає на значення μ_{eff} , тобто об'ємні концентрації магнітних частинок в екрані, а також структура їхнього розташування, яка також може впливати на це значення, приблизно однакові в екранах товщиною 0,25 і 0,5 мм.

Висновки.

1. У роботі запропоновано відносно простий спосіб виготовлення тонкого електромагнітного екрана (товщиною 0,25 – 0,5 мм), що має композиційну структуру і виконаний на основі магнітної рідини, нанесеної на діелектричну основу. Проведено експериментальні дослідження екрануючих властивостей такого матеріалу. Для визначення ефективної магнітної проникності матеріалу екрана у роботі запропоновано розрахунково-експериментальний метод, який використовує відоме аналітичне рішення магнітостатичної задачі для тонкої сферичної оболонки, а також отримано результати вимірювання коефіцієнтів екранування для екрана сферичної (або близької до сферичної) форми. Ці результати є основою прогнозування захисних властивостей екрана при його конструюванні.

2. Отримані експериментальні значення коефіцієнтів екранування для розробленого електромагнітного екрана різної товщини становлять 2,4 – 7,8 для низькочастотного магнітного поля і 3,0 – 9,3 для високочастотного магнітного поля. Показано, що розрахункові значення ефективної магнітної проникності композиційного матеріалу екрана становлять $\mu_{eff} = 420 - 1050$, причому ці значення слабо залежать від товщини екрана.

3. Одержані дані свідчать, що запропонований тонкий екран на основі магнітної рідини має достатньо високі значення коефіцієнтів екранування магнітного та електромагнітного поля. Перспективність використання такого матеріалу обумовлена можливістю одержання шару малої товщини та простотою нанесення матеріалу на різні поверхні, наприклад, на стіни промислових приміщень з метою захисту персоналу від впливу зовнішнього електромагнітного поля.

1. Левченко О.Г., Левчук В.К., Тимошенко О.Н. Экранирующие материалы и средства индивидуальной защиты сварщика от магнитных полей. *Автоматическая сварка*. 2011. № 3. С.49– 55.
2. Patil N., Velhal N. Pawar R. Puri V. Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate. *Microelectronics International*. 2015. Iss. 32(1). Pp. 25–31.
3. Kasar V., Pawar A. Novel Approach to Electromagnetic Interference Shielding for Cell Phones. *International Journal of Science and Research*. 2014. Iss. 3. Pp. 1869–1872.
4. Singh J. Computer Generated Energy Effects on Users and Shielding Interference. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2015. Iss.3. Pp. 10022–10027.
5. Fionov A.S., Yurkov G.Y., Popko O.V., Kosobudskii I.D., Taratanov N.A., Potemkina O.V. Polymer nanocomposites: synthesis and physical properties. *Advances in Composite Materials or Medicine and Nanotechnology*. Rijeka, Croatia: IN-TECH Education and Publishing, 2011. Pp. 343–364.
6. Таранов Н.А., Юрков Г.Ю., Кособудский И.Д. Синтез ренийсодержащих наночастиц на поверхности микрогранул политетрафторэтилена. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2010. № 44. С. 95-101.
7. Богуш В.А., Борботько Т.В., Насонов Н.В. Экраны электромагнитного излучения на основе магнитных материалов. Технологии. Конструкции. Применение. Минск: Бестпринт, 2016. 222 с.
8. Глива В.А., Лапшин О.С., Коваленко В.В., Худик М.В. Дослідження захисних властивостей електромагнітних екранів на основі дрібнодисперсного заліза та його сполук. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2017. № 1(40). С. 123 – 127.
9. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. Киев: Институт электродинамики, 2011. 256 с.
10. Джексон Дж. Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965. 702 с.

УДК 538.69:331.45

ТОНКИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЭКРАН КОМПОЗИЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ, ВЫПОЛНЕННЫЙ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

В.А.Глыва¹, докт.техн.наук, **А.Д.Подольцев²**, докт.техн.наук, **Б.В.Болибрух³**, докт.техн.наук, **А.В.Радионон⁴**, канд. техн.наук

¹ **Национальный авиационный университет,**

пр. Космонавта Комарова, 1, Киев-58, 03058, Украина,

² **Институт электродинамики НАН Украины,**

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: podol@ied.org.ua

³ **Национальный университет «Львовская политехника»,**

ул. Степана Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина.

⁴ **НПВП «Феррогидродинамика»,**

ул. Большая Морская, 45/5, Николаев, 54030, Украина.

Разработан тонкий электромагнитный экран (толщиной 0,25 – 0,5 мм), имеющий композиционную структуру и выполненный на основе магнитной жидкости, нанесенной на диэлектрическую основу. Проведены экспери-

ментальные исследования его экранирующих и электромагнитных свойств. Показано, что коэффициент экранирования низкочастотного магнитного поля для такого экрана составляет 2,4–7,8, а коэффициент экранирования для сверхвысокочастотного магнитного поля – 3,0 – 9,3, причем значения этих коэффициентов зависят от толщины экрана. Для определения эффективной магнитной проницаемости композиционного материала экрана предложен расчетно-экспериментальный метод, использующий известное аналитическое решение магнитостатической задачи для тонкой сферической оболочки и результаты измерения коэффициентов экранирования для экрана сферической (или близкой к сферической) формы. Полученные относительные значения эффективной магнитной проницаемости материала для случая низкочастотного магнитного поля составляют 420 – 1050. Эти значения слабо зависят от толщины экрана. Библ. 10, табл. 2, рис. 2.

Ключевые слова: электромагнитный экран, композиционный материал, магнитная жидкость, коэффициент экранирования, эффективная магнитная проницаемость.

A THIN ELECTROMAGNETIC SHIELD OF A COMPOSITE STRUCTURE MADE ON THE BASIS OF A MAGNETIC FLUID

V.A.Glyva¹, A.D.Podoltsev², B.V.Bolibrukh³, A.V.Radionov⁴

¹National Aviation University,

Kosmonavta Komarova ave., 1, Kyiv-58, 03058, Ukraine.

²Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: podol@ied.org.ua

³Lviv Polytechnic National University,

Stepana Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine.

⁴SIIE "Ferrohydrodynamica",

B. Morskaya str., 45/5, Mykolayiv, 54030, Ukraine.

A thin electromagnetic shield (0.25 – 0.50 mm thick) were developed, which has a composite structure and was made on a magnetic fluid deposited on a dielectric substrate. Experimental researches of its shielding and electromagnetic properties were carried out. It is shown that the screening coefficient of a low-frequency magnetic field for such a screen is 2.4 – 7.8. The screening coefficient for an ultrahigh-frequency magnetic field is 3.0 – 9.3. The values of these coefficients depend on the thickness of the screen.

The calculation-experimental method is proposed for the determine of the effective magnetic permeability of the composite screen material. This method is using the well-known analytical solution of the magnetostatic problem for a thin spherical shell and the results of measuring screening coefficients for a screen of spherical (or nearly spherical) shape. The obtained relative values of the magnetic permeability of the material for the case of a low-frequency magnetic field are 420 – 1050. These values depend little on the thickness of the screen. References 10, table 2, figures 2.

Key words: electromagnetic screen, composite material, magnetic fluid, screening coefficient, effective magnetic permeability.

1. Levchenko O.G. Levchuk V.K., Timoshenko O.N. Shielding materials and means of individual protection of the welder from magnetic fields. *Avtomaticheskaja svarka*. 2011. No 3. Pp. 49–55. (Rus)
2. Patil N., Velhal N. Pawar R. Puri V. Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate. *Microelectronics International*. 2015. Iss. 32(1). Pp. 25–31.
3. Kasar V., Pawar A. Novel Approach to Electromagnetic Interference Shielding for Cell Phones. *International Journal of Science and Research*. 2014. Iss. 3. Pp. 1869–1872.
4. Singh J. Computer Generated Energy Effects on Users and Shielding Interference. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2015. Iss.3. Pp. 10022–10027.
5. Fionov A.S., Yurkov G.Y., Popko O.V., Kosobudskii I.D., Taratanov N.A., Potemkina O.V. Polymer nanocomposites: synthesis and physical properties. *Advances in Composite Materials or Medicine and Nanotechnology*. Rijeka, Croatia: IN-TECH Education and Publishing, 2011. Pp. 343–364.
6. Taranov N.V., Yurkov G.Yu., Kosobudsky I.D. Synthesis of rhenium-containing nanoparticles on the surface of polytetrafluoroethylene microgranules. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. No 44. Pp. 95-101. (Rus)
7. Bogush V.A., Borbotko T.V., Nasonov N.V. Electromagnetic radiation screens based on magnetic materials. Technologies. Constructions. Application. Minsk: Bestprint. 2016. 222 p. (Rus)
8. Glyva V., Lapshin O., Kovalenko V., Khudik M. Investigation of protective properties of electromagnetic screens based on finely divided iron and its compounds. *Visti Donetskoho girnychoho instytutu*. 2017. No 1(40). Pp. 123 – 127. (Ukr)
9. Podoltsev A. Kucheryava I. Multiscale modeling in electrical engineering. Kiev: Institute of elektrodynamics NAS of Ukraine. 2011. 256 p. (Ukr)
10. Jackson J. Classical Electrodynamics. Moskva. Mir, 1965. 702 p.

Надійшла 06.03.2018

Остаточний варіант 03.04.2018