

УДК 519.876.5:621.374(045)

**МОДЕЛЮВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ
У БАГАТОШАРОВИХ НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ****В. Т. Чемерис**, канд. техн. наук; **І. О. Бородій**,**Г. Є. Маринченко**, канд. техн. наук

Національний авіаційний університет Україна

vchemer@voliacable.com

Аналіз імпульсного поля в багатошарових неоднорідних середовищах можливий на основі напіваналітичних методів із застосуванням прийомів «гомогенізації» для визначення еквівалентних параметрів середовища, однак більш продуктивним є створення адекватних до об'єкта багатошарових моделей та їх пряме числове моделювання, оскільки при цьому існує можливість розгляду як дифузійних, так і хвильових процесів проникнення поля в кожний шар і в середовище в цілому. Практичне втілення таких методів прямого моделювання пов'язане з необхідністю побудови моделі реального об'єкта у великому масштабі з використанням принципів подібності поля.

Ключові слова: багатошарові середовища, ферромагнітні осердя, неоднорідні провідники, моделювання імпульсного поля.

Analysis of the pulsed field inside of the multi-layer non-uniform media is possible by semi-analytical method at using the 'homogenization' principle for equivalent parameters of media, but the building of adequate multi-layer model and immediate numerical simulation is much more productive due to possibility to take into consideration both diffusion and wave processes of field penetration into each layer and whole medium. Implementation of such direct simulation is connected with necessity to realize the real object in large scale on the base of the field similarity principles.

Keywords: multi-layer media, ferromagnetic cores, composite conductors, pulsed field simulation.

Вступ

Моделювання імпульсних електромагнітних процесів у багатошарових неоднорідних середовищах дає змогу проаналізувати перебіг процесів дифузії поля, а іноді і хвильових процесів у таких середовищах.

Програмні засоби для моделювання цих процесів повинні задовольняти спеціальні вимоги.

По-перше, роздільна здатність програми при створенні розрахункової моделі повинна бути достатньою для відображення просторового масштабу неоднорідностей модельованого об'єкта. Цю вимогу за необхідності можна задовольнити шляхом застосування теорії подібності.

По-друге, в програмі має бути передбачена можливість введення даних про нелінійні властивості шарів, що утворюють модель, а в разі використання усереднених параметрів шарів — ще й даних про анізотропію цих властивостей.

Крім того, важливою перевагою деяких програм є можливість задання швидкості відносного переміщення складових частин (або шарів) моделі.

Це передбачено далеко не в кожній програмі.

У табл. 1 наведено порівняльні дані про найпоширеніші і найдоступніші програмні пакети комерційного характеру (Comsol, QuickField, Elcut, FlexPDE тощо), на підставі яких можна судити про придатність цих програм для розв'язання задач такого класу.

До найбільш характерних технічних об'єктів моделювання з багатошаровою неоднорідною структурою можна віднести дрібношихтовані ферромагнітні осердя (з товщиною шарів аморфного ферромагнетика 12 ... 24 мкм, нанесеного на полімерну основу товщиною 4 ... 6 мкм), що застосовуються в індукторних системах індукційних прискорювачів електронів і в імпульсних трансформаторах для наносекундних і мікросекундних імпульсів, а також композитні (багатошарові) провідники для застосування в апаратурі комутації великих струмів.

Обидва класи об'єктів моделювання характеризуються часом проникнення електромагнітного поля в магнітопровід або струмопровід, співрозмірним з тривалістю робочого імпульсу, у зв'язку з чим виникає питання про ефективність використання поперечних перерізів магнітопроводів або струмопроводів.

Відповідь на це питання може бути дана на основі чисельного моделювання процесів встановлення поля в об'єкті відповідних елементів з урахуванням нелінійності властивостей ферромагнетика або нелінійної електропровідності шарів у разі їх розігрівання імпульсним струмом.

Постановка задачі моделювання проникнення поля в дрібношихтовані осердя для загального випадку розгляду процесів дифузії поля спільно з урахуванням хвильових явищ в об'єкті моделюючого середовища здійснюється на основі рівняння індукції в нормованій формі.

Таблиця 1

Основні характеристики програм для моделювання імпульсних електромагнітних полів (програми вибрані з відносно помірною вартістю)

Найменування програми	Версія	Компанія-виробник і/або автор	Країна	Розмірність задач	Моделювання процесів дифузії поля	Аналіз хвильових процесів у провідному середовищі	Розрахунок плоскої карти-ни струмів і нормального магнітного поля	Завдання залежних від часу граничних умов	Наявність відносного руху блоків моделі	Завдання анізотропії магнітної проникності	Завдання анізотропії електропривідності
PDEase2D	3.2	Macsyma Corp.	США	2D	Передбачено	Допускається	Передбачено	Користувач	Допускається	?	?
PDE2D	8.7 проф.	Granville Sewell	США	2D	Передбачено	Допускається	Передбачено	Користувач	Допускається	?	?
FlexPDE6	6.2	PDE Solution Inc.	США	2D, 3D	Передбачено	Допускається	Передбачено	Користувач	Допускається	?	?
FEMM	4.2	David Meecker	США	2D	Передбачено	Не допускається	Передбачено	Стандартне	Допускається	Можливо	Можливо
Eleut	5.7 проф.	TOR Cooperative	Росія	2D	Передбачено	Не допускається	Передбачено	Стандартне	Не допускається	Можливо	Можливо
Quick Field	5.5 проф.	Tera Analysis	США, Росія	2D	Передбачено	Не допускається	Передбачено	Стандартне	Не допускається	Можливо	Можливо
Pulse	6.0	Field Precision /Stan Humphries/	США	2D	Передбачено	Не допускається	Передбачено	Користувач	Не допускається	?	Неможливо
EMP-3	Студ.	Field Precision	США	3D	Передбачено	Допускається	Передбачено	Стандартне	Не допускається	Неможливо	Неможливо
FEMLAB	3.1	MathWork	США	2D, 3D	Передбачено	Не допускається	Передбачено	Користувач	Допускається	Для окремих класів задач	Можливо
COMSOL	3.5	Comsol AB	Швеція	2D, 3D	Передбачено	Не допускається	Передбачено	Користувач	Допускається	Для окремих класів задач	Можливо

За умови малої тривалості імпульсів струму, що збуджують магнітне поле, процедура його підготовки до вирішення поставленого завдання полягає в отриманні критеріїв подібності, які встановлюють відповідність між тимчасовими і просторовими масштабами моделі і реального об'єкта.

У вихідному рівнянні індукції можуть бути взяті до уваги не тільки дифузійні і хвильові процеси, але й можливість відносного переміщення або вібрації шарів зі швидкістю v :

$$\Delta \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} (\mu \sigma \vec{H}) + \text{rot} [(\mu \sigma) v \times \vec{H}] + \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\mu \epsilon \vec{H}).$$

Тут μ і σ — локальні значення коефіцієнтів магнітної проникності і електропровідності середовища відповідно.

Якщо ввести безрозмірний час $\tau = t / T$ через базисний час T , який дорівнює тривалості імпульсу поля, а як базисну швидкість прийняти величину $v = X / T$, де X — характерний розмір моделі, і припустити, що параметри μ і σ незмінні в межах товщини локальних шарів, тоді рівняння індукції в нормованих змінних містить два критерії подібності (Re_M і K_W):

$$\tilde{\Delta} \vec{H} = Re_M \left[\frac{\partial \vec{H}}{\partial \tau} + \text{rot} [\tilde{U} \times \vec{H}] \right] + K_W \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial \tau^2}.$$

Тут $Re_M = \mu \sigma v_0 X$ — магнітне число Рейнольдса, $U = v / v_0$; $\tilde{\Delta}$ — оператор Лапласа за безрозмірними змінними

$$(\tilde{x} = x / X, \tilde{y} = y / X, \tilde{z} = z / X), K_W = v_0^2 / v^2,$$

де $v = (\mu \sigma)^{-2}$ — локальна швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль (тобто в даному шарі середовища).

Критерій K_W визначає відносний вплив хвильових процесів.

Найбільш простий підхід до моделювання полягає в застосуванні методу «гомогенізації» середовища [1], особливо в тому випадку, коли роль хвильових процесів при встановленні поля незначна. Тоді для дрібношхтованого середовища напіваналітичними методами можуть бути введені еквівалентні параметри магнітної проникності і електропровідності [2–4], і далі для вирішення завдання про дифузію поля залишається здійснити масштабування на тимчасовій осі, щоб привести у відповідність задану тривалість імпульсу з можливостями моделюючої програми. При визначенні еквівалентної магнітної проникності можна наближено (тобто для усереднених параметрів середовища) врахувати нелінійність кривої намагнічування феромагнетика.

Більш продуктивний метод розв'язання задачі про розподіл поля в об'єкті дрібношхтованого осердя полягає в побудові розрахункової моделі багат шарового середовища, адекватної вихідному об'єкту, з наступним урахуванням нелінійності магнітних властивостей у кожному окремому шарі феромагнетика. Такий підхід потребує застосування програмних засобів з досить високою продуктивністю розв'язувального пристрою, проте він дозволяє уникнути наближеного підходу до оцінки еквівалентних параметрів середовища. При цьому виникає проблема просторового масштабування розрахункової моделі. Якщо введення даних про модель виконується за допомогою графічного редактора, роздільна здатність якого обмежена частками міліметра, доводиться зображати розрахункову модель, що містить шари мікронної товщини, в сильно збільшеному масштабі, і обґрунтовувати умови подібності між отриманим рішенням і реальним об'єктом.

Застосування методів теорії подібності при моделюванні дрібноструктурних середовищ в електромагнітному полі. Умови подібності імпульсних магнітних полів при розгляді їх у координатних сітках з різним масштабом можна сформулювати на основі розгляду рівняння дифузії магнітного поля в нормованій формі:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial \tau} = D \frac{T}{X^2} \tilde{\Delta} \vec{B},$$

де $D = (\mu \sigma)^{-1}$ — коефіцієнт дифузії магнітного поля.

Очевидно, що величину $D^* = D \frac{T}{X^2}$ можна розглядати як критерій подібності картин розподілу індукції в процесі дифузії поля. Якщо індекс «1» обраний для характеристики параметрів реального об'єкта, а індекс «2» для його розрахункової моделі, умова подібності має вигляд

$$D_1 \frac{T_1}{X_1^2} = D_2 \frac{T_2}{X_2^2}.$$

Простіше ця умова виконується для еквівалентних параметрів $D_{1\text{екв}} = D_{2\text{екв}}$ «гомогенізованого» середовища, що визначаються через усереднені за всіма шарами значеннями $\mu_{\text{екв}}$ і $\sigma_{\text{екв}}$.

Якщо ж шарувате середовище утворене чергуванням шарів нелінійного феромагнетика і шарів ізоляції з незмінними властивостями, критерій подібності може бути поширений винятково на шари феромагнетика за умови, що співвідношення товщин шарів, що визначає еквівалентні параметри $\mu_{\text{екв}}$ і $\sigma_{\text{екв}}$, зберігається однаковим в моделі і в реальному об'єкті.

Коли доводиться приймати в розрахунковій моделі заздалегідь визначені структурою моделюючої програми значення масштабних величин (наприклад, $T_2 = 1$ або $X_2 = 1$), дотримання умов подібності може бути забезпечене не лише шляхом зміни часу інтегрування процесу T_1 або характерного розміру моделі X_1 , але й шляхом зміни вихідних значень електромагнітних параметрів шарів феромагнетика μ або σ .

Реалізація такого підходу виконана авторами з використанням пакетів ELCUT (при вивченні одновимірних процесів дифузії поля) і FEMLAB, COMSOL (при вивченні двовимірних картин розподілу поля).

В індукційних прискорювачах електронів промислового призначення середня потужність пучка електронів може досягати 50 ... 100 кВт.

Для створення прискорюючого поля тут застосовуються індукторні системи, що мають замкнуті (кільцеві) феромагнітні осердя досить великого поперечного перерізу, виготовлені з високочастотного стрічкового аморфного феромагнетика Metglas (США) або Melta (Росія).

Особливістю імпульсних магнітних полів у прискорювачах електронів, як і в імпульсних трансформаторах, є лінійна зміна в часі струму намагнічування. Оскільки прискорююче поле створюється у вигляді серії коротких імпульсів, необхідно забезпечити проникнення магнітного поля в об'єм осердя за час тривалості імпульсу.

В мікросекундному діапазоні тривалості імпульсів при вирішенні цього завдання можна обмежитися розглядом дифузії поля в багатошарове середовище, залишаючи без уваги хвильові процеси в осерді.

Через нелінійність кривої намагнічування феромагнетика неможливо цілком коректно ввести еквівалентні параметри по всьому об'єму осердя. Розрахунок картини розподілу магнітної індукції виконується із застосуванням методів теорії подібності на багатошаровій розрахунковій моделі з великим збільшенням просторового масштабу.

Приклад розрахунку одновимірної дифузії поля на збільшеній моделі показано на рис. 1 (виконано в програмі Elcut v 5.7 prof.).

Лінійну зміну струму намагнічування було задано шляхом збільшення різниці граничних значень векторного потенціалу пропорційно часу інтегрування, як наведено в табл. 2.

Розриви ліній розподілу індукції на рис. 1 відповідають місцю знаходження немагнітних ізолюючих прошарків.

Використовуючи наведені співвідношення подібності, результати розрахунку можна використати на випадок малих товщин феромагнетика, що вимірюються десятком мікрометрів.

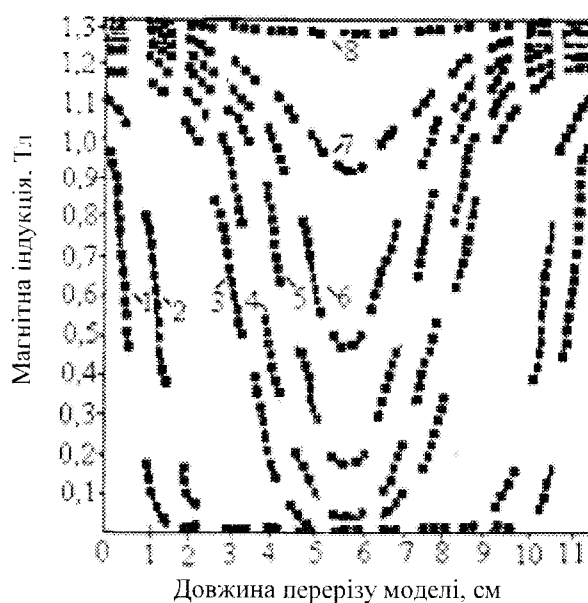


Рис. 1. Проникнення імпульсного магнітного поля в багатошарове осердя

Таблиця 2

Різниця граничних значень векторного потенціалу ΔA залежно від часу інтегрування (до рис. 1)

Параметр задачі	Номери ліній на рис. 1							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Час	0,03	0,06	0,12	0,18	0,21	0,24	0,27	0,3
T , мс								
ΔA , Вб/м	0,01	0,02	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1

Розрахунки процесів дифузії поля за допомогою двовимірних моделей призводять до більш змістовних результатів, оскільки виявляють істотну роль проникнення поля в листи шихтовки не тільки по торцях, але і по всьому периметру їхніх перерізів.

На рис. 2 і 3 подано результати моделювання двовимірної дифузії поля в багатошарових осердях (виконано в програмі Femlab v.3.1).

Видно, що в центральній частині шихтованого пакета при заданих коефіцієнтах дифузії поле за час тривалості робочого імпульсу не встигає вирівнятися по всьому перетину пакета.

У разі збільшенні відносної товщини листів феромагнетика в додаток до показаної картини з'являється неоднорідність розподілу індукції по товщині кожного листа (провал посередині і сплески поля на поверхні кожного листа).

Дослідження впливу хвильових процесів на встановлення поля в багатошаровому пакеті було проведено авторами у двовимірному наближенні [5] на прикладі ідеального магнітодіелектрика із застосуванням пакета Comsol v.3.4.

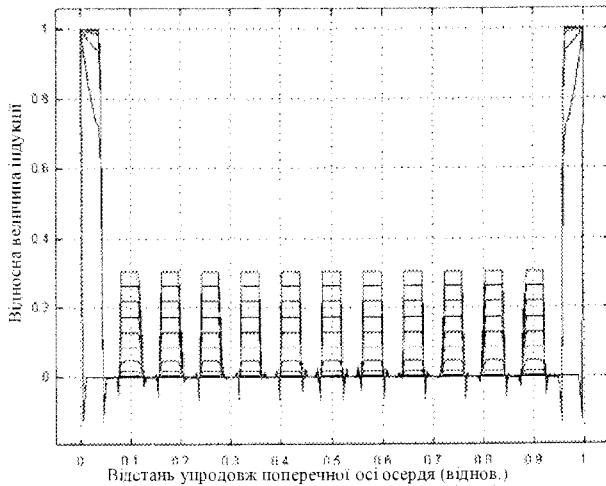


Рис. 2. Зростання і розподілення індукції поля за час робочого імпульсу (напрямку поперек шихтовки шарів феромагнетика)

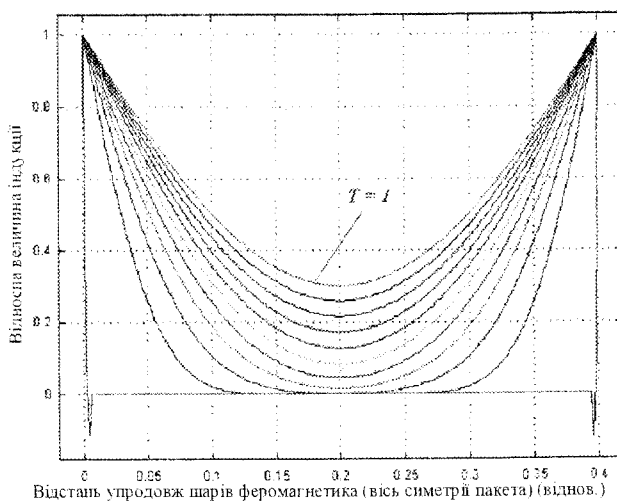


Рис. 3. Зростання і розподілення індукції поля в шарі феромагнетика за час робочого імпульсу в середньому перерізі пакета

При цьому було отримано висновки досить загального характеру, згідно з якими розмір поперечного перерізу осердя не повинен перевищувати довжину шляху, що проходить електромагнітна хвиля за час тривалості робочого імпульсу.

Моделювання контактних процесів при протіканні електричного струму через провідне середовище з багатшаровою неоднорідною електропровідністю. Елементи контактних з'єднань, особливо роз'ємних, які застосовуються в електричних установках для комутації великих струмів (до мегаамперних величин), часто характеризуються неоднорідною електропровідністю електродів в областях, прилеглих до поверхні контакту. Такі неоднорідності можуть бути викликані джоулевым розігрівом провідників або можуть бути створені з конструктивних міркувань для поліпшення характеристик контакту. У потужних струмопроводах у зонах вигину ліній

струму або в площині контакту з струмовідведенням зазвичай виникають зони концентрації густини струму, що зумовлюють локальний перегрів і додаткові механічні напружки.

Ці явища посилюються в перехідних та імпульсних режимах. Одним з методів запобігання небажаній концентрації струму може бути застосування провідників з неоднорідною (зокрема, багатшаровою) електропровідністю.

Якщо електромагнітним процесам у багатшарових неоднорідних діелектричних середовищах у теоретичній електротехніці раніше приділялася певна увага у зв'язку із завданнями конструювання хвилеводів [6], то проходження струму в багатшарових неоднорідних провідниках не вивчалася в теорії настільки детально, і тому тут роль математичного моделювання незаперечна. У той час, як аналітичне дослідження протікання імпульсного струму в провідниках різної конфігурації з багатшаровою неоднорідною електропровідністю викликає певні труднощі, методи математичного моделювання дозволяють знаходити рішення для досить складних конфігурацій.

На основі використання кінцево-елементної моделі в рамках пакета *Comsol* версії 3.5 нами були вивчені особливості протікання імпульсного струму через контактну пару, утворену двома струмопроводами (що мають коефіцієнт дифузії поля D_1) з рухомою перемичкою між ними (що має коефіцієнт дифузії поля D_2).

На рис. 4 подано результати розв'язку задачі про встановлення імпульсного струму в зоні рухомого контакту при достатньо високій відносній швидкості електродів v .

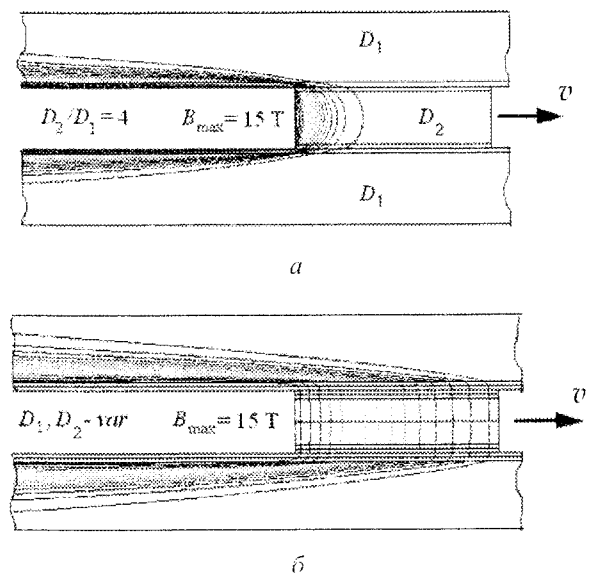


Рис. 4. Поліпшення розподілу струму в рухомому контакті при варіації коефіцієнтів дифузії поля в поверхневих шарах електродів. На рис. 4, а поверхневі шари електродів ма-

ють таку ж електропровідність, як і основний масив кожного електрода окремо. При переході через межу рухомого і нерухомого електродів спостерігається значна концентрація ліній струму поблизу кутової точки контакту.

На рис. 4, б кожен з електродів має додаткові пари з електропровідністю, що зменшується від шару до шару в напрямку граничної поверхні контакту, що дозволяє досягти помітного вирівнювання щільності струму по контактній поверхні при однаковій відносній швидкості і однаковому повному струмі, що протікає через контактну пару.

Проведене нами дослідження показало, що шляхом належного вибору коефіцієнтів дифузії поля в приграничних областях можна знизити концентрацію струму в кутових точках контакту і поліпшити розподіл густини струму по контактній поверхні.

Висновок

Результати чисельного моделювання рухомого контакту підтверджують отримані раніше теоретичним шляхом [7; 8] висновки про фундаментальну залежність розподілу густини струму вздовж контактної поверхні від співвідношення коефіцієнтів дифузії поля в матеріалі електродів контактної пари.

За математичним змістом контактні задачі техніки великих струмів близькі до задач дифузії речовини в шаруватих структурах [1], проте мають і суттєві відмінності.

Математичне моделювання задач про нестационарний розподіл струму в контактних системах, виконаних із застосуванням багатопарових неоднорідних провідників, вказує на принципову можливість істотно знизити концентрацію густини струму в критичних точках контакту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чапля С. Я. Математичне моделювання дифузійних процесів у випадкових і регулярних структурах / С. Я. Чапля, О. Ю. Чернуха. — К. : Наук. думка, 2009. — 302 с.

2. Chemerys V. T. Diffusion of the pulsed electromagnetic field into the multi-layer core of inductor at pulsed devices / V. T. Chemerys, I. O. Borodiy. — NAU Proceedings (Proceedings of the National Aviation University), 2008. — № 2. — P. 44–51.

3. Чемерис В. Т. Урахування нелінійних властивостей ферромагнетика при визначенні параметрів анізотропної моделі багатопарового осердя / В. Т. Чемерис, І. О. Бородій. — Вісник НАУ, 2011. № 4. — С. 91–97.

4. Meecker David. Finite Element Method Magnetics (FEMM), v.4.2. User's Manual. — Електронний ресурс. Режим доступу: www.femm.info.

5. Чемерис В. Т. Хвильовий скін-ефект в анізотропному магнітодіелектрику / В. Т. Чемерис, І. О. Бородій. — Наукоємні технології, 2011. № 3–4. — С. 99–104.

6. Козловский В. В. Синтез неоднородных электромагнитных сред / В. В. Козловский, Р. А. Бычковский, Г. С. Свечников, А. В. Згурский. — К. : Наук. думка, 1992. — 268 с.

7. Chemerys V. T. Analysis of current distribution in the zone of high speed sliding contact of the pulsed electromechanical converter / V. T. Chemerys, V. V. Gorin. — Proceedings of the IEEE Pulsed Power Plasma Science Conference (PPPS-2001), Digest of Technical Papers. — USA, Las Vegas, June 17–22, 2001. — Vol. 2. — P. 1715–1718.

8. Чемерис В. Т. Учет контактного сопротивления в задаче о скользящем контакте рельсового ускорителя // В. Т. Чемерис, В. В. Горин, А. М. Олейников // Оптимизация производственных процессов, вып. 8 : Сб. научн. трудов Севастоп. нац. техн. ун-та. — Севастополь : изд-во СевНТУ, 2005. — С. 131–141.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2012