

**В. Т. ЧЕМЕРИС, І. О. БОРОДІЙ**

## ВПЛИВ СКІНЧЕННОЇ ШВИДКОСТІ ПРОНИКНЕННЯ ПОЛЯ В ОСЕРДЯ НА ЛІНІЙНІСТЬ ФУНКЦІЇ ПЕРЕДАЧІ ІМПУЛЬСНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Розглянуто проникнення поля в дрібно-шихтоване магнітне осердя імпульсного трансформатора або індуктора прискорювача електронних пучків. При числовому моделюванні цього процесу вважається, що спосіб збудження поля є типовим для таких трансформаторів, тобто здійснюється завдяки тому, що на первинну обмотку подаються прямокутні імпульси напруги, а струм намагнічування має форму трикутних імпульсів. Показано, що на початковій стадії збудження поля магнітний потік концентрується в зонах, розташованих поблизу границь поперечного перерізу осердя, що має наслідком порушення лінійності зростання магнітного потоку в часі. Для покращення лінійності функції передачі імпульсних трансформаторів запропоновано метод корекції форми імпульсів струму намагнічування.

**Ключові слова:** дрібно-шихтоване осердя, імпульсний індуктор, функція передачі, трикутний струм намагнічування, кінцева швидкість дифузії поля, концентрація потоку на границях, порушення лінійності збільшення потоку, корекція імпульсу намагнічування, поліпшення лінійності.

Рассмотрено проникновения поля в мелко-шихтованный магнитный сердечник импульсного трансформатора или индуктора ускорителя электронных пучков. При числовом моделировании этого процесса считается, что способ возбуждения поля является типичным для таких трансформаторов, то есть осуществляется благодаря тому, что на первичную обмотку подаются прямоугольные импульсы напряжения, а ток намагничивания имеет форму треугольных импульсов. Показано, что на начальной стадии возбуждения поля магнитный поток концентрируется в зонах, расположенных вблизи границ поперечного сечения сердечника, что влечет нарушение линейности роста магнитного потока во времени. Для улучшения линейности функции передачи импульсных трансформаторов предложен метод коррекции формы импульсов тока намагничивания.

**Ключевые слова:** мелко-шихтованный сердечник, импульсный индуктор, функция передачи, треугольный ток намагничивания, конечная скорость диффузии поля, концентрация потока на краях, нарушение линейности возрастания потока, коррекция импульса намагничивания, улучшение линейности.

A penetration of the magnetic field into thin-laminated core of the pulsed transformer or inductor of electronic beam accelerator is under consideration in the paper. The mode of the field excitation at the numerical simulation of this process is supposed typical for such transformer, namely, with applied rectangular pulse of voltage to the primary winding and triangle pulse of magnetizing current. The numerical model of non-stationary electromagnetic process of magnetic field diffusion into the laminated core has been realized in the medium of professional software QuickField v. 3.5. The solution of 2D equation of magnetic field diffusion has been obtained with using of standard algorithm of thermal diffusion at application of reversible magnetization curve of ferromagnetics. There is shown that at the initial stage of the field excitation magnetic flux is concentrated in the zones near the border of the core cross section, what yields to the violation of linear growing of magnetic flux. The method of magnetizing current pulse correction is proposed for improvement of linear transmission function of the pulsed transformer.

**Keywords:** thin-laminated core, pulsed inductor, transmission function, triangle magnetizing current, finite speed of field diffusion, concentration of flux at the edges, violation of flux increase linearity, correction of magnetizing pulse, linearity improvement.

**Вступ.** Циліндричні магнітні осердя у вигляді кільця, намотаного з феромагнітної стрічки, мають широкі застосування в пристроях імпульсної техніки, перш за все таких, як індукційні прискорювачі потоків електронів або високочастотні трансформатори перетворювачів параметрів електромагнітної енергії. Через високу швидкість перемагнічування в таких осердях застосовуються сучасні аморфні феромагнітні матеріали такого типу як, наприклад, Metglas [1 – 3]. Збудження імпульсного поля в такому осерді має свою особливість, пов'язану з наявністю розподіленої електричної ємності по об'єму осердя. Вона обумовлена присутністю шарів ізоляційного матеріалу між шарами феромагнетика. В якості ізоляції використовуються полімерні плівки, у яких відносна діелектрична константа може досягати 3-х або 4-х одиниць. Тому внутрішнє середовище осердя здатне виявляти хвильові властивості, які будуть особливо відчутними при швидкості перемагнічування, більшій за  $\sim 3$  Тл/мкс. В мікросекундному діапазоні тривалості імпульсів аналіз проникнення поля в осердя може бути виконаний з позицій дифузії поля завдяки впливу питомого електричного опору феромагнітних шарів, який має рівень  $\sim 10^{-6}$  Ом·м і обумовлює загасання хвильових процесів [4]. З цієї причини в даній роботі аналіз проникнення поля в поперечний переріз осердя виконано виключно на основі рівняння дифузії магнітного поля. Беручи до

уваги достатньо великий розмір внутрішнього діаметру кільцевих осердь (наприклад, в індукторах індукційних прискорювачів електронів він може досягати 15 – 20 см), здавалося припустимим робити це в декартовій системі координат. Для моделювання нестационарного електромагнітного процесу збудження магнітного поля була використана професійна версія програмного пакету QuickField v. 6.3 [5]. Магнітна індукція була задана у вигляді лінійно зростаючої функції часу вздовж контуру, який охоплював периметр поперечного перерізу осердя з врахуванням наявності невеличкого немагнітного зазору між обмоткою збудження і бічними поверхнями осердя.

**Математична модель для числового моделювання осердя.** При моделюванні поля в осерді була використана 2-вимірне числова модель наступного рівняння дифузії магнітного поля (подібно до того, як це було в роботі [6]:

$$D_i \cdot \left( \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1)$$

де  $B \equiv B_z$ ,  $D_i = \frac{1}{\mu_i \sigma_i}$  – це коефіцієнт дифузії поля,

який має різні значення для окремих шарів шихтовки пакета (феромагнетика або діелектрика). Магнітна проникність шарів феромагнетика  $\mu_i$  визначалася у

© В. Т. Чемерис, І. О. Бородій, 2020

відповідності з локальними значеннями індукції з використанням типової кривої намагнічування матеріалу. Електропровідність шарів феромагнетика була задана незмінною і однаковою для всіх його шарів ( $1e06$  См/м). Ізоляційні шари мали електропровідність  $10$  См/м. Магнітна проникність в ізоляційних шарах дорівнює  $\mu_0 = 1.26e-06$  Гн/м. Поле досліджувалося в поперечному перерізі осердя з розмірами  $600$  мкм  $\times$   $760$  мкм. В структуру пакету входило  $30$  шарів феромагнетика товщиною  $15$  мкм кожен та  $29$  шарів ізоляційної плівки, що мала товщину  $5$  мкм. Фіксований проміжок між внутрішньою поверхнею обмотки збудження та бічними поверхнями осердя дорівнював  $10$  мкм. Струм намагнічування, яким збуджувалося поле, мав трикутну форму, як показано на рис. 1, забезпечуючи максимальну індукцію або  $1$  Тл (у варіанті 1) або  $2,5$  Тл (у варіанті 2). Тривалість цього процесу дорівнювала  $2$  мкс в обох випадках.

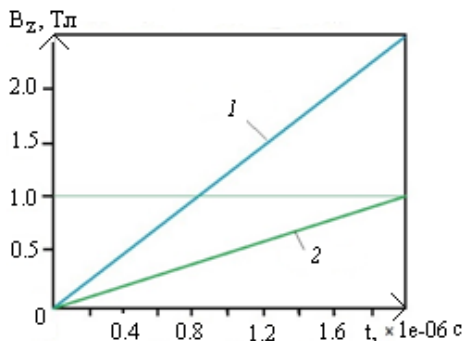


Рис. 1 – Діаграма зміни граничних значень індукції в залежності від часу на зовнішньому периметрі перерізу осердя.

На цьому часовому інтервалі вирішувалася гранична задача 1-го роду (по Діріхле). Для того, щоб використати для її рішення програмний пакет QuickField, було потрібно належним чином скоригувати існуючий в ньому алгоритм рішення нестационарної дифузії тепла. Це стало можливим завдяки формальній еквівалентності математичних рівнянь дифузії тепла та дифузії магнітного поля. При цьому виходимо з рівності коефіцієнта дифузії в електромагнітній задачі  $D_{EM}$  та коефіцієнта дифузії тепла  $D_{TERM}$ , тобто  $D_{EM} = D_{TERM}$ .

$$\text{Маємо } D_{EM} = \frac{1}{\mu(B) \cdot \sigma}, \quad [M^2/c];$$

$$D_{TERM} = \frac{\lambda(T)}{C \cdot \rho}, \quad [M^2/c],$$

з їхньої рівності одержуємо новий характеристичний параметр середовища:

$$\lambda(B) = \frac{C \cdot \rho}{\sigma \cdot \mu(B)} = \frac{C \cdot \rho}{\sigma} \cdot \frac{f(B)}{\mu_0} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{°K}} \right].$$

$$\text{Далі можна покласти, що } \frac{C \cdot \rho}{\sigma} = 1 \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{Ом}}{\text{м}^2 \cdot \text{°K}} \right],$$

і визначити

$$f(B) = \frac{\mu_0}{\mu(B)} = \frac{1}{\mu_r(B)}, \quad (2)$$

де  $f(B)$  є безрозмірною оберненою кривою намагнічування феромагнітного матеріалу (див. рис. 9 та табл. 1

в Додатку), яка може бути використана в алгоритмі рішення задачі про нестационарну дифузію тепла,  $\mu_r(B)$  є відносна магнітна проникність феромагнетика. Щоб зберегти необхідний числовий масштаб результатів обчислень, достатньо прийняти, що  $1^\circ\text{K}$  в нестационарній тепловій задачі відповідає індукції  $1$  мТл в задачі про нестационарну дифузію магнітного поля. Згідно з обраною системою координат, листи феромагнетика вважаються розташованими в площині  $y, z$ .

**Результати моделювання.** Нелінійна задача дифузії електромагнітного поля в пакет осердя, що складався з  $30$  пластин феромагнетика, була розв'язана методом скінченних елементів на триангуляційній сітці, що мала  $89863$  вузли, без використання осереднених параметрів пакета. Крок по осі часу дорівнював  $1$  нс, загальний час рішення задачі був в межах  $7 - 8$  годин на комп'ютері, який мав з двох-ядерний процесор на  $2,33$  ГГц і оперативну пам'ять  $3,5$  Гб. За результатами рішення для ряду послідовних моментів часу були побудовані картини розподілу магнітної індукції по всій площі перерізу осердя та графіки розподілу індукції вздовж повздовжньої та поперечної осей симетрії перерізу. Такі графіки для ситуації, коли в листах феромагнетика відсутнє насичення (бо максимальна індукція  $B_{max} < 1$  Тл), показані на рис. 2, а, б.

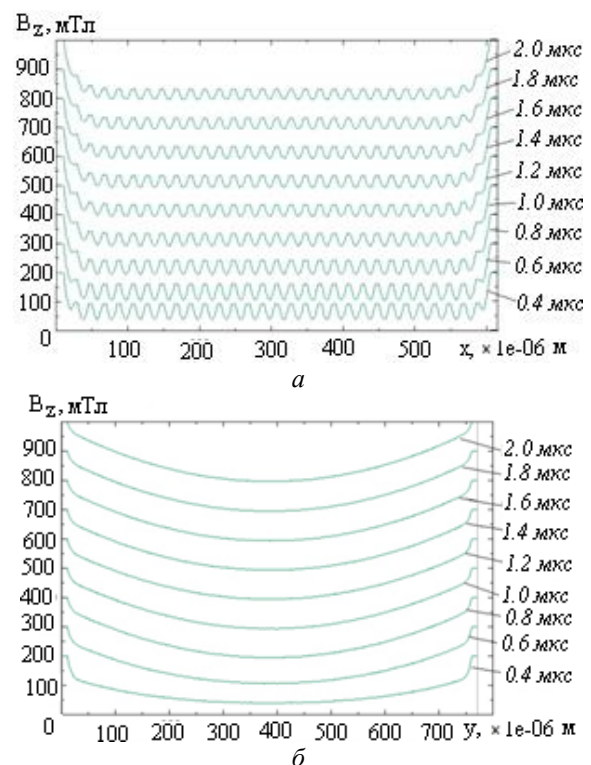


Рис. 2 – Розподіл магнітної індукції вздовж лінії симетрії, яка проведена: а – перпендикулярно та б – паралельно до площин шарів феромагнетика,  $B_{max} < 1$  Тл

Такі ж графіки при наявності насичення листів феромагнетика, коли  $B_{max} < 2,5$  Тл, показані на рис. 3, а, б. Як на рис. 2, так і на рис. 3 варіант (а) дає розподіл поля вздовж лінії симетрії перерізу осердя, що є перпендикулярною до площин листів феромагнетика, а варіант (б) – вздовж лінії симетрії перерізу осердя, що є паралельною площинам листів феромагнетика.

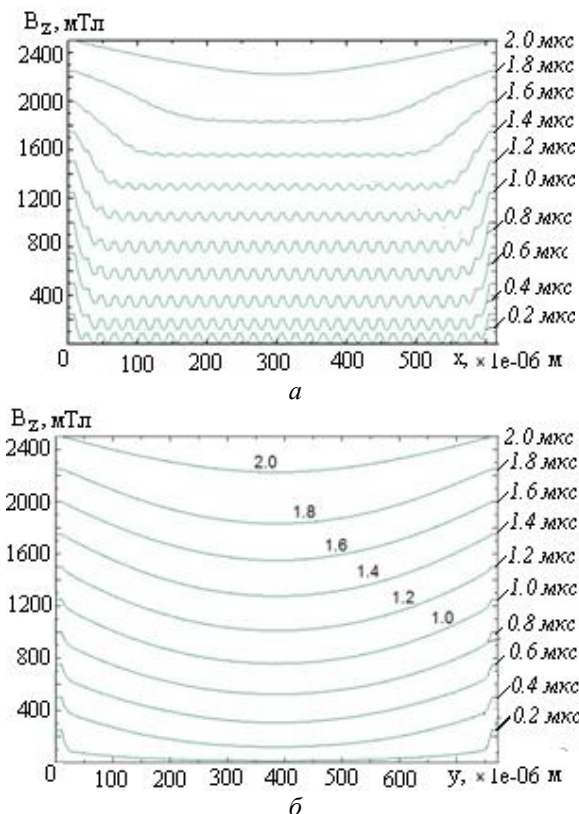


Рис. 3 – Розподіл магнітної індукції вздовж лінії симетрії, яка проведена: *a* – перпендикулярно та *б* – паралельно до площин шарів феромагнетика,  $B_{max} < 2,5$  Тл

Можна зробити висновок, що дифузія поля йде переважно вздовж площини кожного листа, в напрямі від його границь до центру. Дифузія поля в напрямі, перпендикулярному до площин орієнтації листів феромагнетика, відбувається повільніше, при цьому різниця значень поля в сусідніх листах є незначною (див. рис. 2, *a*), за винятком тих листів, що знаходяться поблизу від границь перерізу (тобто біля лівого та правого границь перерізу). В цих зонах перерізу має місце певна концентрація магнітного потоку, таким чином, що значення індукції тут значно перевищують середні значення індукції в центральній зоні перерізу. На рис. 4 та рис. 5 в кольоровій шкалі показано розподіл магнітної індукції у правій верхній частині перерізу осердя в кінці процесу намагнічування, коли  $t = 2$  мкс. Порівняння цих двох різних розподілів демонструє вплив насичення листів феромагнетика, коли індукція в них може досягати рівня 2,5 Тл. Якщо  $B_{max} < 1$  Тл, як на рис. 4, вплив насичення помітний тільки на 1-му та 2-му листах від границь перерізу, в той час як всі інші листи тут перебувають в однаковому ненасиченому стані.

При більш високому рівні індукції, коли  $B_{max} < 2,5$  Тл, як на рис. 5, кінцевий розподіл індукції виглядає так, наче шихтований пакет при  $t = 2$  мкс перетворився в однорідне немагнітне середовище.

Внаслідок насичення феромагнетика структурна анізотропія пакету зникає, і процес проникнення поля відбувається так, наче пакет перестав бути двох-компонентним багатощаровим середовищем.

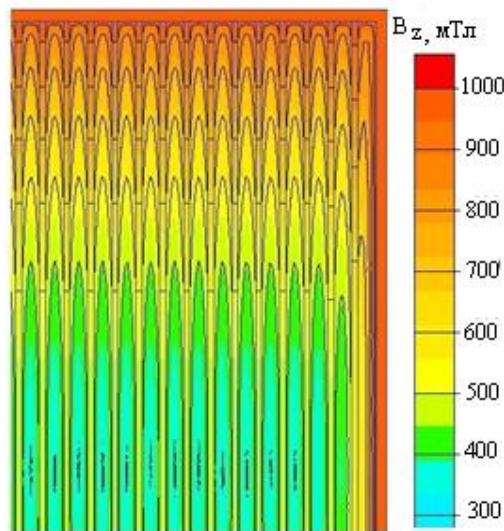


Рис. 4 – Двовимірний розподіл магнітної індукції при збудженні поля лінійно зростаючим струмом,  $B_{max} < 1$  Тл

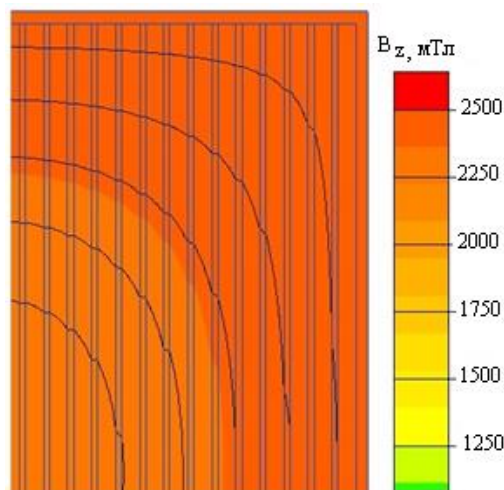
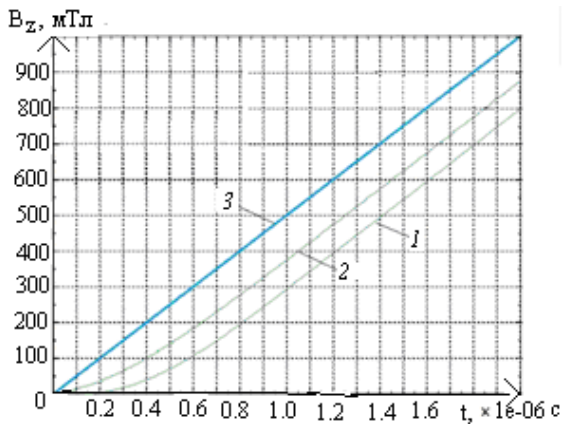
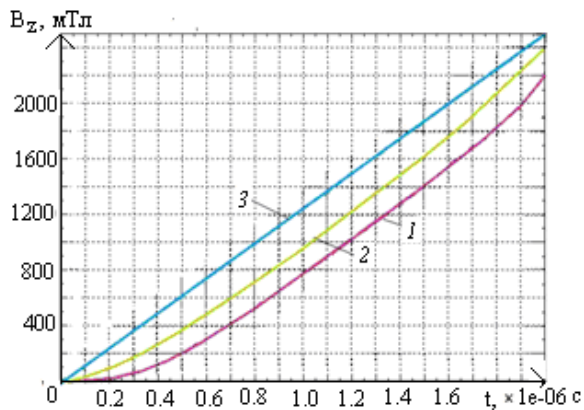


Рис. 5 – Двовимірний розподіл магнітної індукції при збудженні поля лінійно зростаючим струмом,  $B_{max} < 2,5$  Тл

Вивчення дифузії поля в дрібно-шихтований пакет дозволяє встановити взаємозв'язок між швидкістю дифузії поля і лінійністю зміни магнітного потоку в осерді, як функції часу. Інтегральний калькулятор програми QuickField v.6.2 дає можливість обчислювати повний потік поля крізь будь-який замкнений контур моделі. На рис. 6 (для  $B_{max} < 1$  Тл) та на рис. 7 (для  $B_{max} < 2,5$  Тл) представлені результати вимірювань повного магнітного потоку крізь поперечний переріз осердя в залежності від часу. Крива 1 зображує залежність від часу локального значення магнітної індукції в центрі перерізу. Крива 2 на кожному з цих рисунків показує залежність від часу середнього значення індукції в перерізі осердя. Через концентрацію магнітного потоку в граничних зонах, яка пов'язана з недостатньою швидкістю дифузії поля, зростання повного магнітного потоку, який ми обчислюємо по середній індукції, на початковому етапі намагнічування є уповільненим (крива 2 на рис. 6), в той час як граничне значення індукції попериметру перерізу (крива 3, рис. 6) задане як строго лінійна функція часу.

Рис. 6 – Магнітна індукція як функція часу для  $B_{max} < 1$  Тл

В наступні кроки часу як середня магнітна індукція, так і повний потік змінюються лінійно, але пропорційність між струмом збудження і магнітним потоком вже порушена (порівняймо лінію 2 та лінію 3 на рис. 6). Подібна ситуація спостерігається при розрахунку поля з насиченням феромагнетика, коли  $B_{max} < 2,5$  Тл (рис. 7).

Рис. 7 – Магнітна індукція як функція часу для  $B_{max} < 2.5$  Тл

Імпульсний трансформатор високої якості має забезпечувати лінійну зміну магнітного потоку як функцію часу для того, щоб одержати на виході імпульс напруги прямокутної форми. Поліпшення лінійності функції передачі трансформатора може бути забезпечено деяким підвищенням швидкості зростання струму збудження на початковому відрізку його зростання. Це означає, що треба здійснити корекцію форми трикутного імпульсу намагнічування. Ця корекція може бути врахована при моделюванні зміною форми імпульсу граничної умови індукції на периметрі перерізу осердя, як показано на рис. 8, де крива 1 показує відкориговану форму імпульсу струму збудження, а крива 2

показує досягнуту за рахунок цього лінійну залежність середньої в перерізі магнітної індукції від часу.

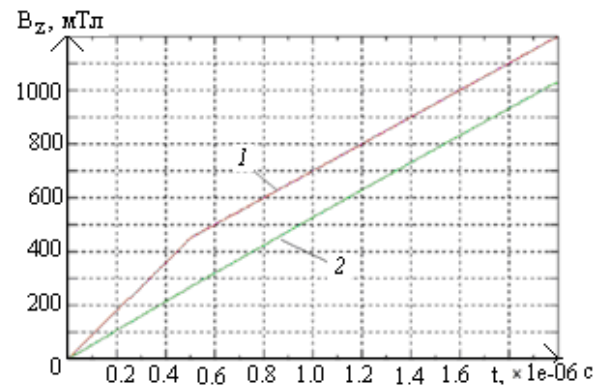
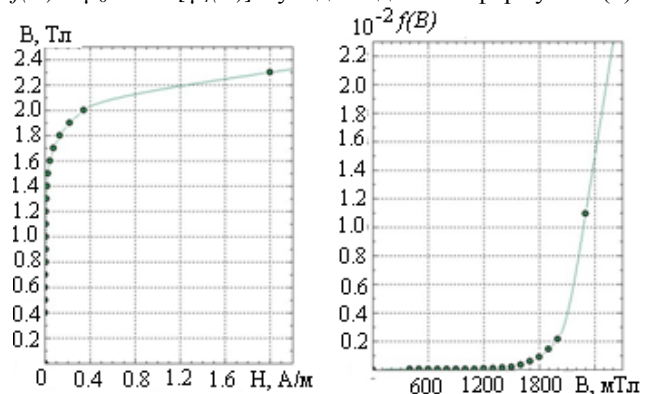


Рис. 8 – Скоригована форма імпульсу збудження поля в осерді при відсутності насичення феромагнетика

Як видно з рис. 8, крива 1, швидкість зростання струму намагнічування була збільшена на початковому відрізку часу від  $t = 0$  до  $t = 0,5$  мкс і далі залишалася незмінною, такою самою, як і на кривій 3, рис. 6. Завдяки такій корекції струму збудження повний магнітний потік в перерізі осердя стає лінійною функцією часу, як і середня в перерізі магнітна індукція (крива 2).

На рис. 9 представлені магнітні характеристики феромагнітного матеріалу, які були використані при виконанні числового експерименту. На лівій частині рис. 9 зображено типову характеристику намагнічування електротехнічної сталі  $B(H)$ . Права частина рис. 9 показує обернену криву намагнічування  $f(B) = \mu_0 H/B = [\mu_r(B)]^{-1}$  у відповідності з формулою (2).

Рис. 9 – Крива намагнічування  $B(H)$  та безрозмірна обернена крива  $f(B)$  для феромагнітного матеріалу з врахуванням його насичення

Обидві криві на рис. 9 побудовані у відповідності з таблицею 1.

Таблиця 1 – Крива намагнічування  $B(H)$  та обернена безрозмірна крива  $f(B)$  для феромагнітного матеріалу (графіки на рис. 9)

Індукція $B$ , мТл	0	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$f(B) = 1/\mu_r, \times 10^{-3}$	-	0.441	0.430	0.4431	0.470	0.500	0.556	0.632	0.741	0.885
Напруж. поля $H$ , А/м	0	140	171	211	261	318	397	502	647	843
Індукція $B$ , мТл	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2300	
$f(B) = 1/\mu_r, \times 10^{-3}$	1.105	1.422	2.100	3.465	5.781	9.100	14.59	21.54	109.56	
Напруж. поля $H$ , А/м	1140	1580	2500	4400	7800	13000	22000	34200	200000	

**Висновки.**

Двохвимірне моделювання розподілу магнітної індукції в прямокутному поперечному перерізі дрібношхтованого замкненого (зокрема, кільцевого) осердя імпульсного трансформатора (зокрема, тороїдальної конфігурації) дозволило виявити деякі особливості збудження магнітного потоку в осерді при лінійному зростанні струму намагнічування. В якості інструменту для вивчення процесу проникнення поля була використана професійна версія програмного пакету QuickField v.6.3. Структурна анізотропія осердя, обумовлена його шхтовкою, призводить до різниці в швидкості проникнення поля по взаємно ортогональних осях поперечного перерізу осердя. Поступове заповнення пластин феромагнетика магнітним потоком відбувається переважно вздовж площини їхнього розташування в осерді. Проникнення поля в напрямі, перпендикулярному до цих площин, відбувається з деяким запізненням і супроводжується локальною концентрацією потоку поблизу країв перерізу осердя при майже однорідному розподілі магнітної індукції в пластинах, розташованих в центральній частині площі перерізу осердя. В результаті лінійне зростання магнітного потоку в осерді порушується. Числовий експеримент, в якому було збільшено швидкість зростання струму на початковій ділянці формування трикутного імпульсу струму намагнічування, підтвердив можливість та ефективність такого методу компенсації порушень лінійності зростання магнітного потоку.

**Список літератури**

1. Metglas. Режим доступу : <http://www.metglas.com>.
2. Smith C. H., Barberi L. Dynamic magnetization of metallic glasses / C. H. Smith, L. Barberi // Proceedings of the 5<sup>th</sup> Pulsed Power Conf., 1985. – pp. 664 – 667.
3. Ertugrul N. A novel tapered rotating electrical machine topology utilizing cut amorphous magnetic material / N. Ertugrul, R. Hasegawa, W. L. Soong, J. Gayler, S. Kloeden, S. Kahourzade //

- IEEE Trans. on Magnetics. – vol.51. – no.7. – July 2015. – 6 p.
4. Чемерис В. Т. Моделирование волновых процессов в мелкошхтованных сердечниках силовых устройств импульсной техники / В. Т. Чемерис, И. А. Бородий // Электронное моделирование. – 2014. – Т. 36. – № 2. – С. 107 – 113.
5. QuickField: A new approach to field modeling. Режим доступу: <http://www.quickfield.com>.
6. Chemerys V. T., Borodiy I. O. Diffusion of the pulsed electromagnetic field into the multi-layer core of inductor at pulsed devices / V. T. Chemerys, I. O. Borodiy // NAU Proceedings. – Kyiv. – no.2 (35). – 2008. – pp. 44 – 51.
7. Chemerys V. T. Influence of the finite speed of the field penetration into the core on the linearity of transmission function for the pulsed transformers / V. T. Chemerys, I. O. Borodiy // Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine”, Cuiavian University in Wloclawek, Wloclawek, Republic of Poland, December 21 – 22, 2018. – pp. 93 – 100.

**References (transliterated)**

1. Metglas. ≤ <http://www.metglas.com> ≥
2. Smith C. H., Barberi L. Dynamic magnetization of metallic glasses. Proceedings of the 5<sup>th</sup> Pulsed Power Conf. 1985, pp. 664 – 667.
3. Ertugrul N., Hasegawa R., Soong W. L., Gayler J., Kloeden S., Kahourzade S. A novel tapered rotating electrical machine topology utilizing cut amorphous magnetic material. IEEE Trans. on Magnetics, vol.51, no.7, July 2015, 6 p.
4. Chemerys V. T., Borodiy I. O. Modelirovaniye volnovykh protsessov v melko-shikhtovannykh serdechnikakh silovykh ustroystv impulsnoy tekhniki [Simulation of the wave processes in the thin-laminated cores of powerful elements of pulsed devices]. *Electronic Simulation*. 2014, vol. 36, no. 2, pp. 107 – 113. (Rus)
5. QuickField: A new approach to field modeling. ≤ <http://www.quickfield.com> ≥
6. Chemerys V. T., Borodiy I. O. Diffusion of the pulsed electromagnetic field into the multi-layer core of inductor at pulsed devices. NAU Proceedings, Kyiv, no.2 (35), 2008, pp. 44 – 51.
7. Chemerys V. T., Borodiy I. O. Influence of the finite speed of the field penetration into the core on the linearity of transmission function for the pulsed transformers. Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine. Cuiavian University in Wloclawek, Wloclawek, Republic of Poland, December 21-22, 2018, pp. 93 – 100.

Надійшла (received) 14.01.2020

**Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions**

Чемерис В. Т. Вплив скінченної швидкості проникнення поля в осердя на лінійність функції передачі імпульсних трансформаторів / В. Т. Чемерис, І. О. Бородій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2020. – № 3 (1357). – С. 24–28. – Бібліогр.: 7 назв. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.04.

Чемерис В. Т. Влияние конечной скорости проникновения поля в сердечник на линейность функции передачи импульсных трансформаторов / В. Т. Чемерис, И. А. Бородий // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2020. – № 3 (1357). – С. 24–28. – Бібліогр.: 7 назв. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.04.

Chemerys V. T. Influence of the finite speed of the field penetration into the core on the linearity of transmission function for the pulsed transformers / V. T. Chemerys, I. O. Borodiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2020. – No. 3 (1357). – P. 24–28. – Bibliogr.: 7. – doi:10.20998/2409-9295.2020.3.04.

**Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors**

**Чемерис Володимир Терентійович (Chemerys Vladimir Terentyevich, Chemerys Volodymyr Terentiyovych)** – кандидат технічних наук, Національний авіаційний університет, старший науковий співробітник, доцент, Київ, Україна; ORCID:0000-0002-333; тел.: (067) 978-92-56; e-mail: vchemer@ukr.net.

**Бородій Ірина Олексіївна (Бородий Ирина Алексеевна, Borodiy Iren Oleksiivna)** – викладач фізики, Національний авіаційний університет, старший викладач кафедри загальної та прикладної фізики, Київ, Україна, ORCID: 0000-0002-1718-4809 тел.: (044) 406-78-40; e-mail: miko2010@ukr.net.