

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ПЛОСКІЙ ПРЯМОКУТНІЙ СИСТЕМІ З ІНДУКТОРОМ МІЖ ТОНКИМИ КОТУШКАМИ БІФІЛЯРА

Ю.В. Батигін*, докт.техн.наук, **С.О. Шиндерук****, канд.техн.наук,
О.Ф. Єрсьоміна***, канд.техн.наук, **Є.О. Чаплигін******, канд.техн.наук
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net

Метою досліджень є аналіз та оцінки характеристик електромагнітних процесів у запропонованій плоскій прямокутній системі, що складається з тонкого соленоїда-індуктора, розміщеного між гілками біфіляра – тонкостінними багатовитковими котушками. Проведено аналіз електромагнітних процесів і отримано оцінки збуджених струмів. Показано, що за мінімального проміжку між обмотками соленоїда-індуктора і біфіляра функції збуджуючого струму і струму, індукваного в обмотках біфіляра, однакові, а амплітуда останнього максимальна і дорівнює половині амплітуди струму в індукторі. Доведено, що запропонована система має практично незмінну форму і амплітуду індукваного струму в широкому діапазоні геометричних параметрів, що варіюються. Відзначено мінімальний вплив полів індукваних струмів на процеси в соленоїді-індукторі і мінімальні втрати під час знімання індукваного сигналу з обмоток біфіляра. Фізично перше пояснюється асиметрією збуджуваного магнітного поля відносно площини соленоїда-індуктора, друге – істотним зниженням паразитної міжвиткової ємності за рахунок тонкостінності обмоток біфіляра. Отримані результати дають змогу дати практичні рекомендації у процесі вибору конструкторських рішень для елементів нових схем обладнання в магнітно-імпульсній обробці металів. Бібл. 14, рис. 2.

Ключові слова: біфілярна котушка, плоска прямокутна система, магнітно-імпульсна обробка металів, перетворення енергії, соленоїд-індуктор.

Вступ. Біфілярні конструкції знайшли застосування в різного роду електротехнічних пристроях завдяки основній відмінній рисі – можливості отримання нульового магнітного поля або зовні, або всередині біфіляра. Фізично зазначена особливість обумовлена наявністю двох паралельних струмопроводів, за якими в залежності від поставленого завдання (поле всередині або поле зовні) протікають односпрямовані або різноспрямовані струми. Серед найбільш відомих практичних застосувань відомі малоіндуктивні омичні опори, запобіжні струмообмежувальні пристрої, електронні системи, сенсорні датчики в вимірювальних комплексах та ін. [1].

Короткий огляд літератури. Найбільш актуальною вимогою сучасності є вимога економного споживання енергетичних і матеріальних ресурсів. Пошук оптимальних засобів використання енергії є метою теоретичних та експериментальних робіт з дослідження методів магнітно-імпульсної обробки металів. У роботі [2] розглянуто чисельне моделювання електромагнітного поля в поперечних нагрівальних приладах індукційного потоку та запропоновані методи обчислення електромагнітної сили, що діє на немагнітні та магнітні листи. В [3] вивчена залежність ефективності магнітно-імпульсної обробки матеріалів від форми імпульсного магнітного поля і показано, що, використовуючи послідовність імпульсів замість одного імпульсу магнітного поля, можна збільшити питомий механічний імпульс, переданий на заготовку, і, таким чином, вдосконалити ефективність обробки. Фізичний механізм силової дії імпульсних магнітних полів на тонкостінні листові заготовки з феромагнітних провідників сформульовано і обґрунтовано у статті [4].

Схеми обладнання магнітно-імпульсної обробки металів досить різноманітні. Так, у роботі [5] використано індуктор, що складається з двох котушок, увімкнених послідовно, а у [6] та [7] представлено індуктори у вигляді котушки, виготовленої із згорнутого в рулон плоского листа з ізоляційною прокладкою. Особливий інтерес представляють розробки елементної бази магнітно-імпульсної обро-

© Батигін Ю.В., Шиндерук С.О., Єрсьоміна О.Ф., Чаплигін Є.О., 2021
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-1278-5621>; ** <https://orcid.org/0000-0002-6354-4174>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-8123-1104>; **** <https://orcid.org/0000-0003-1448-6091>

бки металів, що включають плоскі індукторні системи з біфілярними котушками. Їхнє відповідне розміщення щодо індуктора-інструмента або узгоджувального пристрою дає змогу зменшити розсіювання електромагнітної енергії в навколишній простір за мінімальним впливом поля біфіляра на процеси в індукторі-інструменті [8, 9].

Конструктивне виконання обмоток біфіляра може бути вельми різним. У роботі [10] запропоновано ідею виконання циліндричної індукторної системи з індуктором, розміщеним всередині коаксіального соленоїда, обмотка якого зроблена у вигляді біфіляра з протилежно спрямованими струмами. Розглянуто фізико-математичну модель запропонованої індукторної системи і проведено теоретичний аналіз електромагнітних процесів, що протікають в ній, отримано числові оцінки характеристик збуджених полів.

Безсумнівною перевагою тонкостінних багатовиткових котушок є низька власна ємність. Аналізу електромагнітних процесів в плоских кругових індукторних системах з тонкостінними добре провідними біфілярами присвячена робота [11]. Авторами розраховано основні характеристики дослідженої системи і виконано числові оцінки практичних можливостей перетворення енергії розсіювання з індуктора в енергію обмоток біфіляра. Поряд з вищезазначеними перевагами тонкостінних біфілярів має місце інтенсивний вихід енергії крізь метал їхніх обмоток в навколишній простір. Ця обставина обумовлена інтенсивними процесами проникнення полів в кругових електромагнітних системах. Проте знизити енергетичні втрати можна за допомогою електродинамічного ефекту, згідно з яким магнітне поле плоскої хвилі не проникає в навколишній простір. Конструктивним рішенням для практичної реалізації даного ефекту є використання плоских котушок прямокутної геометрії [12].

Метою роботи є аналіз та оцінки характеристик електромагнітних процесів у запропонованій плоскій прямокутній системі, що складається з тонкого збуджуючого соленоїда, розміщеного між гілками біфіляра – тонкостінними багатовитковими котушками.

Постановка завдання, розрахункові співвідношення. Запропонована перетворювальна плоска система представлена трьома ідентичними прямокутними соленоїдами, розміщеними паралельно один над іншим. Зовнішні соленоїди – це обмотки біфіляра, внутрішній – це соленоїд зі збуджуючим струмом. Ця система може бути узгоджувальним пристроєм, що підключається між електричним виходом джерела потужності і входом індуктора – інструмента силової дії. Призначенням узгоджувального пристрою є варіація робочих частот та підсилення робочого струму [12]. У фізичній ідеалізації, однаково спрямовані струми, що індукують у обмотках біфіляра, збуджують у внутрішньому просторі між ними однакові за амплітудами, але різноспрямовані магнітні поля. Суперпозиція останніх дає нуль магнітного потоку, що означає відсутність електромагнітного впливу на процеси у обмотці збуджуючого соленоїда. (Зауважимо, що запропонована система також може бути інструментом силової дії під час штампування двох листових металів, що розміщені поверх зовнішніх поверхонь гілок біфіляра.)

Рішення завдання по досягненню поставленої мети проведемо аналогічно відповідним завданням наукового видання [9].

Прийняті допущення.

- Поздовжні розміри соленоїдів набагато перевищують поперечні, так що прийнятна розрахункова модель прямокутної системи, яку показано на рис. 1 у декартовій прямокутній системі координат (рис. 1, a – поперечний переріз: 1 – плоский багатовитковий соленоїд зі збуджуючим струмом, 2 – гілки біфіляра – плоскі багатовиткові соленоїди; рис. 1, b – розподіл струму в поперечному перерізі збуджуючого соленоїда).

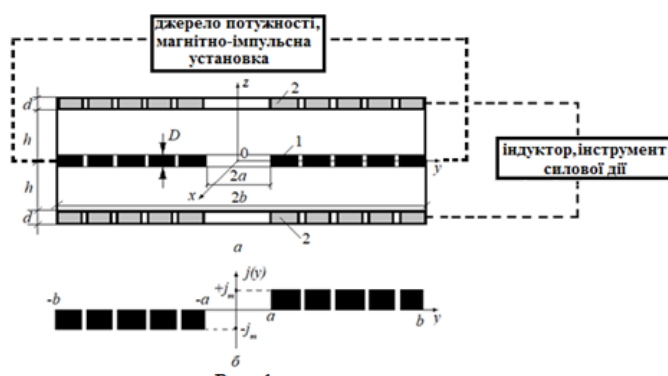


Рис. 1

- Витки соленоїда-індуктора досить тонкі ($D \ll h$), «прозорі» для збуджених полів і не впливають на електромагнітні процеси, що протікають, а міжвиткові проміжки настільки малі, що його робочі поверхні можна вважати суцільними [2, 3, 9].

- У соленоїді-індукторі протікає гармонічний струм з густиною $j_x(t, y, z) = j_m \sin(\omega t) \cdot f(y) \cdot \delta(z)$, де $j_m = I_m / (b - a)$ – амплітуда густини, I_m – амплітуда струму, ω – циклічна частота,

$f(y), \delta(z)$ – функції розподілів, $\delta(z)$ – дельта-функція Дірака [10].

• Функція поперечного розподілу струму в збуджуючому соленоїді має вигляд

$f(y) = \{-[\eta(y+b) - \eta(y+a)] + [\eta(y-a) - \eta(y-b)]\}$, де $\eta(y)$ – ступінчаста функція Хевісайда [10], $2a, 2b$ – внутрішній і зовнішній розміри (див. рис. 1, б).

• Витки обмоток біфіляра щільно прилягають один до одного так, що утворюють суцільну металеву поверхню.

• «Електродинамічна товщина» металу обмоток біфіляра є досить малою, що у цьому випадку відповідає достатньо низьким частотам діючих полів, так що $\omega \cdot \tau < 1$, де ω – циклічна частота збуджуючого струму в індукторі, $\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерний час дифузії поля в немагнітний (μ_0 – магнітна проникність вакууму) провідний шар товщиною d , питомою електропровідністю γ . «Електродинамічну товщину» провідного шару як числову характеристику ступеня його «прозорості» для діючого поля можна визначити як величину, пропорційну відношенню характерного часу дифузії в провідний шар τ до характерного параметру діючого поля, його періоду – T . Згідно з цим визначенням, «електродинамічна товщина» – це відношення $\tau/T \sim (\omega \cdot \tau)$. У разі інтенсивних процесів проникнення $\omega \tau < 1$, що відповідає нерівності – $d / \Delta < 1$, де Δ – величина скін-шару [8, 9, 12].

Відстані між соленоїдом-індуктором і гілками обмотки біфіляра h досить малі, що дає змогу знехтувати крайовими ефектами.

• У системі збуджуються пакети плоских хвиль, їхні параметри задовольняють квазістаціонарному наближенню по Ландау $\omega l / c \ll 1$, де c – швидкість світла у вакуумі, l – максимальний розмір в системі [2, 3, 9].

Рівняння Максвелла ($E_x \neq 0, H_y, z \neq 0$) для збуджуваних складових електромагнітного поля, перетворених за Лапласом з урахуванням нульових початкових умов, мають вигляд [12]

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z(p, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(p, y, z)}{\partial z} = j_x(p, y, z), \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial z} = -p\mu_0 H_y(p, y, z), \\ \frac{\partial E_x(p, y, z)}{\partial y} = p\mu_0 H_z(p, y, z), \end{cases} \quad (1)$$

де p – параметр перетворення Лапласа, $E_x(p, y, z) = L\{E_x(t, y, z)\}$, $H_{y,z}(p, y, z) = L\{H_{y,z}(t, y, z)\}$, $j_x(p, y, z) = L\{j_x(t, y, z)\}$, $j(p) = I(p)(b-a)^{-1}$, $j(p) = L\{j_m \cdot \sin(\omega t)\}$, $I(p) = L\{I(t)\}$.

З диференціальної системи (1) можна отримати рівняння для $E_x(p, y, z)$

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} = j_x(p, y, z). \quad (2)$$

Для вирішення рівняння (2) можна застосувати інтегральне синус-перетворення Фур'є [13]. Допустимість даного математичного підходу обумовлена електричною асиметрією прийнятої розрахункової моделі щодо осі аплікату.

Таким чином, маємо

$$\begin{cases} E_x(p, y, z) = \int_0^\infty E_x(p, \lambda, z) \cdot \sin(\lambda y) d\lambda, \\ j_x(p, y, z) = \int_0^\infty j_x(p, \lambda, z) \cdot \sin(\lambda y) d\lambda, \end{cases} \quad (3)$$

де $j_x(p, \lambda, z) = \int_0^\infty j_x(p, y, z) \sin(\lambda y) dy = j(p) f(\lambda) \delta(z)$,

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty f(y) \sin(\lambda y) dy = \frac{4}{\pi \cdot \lambda} \sin\left(\lambda \frac{b+a}{2}\right) \sin\left(\lambda \frac{b-a}{2}\right).$$

З урахуванням (3) рівняння (2) набуває вигляду

$$\frac{\partial^2 E_x(p, y, z)}{\partial z^2} - \lambda^2 E_x(p, y, z) = K(p, \lambda) \cdot \delta(z), \quad (4)$$

де $K(p, \lambda) = \mu_0 p j(p) f(\lambda)$.

Загальний інтеграл рівняння (4) з урахуванням симетрії щодо осі ординат запишеться наступним чином [6]:

$$E_x(p, \lambda, z) = A(p, \lambda) \cdot \text{ch}(\lambda z) + \frac{K(p, \lambda)}{\lambda} \cdot \eta(z) \cdot \text{sh}(\lambda z), \quad (5)$$

де $A(p, \lambda)$ – довільна стала інтегрування

Зображення тангенціальної складової компоненти напруженості магнітного поля можна знайти підстановкою формули (5) у друге рівняння системи (1).

$$H_y(p, y, z) = -\frac{\lambda}{p\mu_0} \cdot \left[A(p, \lambda) \cdot \text{sh}(\lambda z) + \frac{1}{\lambda} \cdot K(p, \lambda) \cdot (\eta(z) - 0,5) \cdot \text{ch}(\lambda z) \right]. \quad (6)$$

Вирази (5) і (6) повинні задовольняти наближеній граничній умові на поверхні тонкостінного провідника [12]

$$H_y(p, \lambda, z = h) \approx (\gamma \cdot d) \cdot E_x(p, \lambda, z = h). \quad (7)$$

Підставляючи (5) і (6) в (7) знаходимо, що

$$A(p, \lambda) = -\frac{1}{2\lambda} \cdot K(p, \lambda) \cdot \frac{\left[\text{sh}(\lambda h) + \frac{\lambda}{p\mu_0(\gamma \cdot d)} \cdot \text{ch}(\lambda h) \right]}{\left[\text{ch}(\lambda h) + \frac{\lambda}{p\mu_0(\gamma \cdot d)} \cdot \text{sh}(\lambda h) \right]}. \quad (8)$$

В кінцевому підсумку задля оцінки індукційних ефектів становить інтерес густина струму, що збуджується в обмотках біфіляра. Для визначення цієї характеристики електромагнітних процесів в розглянутій індукторній системі залежність (8) підставимо в формулу (5). Отриманий результат помножимо на питому електропровідність металу обмоток біфіляра і врахуємо, що в тонкостінному провіднику поперечний розподіл струмів є рівномірним [8, 9, 12].

Опускаючи громіздкі тотожні перетворення, знаходимо зображення лінійної густини струму в обмотках біфіляра

$$j_i(p, \lambda) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{f(\lambda)}{\text{ch}(\lambda h)} \cdot F(p, \lambda), \quad (9)$$

де $F(p, \lambda) = (p \cdot j(p)) \cdot \left[p + \frac{\lambda}{(\mu_0 \cdot \gamma \cdot d)} \cdot \text{th}(\lambda h) \right]^{-1}$.

Оригінал функції $F(p, \lambda)$ можна визначити як згортку наступного вигляду [13]:

$$F(p, \lambda) \Leftrightarrow F(t, \lambda) = \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) * e^{-\Omega t}, \quad (10)$$

де $\Omega = \lambda(\mu_0 \gamma d)^{-1} \cdot \text{th}(\lambda h)$.

Після обчислень у виразу (10) для стаціонарного режиму в часі знаходимо

$$F(t, \lambda) \approx \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \Omega^2}} \cdot \cos(\omega t - \psi), \quad (11)$$

де $\psi = \arctg(\omega / \Omega)$.

З урахуванням (11) виконаємо в (9) зворотне косинус-перетворення Фур'є [13]. Отримаємо амплітудно-часову залежність для струму, що збуджується в обмотках біфіляра

$$j_i(t, y) = -j_m \cdot \frac{\omega}{2} \cdot \int_0^\infty \frac{\cos(\omega t - \psi)}{\sqrt{\omega^2 + \Omega^2}} \cdot \frac{f(\lambda)}{\text{ch}(\lambda h)} \cdot \sin(\lambda y) d\lambda. \quad (12)$$

Аналіз конкретних прикладів. Результат (12) проаналізуємо у двох можливих варіантах геометрії запропонованої індукторної системи.

1. Відстань між обмотками соленоїда-індуктора і біфіляра досить мала, тобто $h \rightarrow 0$.

У цьому випадку досить строго $\left\{ \Omega \rightarrow 0, \psi \rightarrow \frac{\pi}{2} \right\}$, і формула (12) набуває вигляду

$$j_i(t, y) \approx -\frac{J_m}{2} \cdot \sin(\omega t) \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot \sin(\lambda y) d\lambda. \quad (13)$$

Інтеграл у виразі (13) є синус-перетворення Фур'є функції поперечного розподілу збуджуючого струму. З урахуванням відповідної залежності з формули (3) вираз (13) запишеться наступним чином:

$$|j_i(t, y)| \approx -\frac{J_m}{2} \cdot \sin(\omega t) \cdot [\eta(y-a) - \eta(y-b)]. \quad (14)$$

Отриманий результат говорить про те, що в рамках прийнятої ідеалізації, коли $h \rightarrow 0$, функції збуджуючого струму і струму, індукованого в обмотках біфіляра, є однаковими, а амплітуда останнього є максимальною і дорівнює половині амплітуди струму в індукторі.

2. Відстань між обмотками соленоїда-індуктора і біфіляра довільна, але внутрішнє вікно в обмотках відсутнє, тобто, $a \rightarrow 0$. В цьому випадку косинус-перетворення Фур'є для функції поперечного розподілу збуджуючого струму з формули (3) набуває вигляду

$$f(\lambda) = \frac{2b}{\pi} \cdot \frac{\sin^2(\lambda b / 2)}{(\lambda b / 2)}. \quad (15)$$

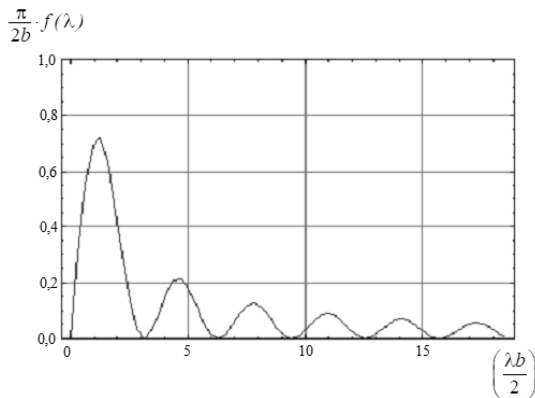


Рис. 2

Функціональна залежність $f(\lambda)$ від параметра $(\lambda b / 2)$ показана на рис. 2, з якого видно, що висота локальних максимумів зменшується з ростом параметра $(\lambda b / 2)$, і при $(\lambda b / 2) \geq 20$ можна вважати, що $f(\lambda) \rightarrow 0$ (це також слідує з формули (15)).

Цей результат дає змогу отримати наближені оцінки для максимальної величини змінної інтегрування в (12) – $\lambda_m \approx 40 / b$ і максимального значення параметра $\Omega_m = \lambda_m (\mu_0 \gamma d)^{-1} \cdot \text{th}(\lambda_m h) \approx 15 (\mu_0 \gamma d \cdot b)^{-1} \cdot \text{th}(15 \cdot h / b)$.

Для експериментальної моделі ($b=0,1$ м, $h=0,0005$ м, $d=0,0001$ м, $\omega=2\pi \cdot 25000$ Гц, $\gamma=5,85$ 1/(Ом·м)) знаходимо, що $\lambda_m = 400$, $\Omega_m = 10739,6$ Гц і $\Omega_m / \omega = 0,068$, $\psi = 0,478 \cdot \pi \approx \pi / 2$, $\text{ch}(\lambda_m \cdot h) = 1,02$. Виконані оцінки дозволяють застосувати вираз (12).

Отже, для густини струму, індукованого в обмотках біфіляра експериментальної моделі, знаходимо, що $|j_i(t, y)| \approx -\frac{J_m}{2} \cdot \sin(\omega t) \cdot \eta(y-b) \Big|_{b=0,1 \text{ м}}$. Отриманий результат в порівнянні з залежністю

(14) показує практичну незмінність форми і амплітуди індукованого струму у широкому діапазоні змінних параметрів запропонованої перетворювальної системи.

Закінчуючи аналіз, слід зазначити дві дуже важливі обставини, що є очевидними фізично, і які можна віднести до переваг запропонованої системи:

- мінімальний вплив полів індукованих струмів на процеси власне в обмотці збуджуючого соленоїда, оскільки внаслідок асиметрії збуджуваного магнітного поля інтеграл по замкненому контуру у поперечному розрізі від напруженості поля у внутрішній порожнині між обмотками біфіляру буде дорівнювати нулю;

- мінімальні втрати збуджених струмів, що визначається істотним зниженням паразитної міжвиткової ємності за рахунок тонкостінності обмоток біфіляра.

Висновки.

1. Запропоновано і проаналізовано дієздатність плоскої прямокутної перетворювальної системи, яка складається з тонкого соленоїда, розміщеного між гілками біфіляра – тонкостінними багатовитковими котушками.

2. Відзначено особливість запропонованої системи з використання електродинамічних ефектів, за якими має місце відсутність впливу вторинних контурів на первинні, відсутність проникнення

плоских хвиль крізь метал обмоток біфіляра у вільний простір, що дозволяє знизити втрати енергії, обумовлені її розсіюванням у навколишньому середовищі.

3. Показано практичну незмінність форми і амплітуди струму, збудженого в обмотках біфіляру, в достатньо широкому діапазоні можливих параметрів розглянутої системи.

4. Підтверджено конкретними прикладами якісні теоретичні висновки, що є свідомством працездатності запропонованої перетворювальної системи і дає змогу в подальшому перейти до рекомендацій з вибору нових конструкцій елементів обладнання в магнітно-імпульсній обробці металів.

Роботу виконано у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за держбюджетною темою, державний реєстраційний номер 0119U001298: «Енергозберігаючі маловитратні технології створення та ремонту гібридних транспортних засобів різного призначення».

1. Padmanabhan K., Swaminathan P. Electronic Components. New Delhi: Laxmi Publications LTD, 2006. 204 p.
2. Fireteanu V., Tudorache. Electromagnetic Forces in Transverse Flux Induction Heating. *IEEE Transaction on Magnetics*. 2000. 36(4), pp. 1792–1795.
3. Kudasov, Y.B., Maslov, D.A., Surdin, O.M. The efficiency of backward magnetic-pulse processing, *Technical Physics Letters*, 2017. Vol. 43. No 1. Pp. 92–94.
4. Батигін Ю.В., Гнатов А.В. Особливості збудження електромагнітних сил при магнітно-імпульсній обробці листових феромагнетиків. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 1. С. 71-77.
5. Hendrickson I.G., Hansen K.A. Electromagnetic dent remover with tapped work coil. Patent USA 4986102, 1991.
6. Olsen R.R, Electromagnetic work coil. Patent USA 7068134 B2, 2006.
7. Berg F.P., Smith D.B. Layered wing coil for an electromagnetic dent remover. Patent USA 7114242 B2, 2006.
8. Shneerson G.A, Dolotenko M.I., Krivosheev S.I. Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. Berlin: Walter de Gruyter, 2014. 429 p.
9. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 94 p.
10. Батыгин Ю.В., Шиндерук С.А., Чаплыгин Е.А., Еремина Е.Ф., Борисенко Б.В. Цилиндрическая индукторная система с внешним бифилярным соленоидом. Анализ электромагнитных процессов. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. № 6(278). С. 44-48.
11. Батыгин Ю.В., Шиндерук С.О., Чаплигин Е.О., Срьоміна О.Ф. Електромагнітні процеси в плоскій круговій системі з індуктором між тонкими катушками біфіляра. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 19-24. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2020.04.019>
12. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. 284 с
13. Корн Г., Корн Т., Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 831 с.
14. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К., Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов. М.: ООО «Издательство Оникс», 2006. 1056 с.

УДК 621.318

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ПЛОСКОЇ ПРЯМОУГОЛЬНОЇ СИСТЕМІ С ІНДУКТОРОМ МЕЖДУ ТОНКИМИ КАТУШКАМИ БІФІЛЯРА

Ю.В. Батыгин, докт.техн.наук, **С.А. Шиндерук**, канд.техн.наук, **Е.Ф. Ерєміна**, канд.техн.наук, **Е.А. Чаплыгин**, канд.техн.наук

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,

ул. Ярослава Мудрого, 25, Харьков, 61002, Украина,

e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

Цель исследований – анализ и оценка характеристик электромагнитных процессов в предложенной плоской прямоугольной системе, состоящей из тонкого соленоида-индуктора, расположенного между ветвями бифиляра – тонкостенными многovitkovыми катушками. Проведен анализ электромагнитных процессов и получены оценки возбуждаемых токов. Показано, что при минимальном зазоре между обмотками соленоида-индуктора и бифиляра временные функции возбуждающего тока и тока, индуцированного в обмотках бифиляра, одинаковы, а амплитуда последнего максимальна и равна половине амплитуды тока в индукторе. Получено, что предложенная система обладает практической неизменностью временной формы и амплитуды индуцированного тока в широком диапазоне варьируемых геометрических параметров. Отмечено минимальное влияние полей индуцированных токов на процессы в соленоиде-индукторе и минимальные потери при снятии

индуцированного сигнала с обмоток бифиляра. Физически первое объясняется асимметрией возбуждаемого магнитного поля относительно плоскости соленоида-индуктора, второе – существенным снижением паразитной межвитковой емкости за счет тонкостенности обмоток бифиляра. Полученные результаты позволяют дать практические рекомендации при выборе конструкторских решений для элементов новых схем обработки магнитно-импульсной обработки металлов. Библ 14, рис. 2.

Ключевые слова: бифилярная катушка, плоская прямоугольная система, магнитно-импульсная обработка металлов, преобразование энергии, соленоид-индуктор.

ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A FLAT RECTANGULAR SYSTEM WITH AN INDUCTOR BETWEEN THIN BIFILAR COILS

Yu.V. Batygin, S.O. Shinderuk, O.F. Yeryomina, E.A. Chaplygin

Kharkiv National Automobile and Highway University,

25, Yaroslava Mudruho Street, Kharkiv, 61002, Ukraine,

e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net.

The aim of the research is the analysis and evaluation of the electromagnetic processes characteristics in the proposed flat rectangular system consisting of a thin solenoid-inductor located between the branches of the bifilar, thin-walled multi-turn coils. The analysis of electromagnetic processes and the obtained estimates of the excited currents are carried out. It is shown that with a minimum gap between the windings of the solenoid-inductor and the bifilar, the time functions of the exciting current and the current induced in the bifilar windings are the same, and the amplitude of the latter is maximum and equal to half the current amplitude in the inductor. It was found that the proposed system has a practical invariance of the time shape and amplitude of the induced current in a wide range of variable geometric parameters. The minimal effect of the fields of induced currents on the processes in the solenoid-inductor and the minimum losses when removing the induced signal from the bifilar windings are noted. Physically, the first is due to the asymmetry of the excited magnetic field relative to the plane of the solenoid-inductor, the second is due to a significant decrease in spurious inter-turn capacitance due to the thinness of the bifilar windings. The obtained results allow us to give practical recommendations when choosing design solutions for elements of new circuits of equipment for magnetic pulse metal processing. References 14, figures 2.

Keywords: bifilar coil, flat rectangular system, magnetic-pulse treatment of metals, energy transformation, solenoid-inductor.

1. Padmanabhan K., Swaminathan P. Electronic Components. New Delhi: Laxmi Publications LTD, 2006. 204 p.
2. Fireteanu V., Tudorache. Electromagnetic Forces in Transverse Flux Induction Heating. *IEEE Transaction on Magnetics*. 2000. 36(4), pp. 1792–1795.
3. Kudasov, Y.B., Maslov, D.A., Surdin, O.M. The efficiency of backward magnetic-pulse processing, *Technical Physics Letters*, 2017. Vol. 43. No 1. Pp. 92–94.
4. Batyhin Yu.V., Hnatov A.V. The features of the electrical magnetic forces excitation in the magnetic pulse sheet ferromagnetic metal working. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 1. Pp. 71-77. (Ukr)
5. Hendrickson I.G., Hansen K.A. Electromagnetic dent remover with tapped work coil. Patent USA 4986102, 1991.
6. Olsen R.R, Electromagnetic work coil. Patent USA 7068134 B2, 2006.
7. Berg F.P., Smith D.B. Layered wing coil for an electromagnetic dent remover. Patent USA 7114242 B2, 2006.
8. Shneerson G.A., Dolotenko M.I., Krivosheev S.I. Strong and Superstrong Pulsed Magnetic Fields Generation. Berlin: Walter de Gruyter, 2014. 429 p.
9. Batygin Yu., Barbashova M., Sabokar O. Electromagnetic Metal Forming for Advanced Processing Technologies. Cham: Springer International Publishing AG, 2018. 94 p.
10. Batyhin Y.V., Shinderuk S.A., Chaplygin E.A., Yeryomina O.F., Borisenko B.V. Cylindrical inductor system with external bifilar solenoid. Analysis of electromagnetic processes. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2019. № 6(278). Pp. 43-88. (Rus)
11. Batyhin Y.V., Shinderuk S.O., Electromagnetic processes in a flat circular system with an inductor between thin bifilar coils. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 4. Pp. 19-24. (Ukr)
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.019>
12. Batygin Yu.V., Lavinskij V.I., Himenko L.T. Pulsed magnetic fields for advanced technology. Kharkiv: MOST-Tornado, 2003. 284 p. (Rus)
13. Korn H., Korn T. Mathematical Handbook. Moskva: Nauka, 1973. 831 p. (Rus)
14. Yavorskii B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. Physics handbook for engineers and students of universities. Moskva: Oniks Publishing, 2006. 1056 p. (Rus)

Надійшла 26.03.2020
Остаточний варіант 18.05.2020