

УДК 621.3:539.3

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ІНДУКТОРА З Ш-ПОДІБНИМ ОСЕРДЯМ ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

А.П. Ращепкін<sup>1</sup>, докт.техн.наук, І.П. Кондратенко<sup>2</sup>, чл.-кор. НАН України,  
О.М. Карлов<sup>3</sup>, канд.техн.наук, Р.С. Крищук<sup>4</sup>, канд.техн.наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
e-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net)<sup>1</sup>, [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net)<sup>2</sup>, [lexa.k.ua@gmail.com](mailto:lexa.k.ua@gmail.com)<sup>3</sup>, [kr@nas.gov.ua](mailto:kr@nas.gov.ua)<sup>4</sup>

Представлено метод аналізу електромагнітних процесів в індукторі з Ш-подібним феромагнітним осердям. Індуктор призначений для безконтактного збудження в металевій стрічці імпульсів магнітного поля і струмів високої густини для магнітно-імпульсної обробки площинного прокату металів. Збудження імпульсів струму в обмотці індуктора відбувається шляхом комутації електричного кола, що включає ємність, індуктивність індуктора, активний опір з'єднуючих проводів і витків індуктора та керований вентилює. Електричні параметри індуктора визначаються методом комп'ютерного моделювання в квазістационарному режимі в тривимірній постановці з використанням методу скінченних елементів для низки заданих значень сили струму. Встановлено аналітичні залежності параметрів розрядного кола – статичної та динамічної індуктивностей, а також активного опору, що вноситься, від потокозчеплення. За знайденими електричними параметрами із розв'язку нелінійного диференціального рівняння кола визначається нестационарний струм індуктора, що дає змогу розв'язати нестационарну електромагнітну задачу розподілу магнітних полів і струмів у металі. Бібл. 11, рис. 6.

**Ключові слова:** індуктор, магнітопластичний ефект, пластична деформація, імпульсний струм, нестационарне магнітне поле.

Останнім часом в експериментальних дослідженнях металофізиками було встановлено, що внаслідок впливу постійних і змінних магнітних полів, електричного струму високої густини змінюються механічні характеристики різних феромагнітних і немагнітних металів, таких як: межа плинності, межа міцності, максимальне подовження, повзучість, втомна міцність, а також релаксація напружень. Тобто проявляється магнітопластичний (МПЕ) або електропластичний (ЕПЕ) ефекти.



Рис. 1

Для ілюстрації суті магнітопластичного ефекту на рис. 1 згідно з [1] показано схематичне представлення механічного напруження в матеріалі (металева пластина) і його деформації («напруження–деформація»). У разі ввімкнення (точки А,С) і вимкнення (точки В,Е, D\*) магнітного поля видно, що в пружній області магнітне поле підвищує деформаційне напруження, тоді як його вимкнення спричинює протилежний ефект. Але в пластичній області ввімкнення магнітного поля спочатку призводить до стрибкоподібного падіння напруження (С-D), а після вимкнення поля (точка D\*) знову спостерігається швидке падіння напруження, і за падінням відразу наступає релаксація. Після релаксації напруження знову досягає нормального рівня (С\*). Таким чином, має місце як розміщення (позитивний МПЕ), так і зміцнення (негативний МПЕ) металів під впливом магнітного поля.

Численні приклади використання електро- і магнітно-імпульсної обробки металевих, а також неметалевих матеріалів [2–6, 9] свідчать про намагання дослідників віднайти способи зменшення

© Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Крищук Р.С., 2019  
ORCID ID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-3308-8032>, <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>,  
<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>, <sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1933-0144>

енергетичних витрат на обробку матеріалів з метою модифікації чи перетворення їхніх механічних властивостей.

З аналізу відомих досліджень також встановлено, що електропластичний або магнітопластичний ефекти досягаються за умови дії однополярних електричних або магнітних імпульсів, які збуджують в електропровідному середовищі струм густиною близько  $10^9$  А/м<sup>2</sup> (або магнітне поле напруженістю  $10^5$  А/м) і довжиною імпульсів 100...500 мкс [2–6].

У випадку реалізації ЕПЕ струм передається в електропровідне середовище кондуктивним способом [9]. МПЕ реалізується безконтактним способом передачі імпульсної електромагнітної енергії. Досягти МПЕ можна кількома шляхами – створювати імпульсне магнітне поле із застосуванням струмового контура та магнітних систем із феромагнітним осердям і обмоткою. В першому випадку на струмовий контур діють значні електродинамічні зусилля, які можуть його зруйнувати. За таких обставин струмовий контур стає витратним ресурсом, що на практиці підвищує вартість обробки. За умови використання магнітопроводів електродинамічні сили діють вже на осердя, якому не загрожує руйнування. В обох випадках розрахунок і аналіз електромагнітних процесів у розрядних колах ускладнений через нелінійний характер залежності поточкозчеплення від величини струму. Інакше кажучи, у разі дослідження імпульсних процесів в умовах, коли магнітне поле струмового контура взаємодіє з суцільним електропровідним середовищем, втрачається поняття індуктивності й треба оперувати визначенням поточкозчеплення, тобто виникає необхідність розв’язання суміщеної колопольової задачі. В [11] із використанням методу інтегральних рівнянь така задача розв’язана, але лише для вісесиметричної постановки. Для випадку довільної конфігурації магнітної системи та застосування магнітопроводу необхідно розглядати електромагнітне поле у тривимірній постановці та розв’язанні нелінійної задачі для електричного кола. Отже, існує потреба в розробці оригінального методу розв’язання такої задачі, в якій пропонується розрахунок суміщеної колопольової задачі розділити на окремі стадії. З одного боку, це надасть можливість обійти ресурсні обмеження обчислювальної техніки, а з другого – отримати розрахунковий інструмент, із застосуванням якого швидко знайти параметри імпульсних пристроїв.

**Метою роботи** є розроблення методу розрахунку імпульсного електромагнітного поля індуктора із Ш-подібним феромагнітним осердям, що призначений для безконтактного індукування в будь-якій металевій пластині однополярних імпульсів електричного струму для реалізації магнітопластичного ефекту.

Схематичний вигляд електромагнітного індуктора показано на рис. 2. Індуктор встановлюється над заготовкою на відстані кількох міліметрів. Багатовиткова обмотка індуктора виконується з масивного мідного проводу або мідної трубки і складається з певної кількості витків.

Стержень входить до складу магнітопроводу індуктора та конструктивно може виконуватися рухомим (рис. 2), що дасть змогу здійснити комбіновану обробку металевій пластині – механічним імпульсним навантаженням з одночасним збудженням у зоні навантаження імпульсного струму. На відміну від електромагнітної обробки [9] вихровий струм у пластині збуджується магнітним полем індуктора, і надійність електричного контакту не впливає на якість обробки.

У разі комутації розрядного кола, до складу якого входять ємність, індуктивність індуктора та активний опір з’єднуючих проводів і витків індуктора, за умови попередньо зарядженої ємності розпочинається перехідний процес розряду ємності на індуктивність і активний опір. Протікання електричного струму через індуктор створює магнітне поле, яке індукує вихрові струми в металевій пластині. Залежно від параметрів електричного кола перехідний процес може бути загасаючим періодичним або аперіодичним. У будь-якому випадку з застосуванням керованих ключів, вентилів, які шунтують ємність, перехідний процес із періодичного можна перевести в розряд аперіодичного [9].

Розрахунок розподілу електромагнітного поля та магнітної сили, яка діє на заготовку і стержень, в представленій електромагнітній системі (рис. 2) виконується методом скінченних елементів (МСЕ) для нестационарного перехідного процесу. Вхідними даними для такого розрахунку є: розміри магнітопроводу, стержня та котушки, заготовки; відстань від індуктора до заготовки; кількість провідників котушки; крива намагнічування сталі магнітопроводу; електропровідність заготовки; електропровідність провідників котушки та закон зміни струму в обмотці залежно від часу  $i(t)$ . З усіх перелічених даних невідомим є закон зміни струму  $i(t)$ .

Для знаходження функції струму  $i(t)$  в електричному колі (рис. 3, а) необхідно розв’язати диференціальне рівняння [7]

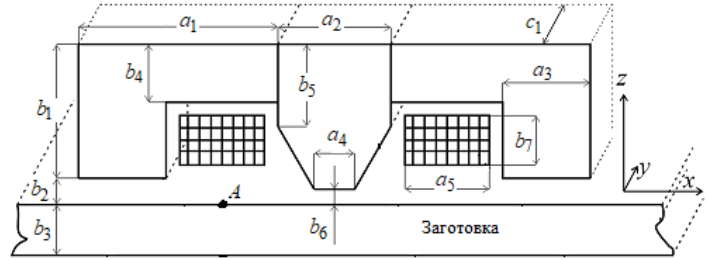
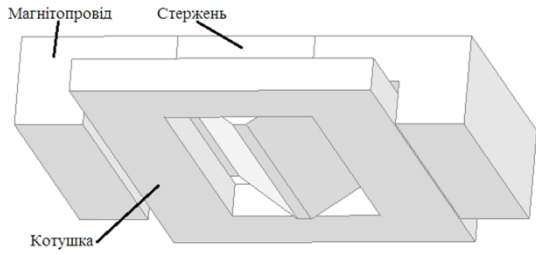


Рис. 2

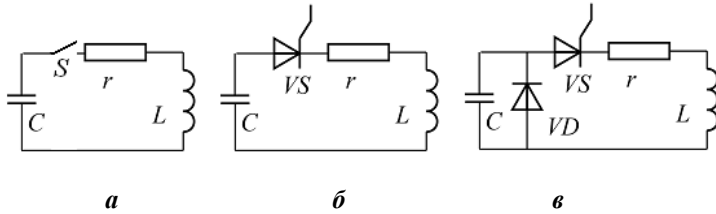


Рис. 3

$$\frac{d\psi}{dt} + r \cdot i + \frac{1}{C_0} \int i dt + U(0) = 0, \quad (1)$$

де  $\psi$  – потокозчеплення,  $r$  – сумарний активний опір електричного кола,  $i$  – струм,  $C$  – ємність,  $U(0)$  – напруга в початковий момент часу.

Після диференціювання рівняння (1)

приходимо до рівняння другого порядку

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + r \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i = 0. \quad (2)$$

За наявності феромагнітного осердя потокозчеплення індуктора нелінійним чином залежить від струму, і рівняння (2) доцільно представити у такому вигляді:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + r \cdot \frac{di}{d\psi} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C} \frac{i}{\psi} \psi = 0. \quad (3)$$

Величини

$$\frac{d\psi}{di} = L_d \quad \text{і} \quad \frac{\psi}{i} = L_s \quad (4)$$

є відповідно динамічною і статичною індуктивностями, які залежать від потокозчеплення з урахуванням впливу кривої намагнічування металу магнітопроводу.

Індуктивності  $L_d$  і  $L_s$  визначають із розв'язання наступної задачі про розподіл електромагнітного поля в електромагнітній системі (рис. 2). Для цього будемо використовувати квазістаціонарне наближення, що відповідає рівнянню

$$\text{rot rot } \mathbf{H} = -j\omega\sigma\mu \mathbf{H} + \omega^2\epsilon\mu \mathbf{H} \quad (5)$$

для заданого ряду значень амплітуди струму індуктора  $I$  та з урахуванням кривої намагнічування магнітопроводу  $B-H$ .  $\mathbf{H}$  – вектор напруженості магнітного поля,  $j$  – уявна одиниця,  $\omega$  – кутова частота,  $\sigma$  – електрична провідність,  $\mu$  – магнітна проникність,  $\epsilon$  – діелектрична проникність. Рівняння (5) доповнюється граничними умовами: рівність нулю нормальної складової індукції на зовнішніх границях розрахункової області; умови симетрії на площинах симетрії розрахункової області; рівність тангенціальних складових на внутрішніх границях всередині розрахункової області.

Частота струму  $f$  у квазістаціонарному режимі визначається так, щоб вона відповідала тривалості  $T_{imm.}$  однополярного імпульсу струму

$$f = 1/(2T_{imm.}). \quad (6)$$

Для демонстративного розрахунку приймається, що товщина  $b_3$  (рис. 2) латунної пластини з електропровідністю 22 МСм/м складає 8 мм, а відстань між магнітопроводом та заготовкою ( $b_2$ ) складає 2 мм. Розміри індуктора в міліметрах (рис. 2):  $a_1 = 57$ ;  $a_2 = 50$ ;  $a_3 = 25$ ;  $a_4 = 5$ ;  $a_5 = 28$ ;  $b_1 = 33$ ;  $b_2 = 2$ ;  $b_3 = 8$ ;  $b_4 = 17$ ;  $b_5 = 17$ ;  $b_6 = 2$ ;  $b_7 = 12$ ;  $c_1 = 100$ . Магнітопровід та стержень виконані з шихтованої сталі марки 10 (AISI-1010). Кількість витків у котушці – 8. Переріз мідного прямокутного пустотілого провідника – 5x5 мм, переріз прямокутного отвору провідника – 3x3 мм. Розра-

хунок виконується для ряду значень струму 500, 1000, ..., 9500 А і частоти 1000 Гц ( $T_{им.} = 500$  мкс) методом скінченних елементів у програмі Comsol [10] у тривимірній постановці.

У результаті виконаного розрахунку отримано низку комплексних значень потокозчеплення і електричних втрат у заготовці для кожної амплітуди струму в обмотці  $I_1, I_2, \dots, I_{n-1}, I_n$  (500, 1000, ..., 9500 А). Статична індуктивність  $L_{s1}, L_{s2}, \dots, L_{sn}$  визначається залежністю

$$L_{sn} = \frac{\text{Im}(\psi_n)}{I_n}, \quad (7)$$

де  $\psi_n$  – потокозчеплення, а динамічна індуктивність  $L_{d1}, L_{d2}, \dots, L_{dn}$  – залежністю

$$L_{dn} = \frac{\text{Im}(\psi_n - \psi_{n-1})}{I_n - I_{n-1}}. \quad (8)$$

Внесений опір визначається через потужність електричних втрат у пластині  $P_e$

$$r_{2n} = 2P_e / I^2. \quad (9)$$

Виконується апроксимація рядів статичної  $L_{s1}, L_{s2}, \dots, L_{sn}$  за (7), динамічної  $L_{d1}, L_{d2}, \dots, L_{dn}$  – за (8), індуктивностей і внесеного опору  $r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2n}$  – за (9) від потокозчеплення, які будуть використовуватися далі для визначення струму  $i(t)$ . На рис. 4 точками показано значення із рядів, а суцільними лініями – їхня апроксимація у вигляді функцій

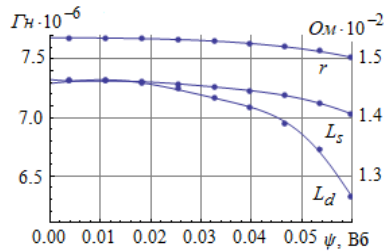


Рис. 4

$$L_s(\psi) = 7,32541 \times 10^{-6} - 5,85811 \times 10^{-6} \psi + 0,000881 \psi^2 - 0,05649 \psi^3 + 1,59776 \psi^4 - 21,2582 \psi^5 + 105,272 \psi^6, \quad (10)$$

$$L_d(\psi) = 7,29213 \times 10^{-6} + 4,55671 \times 10^{-6} \psi - 0,0164621 \psi^3 + 11,8824 \psi^5 - 4072,93 \psi^7 + 444203,0 \psi^9, \quad (11)$$

$$r_2(\psi) = 0,0153651 - 0,000405145 \psi - 1,27957 \psi^3 + 1,47126 \psi^5 - 14255,5 \psi^7. \quad (12)$$

Активний опір обмотки індуктора розраховується окремо і додається до внесеного активного опору  $r_2(\psi)$  з урахуванням коефіцієнта додаткових втрат  $k_r$ .

$$r(\psi) = r_2(\psi) + \frac{w \cdot l}{\sigma_1 \cdot s} k_r. \quad (13)$$

Тут  $w$  – кількість витків обмотки,  $l$  – середня довжина витка обмотки індуктора,  $\sigma_1$  – електропровідність провідників обмотки,  $s$  – площа перетину провідника обмотки. Коефіцієнт додаткових втрат  $k_r$  [8] дорівнює

$$k_r = 1 + \frac{h^4}{\delta^4} \left( \frac{w \cdot b / n}{(a_1 - a_3 + (a_2 - a_4) / 2)} \right)^2 \frac{n^2 - 0,2}{9} = 2,41, \quad (14)$$

де  $h=5$  і  $b=5$  – висота і ширина прямокутних пустотілих провідників обмотки, мм (поперечний переріз отвору –  $9 \text{ мм}^2$ );  $\delta = 10^3 \sqrt{1 / \mu \sigma_2 \pi f}$  – глибина проникнення магнітного поля, мм;  $n=2$  – кількість шарів обмотки;  $w=8$ ;  $l=0,428$  м;  $\sigma_2 = 2,2 \cdot 10^7$  1/Ом·м – електропровідність заготовки,  $\sigma_1 = 5 \cdot 10^7$  1/Ом·м;  $s = 16 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>. Таким самим чином визначається активний опір обмотки індуктора за інших конструктивних виконань, електрофізичних властивостей складових матеріалів індукційної системи та значень  $I$  та  $f$ .

Отримані залежності статичної та динамічної індуктивностей, активного опору від потокозчеплення (рис. 4) свідчать про нелінійний характер рівняння (3), що обумовлюється впливом нелінійної залежності магнітної проникності феромагнітного осердя. Індуктивність електромагнітної системи істотно залежить від потокозчеплення, а отже, від величини струму індуктора.

Коли відомі статична і динамічна індуктивності рівняння (3), виконується розрахунок струму  $i(t)$ . Величину ємності конденсатора можна оцінити за формулою

$$C = (T_{имп} / \pi)^2 L_s^{-1} \approx 3470 \text{ мкФ}, \quad (15)$$

де  $L_s \approx 7,3 \cdot 10^{-6}$  Гн (рис. 4). Як видно з виразу (15), за величиною ємності конденсатора можна встановити тривалість імпульсу  $T_{имп}$ . Амплітуда імпульсу струму в обмотці, рівень напруженості магнітного поля і густина струму в заготовці залежать від початкової напруги конденсатора.

Для знаходження функції струму  $i(t)$  розв'язується нелінійне рівняння (3) щодо потокозчеплення з використанням функцій (10)...(12), ємності (15), з початковими умовами за  $t = 0$ : струм в обмотці, а тому і потокозчеплення дорівнюють нулю, напруга на індукторі дорівнює напрузі на конденсаторі, яку задано рівною 400 В. Отже,

$$\psi = 0, \quad d\psi / dt = 400 \text{ В}. \quad (16)$$

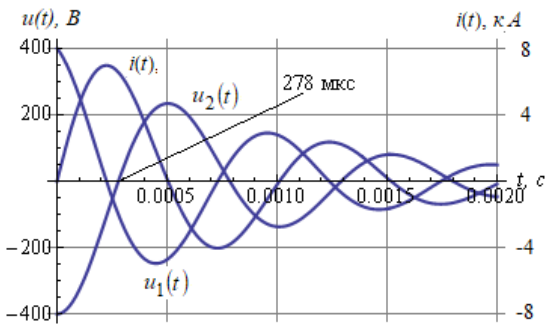


Рис. 5

Процес розряду конденсатора на електричне коло (рис. 3, а) показано на рис. 5, де  $i(t)$  – струм у провідниках індуктора,  $u_1(t)$  – напруга на індуктивності,

$$u_2(t) = -u_1(t) - i(t) \cdot r(t) \quad (17)$$

– напруга на конденсаторі, яка набуває на першому півперіоді нульового значення за  $t = 278$  мкс. Струм в індукторі відповідно до (4) визначається так:

$$i(t) = \psi(t) / L_s(\psi). \quad (18)$$

У випадку розряду конденсатора за схемою на рис. 3, б тиристор закривається, коли струм досягне нульового значення на півперіоді. І, таким чином, по обмотці протікає однополярний імпульс струму. Тобто після 0,0005 с (рис. 5) струм у схемі з тиристором буде дорівнювати нулю. Функція струму в схемі з тиристором може бути записана

$$i_1(t) = 8800 * e^{-1000*t} * \sin(2 * \pi * 1000 * t) * \theta(0,0005 - t), \quad (19)$$

де  $\Theta(\dots)$  – одинична узагальнена функція.

За наявності діода в схемі (рис. 3, в), який використовується для запобігання можливого виникнення значних перенапруг в індукторі та зворотного пробію тиристора, після досягнення напругою конденсатора  $u_2(t)$  позитивного значення ( $t = 278$  мкс, рис. 5) діод відкривається, що призводить до аперіодичного перехідного процесу. Електромагнітний процес в індукторі після  $u_2(t) \geq 0$  (після 278 мкс, рис. 5) відповідно до (3) описується рівнянням у  $r-L$  колі

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{r}{L_s} \cdot \psi = 0 \quad (20)$$

з початковою умовою за  $t = 278$  мкс (рис. 5):  $\psi(0,000278) = 0,0472$  Вб. Функція струму в схемі з тиристором та діодом (рис. 3, в) має вигляд

$$i_2(t) = 8800 * e^{-1000*t} * \sin(2 * \pi * 1000 * t) * \theta(0,000278 - t) + 12000 * e^{-2150*t} * \theta(t - 0,000278). \quad (21)$$

З урахуванням отриманих функцій струму (19) і (21) досліджено нестационарні електромагнітні процеси в індукційній системі з використанням методу скінченних елементів. Для нестационарного режиму виконується розв'язання нестационарного рівняння магнітного поля

$$\text{rot rot} \mathbf{H} = -\sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2}. \quad (22)$$

На рис. 6 показано зміну в часі миттєвої електричної потужності  $P$  у металевій пластині, напруженості магнітного поля  $H_y$  і густини струму  $J_x$  на поверхні заготовки (точка А, рис. 2). Індексом 1 позначено криві з заданим струмом  $i_1(t)$  (19), а індексом 2 –  $i_2(t)$  (21).

Густина струму в заготовці  $J_{x1}$  відрізняється від  $J_{x2}$  після 278 мкс від початку імпульсу: перша змінює свою полярність на протилежну до рівня 70% від початкового імпульсу, а друга плавно переходить до нульового значення. Таким чином, застосування діода (рис. 3, в) забезпечує можливість збудження в металевій пластині однополярного імпульсу струму  $J_{x2}$  на відміну від  $J_{x1}$ . Взаємодія магнітного поля індуктора і вихрових струмів у пластині призводить до виникнення електродинамічної сили, яка має знаковмінний характер, але на початковій стадії електродинамічної взаємодії відштовхує індуктор від пластини. Для кожного об'ємного елемента індуктора сила розраховується за таким виразом:

$$F_z = F_z = \iiint_S T_{zn} dS = \iiint_V \left( \frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \right) dV, \quad (23)$$

$$T_{zx} = \mu H_z H_x, \quad T_{zy} = \mu H_z H_y, \quad T_{zz} = \mu (H_z^2 - 0,5 \cdot H^2),$$

де  $F_z$  – складова вектора магнітної сили об'ємного тіла,  $T_{zn}$  – складова вектора магнітної сили, що діє на одиницю поверхні об'ємного тіла, зовнішня нормаль до якої є вектором за  $\mathbf{n}$ ,  $H$  – скалярна величина напруженості магнітного поля.

Якщо нормаль до поверхні співпадає з віссю  $z$ , тоді сила, що діє на цю поверхню, розраховується за виразом

$$F_z = \iint_S T_{zz} dS. \quad (24)$$

Максимальна сила відштовхування між пластиною та індуктором складає 11,78 кН у момент часу 0,21 мсек. Якщо центральний стержень у магнітопроводі (рис. 2) виконати рухомих, то він буде діяти на заготовку з максимальною силою 1,41 кН по осі  $z$ .

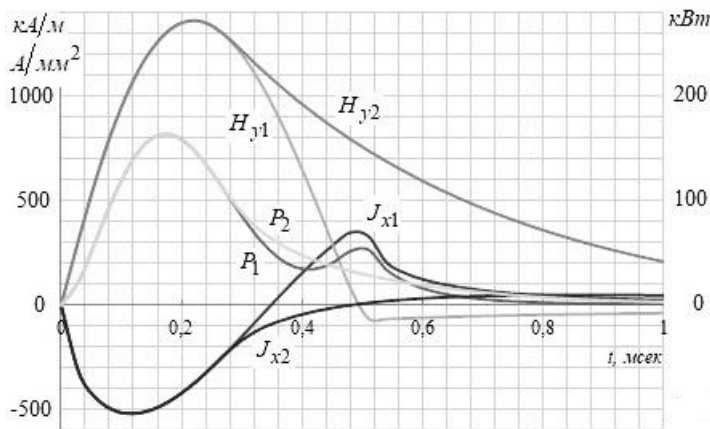


Рис. 6

### Висновки.

Розроблено метод розрахунку імпульсного електромагнітного поля індуктора з Ш-подібним феромагнітним осердям для збудження у металевій полосі однополярних імпульсів струму. Метод полягає у розв'язанні польової задачі в квазістационарному наближенні для низки значень величини струму за заданої частоти для встановлення апроксимаційних залежностей статичної, динамічної індуктивностей та активного внесеного опору. На другому етапі з урахуванням апроксимаційних залежностей визначається струм у розрядному колі у разі комутації. Завершальний етап полягає у розв'язанні нестационарного рівняння для електромагнітного поля індуктора з Ш-подібним феромагнітним осердям.

Для демонстративного розрахунку обрано індуктор із розмірами магнітопроводу 164x100x33 мм. Максимальна густина струму в заготовці локалізується безпосередньо під витками обмотки індуктора на поверхні заготовки й досягає  $5 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup> за амплітуди імпульсу струму в обмотці 7 кА і тривалості імпульсу 0,5 мсек. Імпульсна сила дії рухомого стержня магнітопроводу на заготовку досягає 1,41 кН.

Розрахунки показали, що за тривалості імпульсу 0,5 мсек використання діода у схемі паралельно із конденсатором забезпечує формування однополярного імпульсу електромагнітного поля з максимальними напруженістю магнітного поля  $1,35 \cdot 10^6$  А/м та густиною індукovanого струму в пластині  $5 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>. Схема без зворотного діода дає змогу сформувати два різнополярних імпульси струму в заготовці із значенням 0,33 мсек, амплітуди яких відрізняються на 26% –  $5 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup> і  $3,7 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>.

*Робота виконана за держбюджетною темою «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електромагнітної обробки електропровідних середовищ» («БАР'СР-2»), яка*

виконується згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України від 04.07.2018 р. (протокол №11). Державний реєстраційний номер теми 0117U007714.

1. Васильев М.А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. *Успехи физики металлов*. 2007. Том. 8. С. 65-105.
2. Кузнецов Н.Н. Влияние электро- и магнитно-импульсного воздействия на заготовку. *Обработка материалов давлением*. 2010. № 3(24). С. 126-129.
3. Комшина А.В., Помельникова А.С. Перспективность метода низкоэнергетической обработки материалов с использованием магнитного поля. *Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наука и Образование*. 2012. Эл. № ФС77 – 48211. С. 463-488. DOI: <https://doi.org/10.7463/0912.0454270>
4. Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В. Магнитно-импульсная и электроимпульсная обработка деталей машин. *Современные проблемы теории машин*. 2017. № 5. С. 113-115.
5. Сейдаметов С.В., Лоскутов С.В. Влияние импульсной электромагнитной обработки на структурные перестройки сплава титана ВТЗ-1. *Журнал фізики та інженерії поверхні*. 2016. Том 1. С. 4-8.
6. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Новый тип магнитопластических эффектов в линейных аморфных полимерах. *Физика твердого тела*. 2001. Том 43. Вып. 5. С. 827-832.
7. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том 2. М-Л.: Энергия, 1966. 407 с.
8. Постников И.М. Проектирование электрических машин. Киев: Гос. тех. лит. УССР, 1962. 736 с.
9. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Карлов О.М., Пашин М.О., Васюк В.В., Ящук В.А. Нестационарні електрофізичні процеси в системах зниження залишкових напружень зварних з'єднань. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 6. С. 10-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.010>
10. *Comsol multiphysics modeling and simulation software*. URL: <http://www.comsol.com/>
11. Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Пашин М.О., Васюк В.В. Вибір параметрів електромеханічного перетворювача індукційного типу для електродинамічної обробки зварних з'єднань. *Техн. електродинаміка*. 2017. № 5. С. 83-87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.083>

УДК 621.3:539.3

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ Ш-ОБРАЗНОГО ИНДУКТОРА ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

А.П. Рашепкин, докт.техн.наук, И.П. Кондратенко, чл.-корр. НАН Украины, А.Н. Карлов, канд.техн.наук, Р.С. Кришук, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net), [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net), [lexa.k.ua@gmail.com](mailto:lexa.k.ua@gmail.com), [kr@nas.gov.ua](mailto:kr@nas.gov.ua)

*Представлен метод анализа электромагнитных процессов в индукторе с Ш-образным ферромагнитным сердечником. Индуктор предназначен для бесконтактного возбуждения в металлической ленте импульсов магнитного поля и токов высокой плотности для магнитно-импульсной обработки плоскостного проката металлов с использованием магнитопластического эффекта в методах пластической деформации, основанных на дополнительном воздействии на металл импульсами магнитного поля. Электрические параметры индуктора определяются методом компьютерного моделирования в квазистационарном режиме в трехмерной постановке с использованием метода конечных элементов для ряда заданных величин тока. Возбуждение импульсов тока в обмотке индуктора выполняется путем разряда конденсатора с использованием управляемого тиристора и при наличии диода, который шунтирует конденсатор. По найденным электрическим параметрами из решения нелинейного дифференциального уравнения цепи определяется нестационарный ток индуктора, что позволяет решить электромагнитную задачу о распределении магнитных полей и токов в металле.*

Библ. 11, рис. 6.

**Ключевые слова:** индуктор, магнитопластический эффект, пластическая деформация, импульсный ток, нестационарное магнитное поле.

## ELECTROMAGNETIC FIELD OF W-SHAPED INDUCTOR FOR MAGNETIC-PULSE PROCESSING OF MATERIALS

A.P. Rashchepkin, I.P. Kondratenko, A.N. Karlov, R.S. Kryshchuk  
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,  
e-mail: [anatoly\\_raschepkin@ukr.net](mailto:anatoly_raschepkin@ukr.net), [dep7ied@ukr.net](mailto:dep7ied@ukr.net), [lexa.k.ua@gmail.com](mailto:lexa.k.ua@gmail.com), [kr@nas.gov.ua](mailto:kr@nas.gov.ua)

The method of analysis of electromagnetic processes in an inductor with a W-shaped ferromagnetic core is presented. The inductor is designed for contactless excitation in any metal plate of magnetic field pulses and high density currents. The inductor magnetic core has a movable middle part for an additional pulsed physical impact on the metal plate. Thus, the action of the inductor is for achieving a magnetoplastic effect (MPE) in metal plates with plastic deformation. Current pulses in the winding of the inductor are performed by discharging a capacitor on the circuit. A thyristor is included in the inductor circuit, which makes it possible to obtain unipolar current pulses in the inductor winding. Parallel to the capacitor, a diode is included, which makes it possible to obtain unipolar, but slowly decaying current pulses in the winding. The electrical parameters of the inductor are determined by computer simulation for a quasi-stationary mode using the finite element method for the set of current values. It takes into account the magnetization curve of the magnetic core. The transient current is determined from the solution of the nonlinear differential equation of the electrical circuit. The current allows us to solve the transient electromagnetic problem in a metal plate using the finite element method. The conditions for obtaining a unipolar pulsed electromagnetic field in a metal plate are investigated. The method in this article is used for calculation electromagnetic problems in the inductor with magnetic core 164x100x33 mm. Magnetic forces which acting on the movable part of the magnetic circuit and on the metal plate is obtained. References 11, figures 6.

**Key words:** inductor, magnetoplastic effect, plastic deformation, pulsed eddy current, electromagnetic field.

1. Vasilev M.A. Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Overview. *Uspekhi fiziki metallov*. 2007. Vol. 8. Pp. 65-105. (Rus)
2. Kuznetsov N.N. Influence of electro impulse and magneto impulse effects on the workpiece. *Obrabotka materialov davleniem*. 2010. No 3(24). Pp. 126-129. (Rus)
3. Komshina A.V., Pomelnikova A.S. Promising method of low-energy materials processing using a magnetic field. *Nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana. Nauka i Obrazovanie*. 2012. No FS77 – 48211. Pp. 463-488.  
DOI: <https://doi.org/10.7463/0912.0454270> (Rus)
4. Samohvalov V.N., Samohvalova Zh.V. Magnetic-pulse and electric pulse treatment of machine parts. *Sovremennye problemy teorii mashin*. 2017. No 5. Pp. 113-115. (Rus)
5. Seidametov S.V., Loskutov S.V. The influence of pulse electromagnetic field on rebuilding of structure of titanium alloy VT3-1. *Zhurnal fizyky ta inzhenerii poverkhni*. 2016. Vol. 1. Pp. 4-8. (Rus)
6. Golovin Yu.I., Morgunov R.B. New type of magnetoplastic effects in linear amorphous polymers. *Fizika tverdogo tela*. 2001. Vol. 43(5). Pp. 827-832. (Rus)
7. Nejman L.R., Demirchyan K.S. Theoretical foundations of electrical engineering. Moskva-Leningrad: Energiia, 1966. 407 p. (Rus)
8. Postnikov I.M. Electrical machinery design. Kiev: Gosudarstvennoe izdanie tekhnicheskoi literatury USSR, 1962. 736 p. (Rus)
9. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Zhyltsov A.V., Karlov O.M., Pashchyn M.O., Vasyuk V.V., Yashchuk V.A. Electrophysical unsteady processes in the system to reduce residual stresses welds. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 6. Pp.10-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.010> (Ukr)
10. *Comsol* multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
11. Kondratenko I.P., Zhyltsov A.V., Pashchyn N.A., Vasyuk V.V. Selecting induction type electromechanical converter for electrodynamic processing of welds. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 83-87.  
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.083> (Ukr)

Надійшла 29.03.2019  
Остаточний варіант 02.07.2019