

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ СПІРАЛЕПОДІБНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МАНІТОІМПУЛЬСНОГО ОБРОБЛЕННЯ НЕМАГНІТНИХ МЕТАЛЕВИХ СМУГ З ФЕРОМАГНІТНИМ ЕКРАНОМ

А.П. Ращепкін^{*}, докт.техн.наук, **І.П. Кондратенко**^{**}, чл-кор. НАН України,
О.М. Карлов^{***}, канд.техн.наук, **Р.С. Крищук**^{****}, канд.техн.наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: dep7ied@ukr.net

Запропоновано метод визначення електричних параметрів заступної схеми заміщення і електромагнітних та силових характеристик індукційної системи з спіралеподібною обмоткою і феромагнітним екраном для оброблення немагнітних тонколистових металевих смуг шляхом створення в них магнітопластичного, електропластичного ефектів внаслідок протікання вихрових струмів. Під смугою розміщується феромагнітний екран, а над ним – спіралеподібна обмотка. Електромагнітні параметри індуктора визначаються комп'ютерним моделюванням з використанням методу скінченних елементів у припущенні протікання гармонічних струмів. Дослідження проведено за умови попередньо заданого значення величини магнітної проникності феромагнітного екрану та двох марок алюмінієвих сплавів в діапазоні товщини від 2 до 8 мм. За розрахованими значеннями електрорушійної сили обмотки індуктора визначаються активний опір та індуктивність послідовної схеми заміщення індукційної системи. Для заданого значення напруги на ємності та очікуваної тривалості імпульсу струму розглянуто процес розряду конденсатора на rLC коло. Визначено вплив феромагнітного екрану на електромагнітні процеси в індукційній системі. Досліджено електромагнітну силу між спіралеподібною обмоткою та смугою, густину струму в смузі, а також моменти часу, за яких струм та сила мають максимальні значення. Бібл. 14, рис. 6, табл. 2.

Ключові слова: електропластична обробка, електромагнітні параметри, феромагнітний екран, однополярний імпульс струму, перехідні процеси.

Вступ. Останнім часом в чисельних експериментальних дослідженнях [1] металофізиками встановлено, що у разі пластичної деформації в присутності постійних або змінних у часі магнітних полів змінюються механічні характеристики різних феромагнітних і немагнітних металів: межа плинності, межа міцності, максимальне подовження, повзучість, втомна міцність, а також релаксація напруг. Так, під час обробки імпульсним магнітним полем заготовок з алюмінію та міді за напруженості імпульсу магнітного поля з амплітудою до 10^7 А/м і тривалістю імпульсу 10^{-3} с досягається зростання пластичності заготовок [1]. Оброблення матеріалів магнітним полем призводить до появи магнітопластичного ефекту, а оброблення електричним струмом – до електропластичного ефекту.

Досягти електропластичного ефекту можна через кондуктивну передачу електричного струму до оброблюваного матеріалу [2] або через індукування струму змінним в часі імпульсним магнітним полем [3, 4]. Спосіб, за якого струм передається кондуктивно, реалізовано в пристроях електродинамічної обробки [2, 5, 6]. Відомі також аналітичні і чисельні методи по дослідженню індуктивного збудження струмів імпульсними магнітними полями в електропровідних середовищах обмеженої товщини. Так, в [7] розглядається аналітичний розв'язок задачі розрахунку тривимірного квазістаціонарного електромагнітного поля імпульсного струму, що протікає поблизу електропровідного тіла з плоскою поверхнею, в [4] – аналітичний розв'язок струмів в обмотці індуктора з Ш-подібним магнітопроводом, в [8] досліджено параметри індукційної системи і окремо вплив на параметри лобових частин обмотки з магнітопроводом і без магнітопроводу, в роботі [3] – досліджено розподіл імпульсного струму і магнітного тиску в немагнітній пластині в часі та просторі

за умови, коли її товщина менша за глибину проникнення струму на еквівалентній частоті, що відповідає тривалості імпульсу.

Задля реалізації електропластичного ефекту, який ґрунтується на застосуванні однополярних імпульсів струму високої густини (10^9 А/м²) для індукційного (безконтактного) збудження вихрових струмів у немагнітних металевих смугах, вперше досліджується індукційна система зі спіралеподібною обмоткою з використанням феромагнітного екрану (рис. 1). В [9, 10, 11] для одержання електропластичного ефекту в міді, алюмінії та нержавіючій сталі рекомендовано густину струму в межах 1...1,5 кА/мм² відповідно. У випадках коли товщина смуги менша за глибину проникнення струму для збудження вказаної величини густини струму по обмотці індукторної системи буде протікати неприпустимо великий струм. Тому запропоновано збільшити електромагнітний зв'язок за рахунок встановлення додаткового феромагнітного екрану. Подібна індукційна система без магнітопроводу та з магнітопроводом, без феромагнітного екрану (позначення 3, рис. 1) досліджувалася у роботі [12] для збудження пружних коливань у бетонних конструкціях.

На рис. 1 показано ескіз індукційної системи, що також використовується для чисельного двовимірного вісесиметричного моделювання, наприклад, методом скінченних елементів. На рис. 1 позначено: 1 – спіралеподібна обмотка, 2 – металева немагнітна смуга, 3 – феромагнітний екран. З метою усунення перегріву багатовиткова обмотка індуктора виконується водоохолоджуваною, з

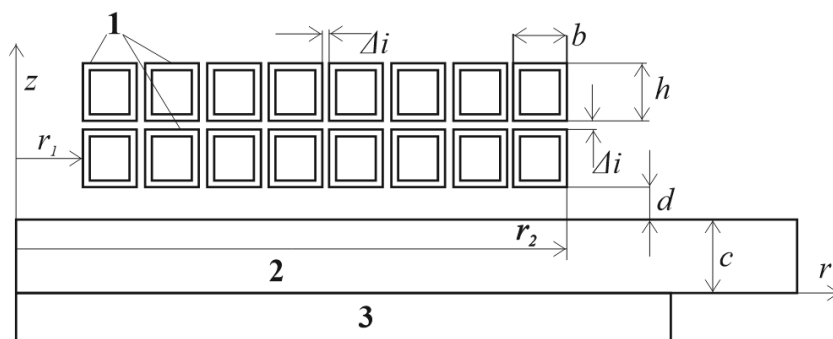


Рис. 1

порожнистого прямокутного мідного проводу. Збудження однополярного імпульсу струму пропонується виконувати шляхом розряджання на обмотку індуктора попередньо зарядженого конденсатора, а комутацію здійснити за допомогою керованого тиристора.

Вибір режиму роботи розрядного кола за незмінної геометрії індуктора, вочевидь,

визначається товщиною полоси, що обробляється, та її електрофізичними властивостями. Чисельний розрахунок режиму роботи розрядного кола буде пов'язано з сумісним розв'язком задач електромагнітного поля і електричного кола. В умовах широкого діапазону зміни товщини і електропровідності матеріалів та оперативного керування процесом електромагнітної обробки чисельний розрахунок може зайняти досить тривалий час. Тому доцільно розглянути спрощений метод визначення характеристик індукційної системи для магніто-імпульсної обробки металевих смуг, в якому були би поєднані чисельний розрахунок електромагнітного поля і сил та аналітичний підхід до розрахунку перехідного процесу в електричному колі.

Мета роботи. Розроблення спрощеного методу визначення характеристик індукційної системи з урахуванням впливу феромагнітного екрану на розподіл змінного в часі магнітного поля, електромагнітних сил індукційної системи і густини струмів в електропровідній смугі.

Визначення електричних параметрів. Задля представлення методу визначення характеристик індукційної системи розглянемо розрахунок електричних параметрів індукційної системи, що заміщується послідовною електричною схемою. Активний опір та індуктивність системи визначаються комп'ютерним моделюванням методом скінченних елементів в режимі гармонічних струмів при квазістаціонарному наближенні і з заданою комплексною амплітудою струму в обмотці, що використовувалося в [4, 8]. З метою усунення перегріву багатовиткова обмотка індуктора виконується водоохолоджуваною з мідної прямокутної труби, наприклад, ДПРХМ 5,0×5,0×1,0 БР М1 з електропровідністю $\sigma_w = 5 \cdot 10^7$ См/м. Переріз провідника індуктора становить $s_w = 16 \cdot 10^{-6}$ м². Задля встановлення впливу наявності феромагнітного екрану на електричні параметри задано такі лінійні електрофізичні властивості матеріалу екрану: $\sigma = 0$ См/м, $\mu_r = 1$, що еквівалентно відсутності цього екрану, і $\sigma = 4 \cdot 10^6$ См/м, $\mu_r = 400$. Товщина немагнітної смуги – $c = \{8, 6, 4, 2\}$ мм (рис. 1), відстань d між індуктором і пластиною з урахуванням величини виткової ізоляції складає 4 мм. Відстань між витками і шарами індуктора Δi з урахуванням величини виткової ізоляції складає 1 мм.

Внутрішній r_1 і зовнішній r_2 радіуси індуктора відповідно 10 і 58 мм. Число витків $w=16$ і число шарів індуктора $n=2$.

В табл. 1 представлено результати розрахунку величини напруги u індуктора за амплітуди струму в обмотці $I_m = 11200$ А для різних значень товщини смуги c і двох величин частоти струму f . Амплітуда струму в обмотці відповідає порядку величин за умов досягнення необхідної густини

Таблиця 1						
Немагнітна пластина з електропровідністю $\sigma = 33 \cdot 10^6$ СМ/М (Алюміній)						
Параметри екрану	f , Гц	Параметр	$c = 8$ мм	$c = 6$ мм	$c = 4$ мм	$c = 2$ мм
$\sigma_e = 0$ СМ/М, $\mu_r = 1$	1000	u , В	42+i432	41+i432	41+i426	64+i417
		r_n , МОм	3,75	3,66	3,66	5,71
		L , мкГн	6,14	6,14	6,06	5,93
	500	u , В	26+i223	26+i223	33+i219	57+i225
		r_n , МОм	2,32	2,32	2,95	5,09
		L , мкГн	6,34	6,34	6,23	6,40
$\sigma_e = 4 \cdot 10^6$ СМ/М, $\mu_r = 400$	1000	u , В	42+i432	41+i432	40+i426	63+i413
		r_n , МОм	3,75	3,66	3,57	5,63
		L , мкГн	6,14	6,14	6,06	5,87
	500	u , В	26+i223	26+i223	32+i217	59+i217
		r_n , МОм	2,32	2,32	2,86	5,27
		L , мкГн	6,34	6,34	6,17	6,17

Таблиця 2						
Немагнітна пластина з електропровідністю $\sigma = 15 \cdot 10^6$ СМ/М (АМГ6)						
Параметри екрану	f , Гц	Параметр	$c = 8$ мм	$c = 6$ мм	$c = 4$ мм	$c = 2$ мм
$\sigma_e = 0$ СМ/М, $\mu_r = 1$	1000	u , В	55,7+i453,2	57+i447,6	71+i440,3	122+i457
		r_n , МОм	4,97	5,09	6,34	10,89
		L , мкГн	6,44	6,36	6,26	6,50
	500	u , В	36+i229	42+i227	55,4+i231	77,65+i263
		r_n , МОм	3,21	3,75	4,91	6,88
		L , мкГн	6,51	6,45	6,57	7,48
$\sigma_e = 4 \cdot 10^6$ СМ/М, $\mu_r = 400$	1000	u , В	54+i454	55,47+i447	69,2+i436	129+i440
		r_n , МОм	4,82	4,91	6,16	11,52
		L , мкГн	6,45	6,36	6,20	6,26
	500	u , В	35+i228	41+i223	58,3+i222	104+i246
		r_n , МОм	3,13	3,66	3,21	9,29
		L , мкГн	6,48	6,34	6,31	6,99

струму в смузі, що обробляється, хоча для системи з прийнятими лінійними властивостями матеріалів амплітуда струму не впливає на значення величин опору та індуктивності. Розрахунок виконано без урахування втрат в спіралеподібній обмотці індуктора, а тому напругу u можна назвати електрорушійною силою (ЕРС).

Визначення електричних параметрів індукційної системи з використанням приведеної в табл. 1 або 2 комплексної величини напруги u (ЕРС) індуктора виконується за виразами:

$$r_n = \operatorname{Re}(u/I_m), \quad (1)$$

$$L = \operatorname{Im}(u/I_m)/(2\pi f), \quad (2)$$

$$r = r_n + \frac{w \cdot \pi (r_1 + r_2)}{\sigma_w \cdot s_w} k_r, \quad (3)$$

$$k_r = 1 + \frac{h^4}{\delta^4} \left(\frac{w \cdot b}{(b + \Delta l) \cdot w + 4 \cdot r_1} \right)^2 \frac{n^2 - 0,2}{9}. \quad (4)$$

Тут r_n – активний опір індукційної системи, що обумовлений протіканням струму в немагнітній металевій смугі; L – індуктивність; r – повний опір індукційної системи, з урахуванням втрат в обмотці; k_r – коефіцієнт додаткових втрат [13], який становить 3,18 для індукційної системи з представленими у цій статті параметрами; n – кількість шарів обмотки.

З табл. 1 видно, що величина напруги індукційної системи практично не залежить від товщини смуги, якщо товщина цієї смуги перевищує глибину проникнення магнітного поля на частоті $f = 1000$ Гц. Електропровідність смуги відповідає алюмінію $\sigma = 33$ МСм/м. Глибина проникнення магнітного поля при цьому дорівнює

$$\delta = 10^3 \sqrt{2 / (\mu_0 \sigma 2 \pi f)} = 2,8 \text{ мм}, \quad (5)$$

а за $f = 500$ Гц – 3,9 мм. Величина електрорушійної сили обмотки індуктора лишається практично незмінною, якщо товщина смуги перевищує 3 мм за частоти струму $f = 1000$ Гц, і 4 мм за частоти струму $f = 500$ Гц.

Лише за товщини смуги, що менше глибини проникнення магнітного поля, електричні параметри індукційної системи відрізняються від значень за товщини смуги більшої за глибину проникнення магнітного поля (табл. 1). Вплив феромагнітного екрану при цьому є незначним. Помітні зміни починаються тільки за товщини полоси менше за глибину проникнення струму. Це демонструють результати по визначенню характеристик індукційної системи під час обробки сплаву АМг6 (табл. 2). Так активний опір за наявності феромагнітного екрану збільшується на 34% (частота 0,5 кГц) і на 5,7% (1 кГц), а індуктивність зменшується відповідно на 3,6% та 1%.

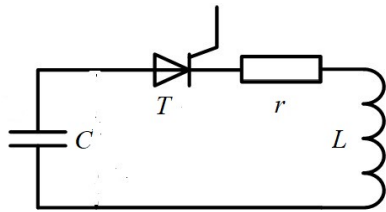


Рис. 2

Визначення імпульсного струму. Для дослідження перехідних процесів імпульсний струм в обмотці індуктора збуджується шляхом розряду попередньо зарядженого до напруги U конденсатора ємністю C в електричному колі (рис. 2) з керованим тиристором і знайденим вище активним опором r (4) та індуктивністю L (3). У разі досягнення напруги заряду

конденсатора від системи живлення заданої величини тиристором здійснюється замикання електричного кола, а тоді через певний проміжок часу при досягненні струму в індукторі нульового значення після $1/2$ періоду його коливання тиристор розмикає електричне коло, забезпечуючи таким чином протікання однополярного імпульсу струму в обмотці індуктора.

Визначення струму в електричному колі (рис. 2) здійснюється у припущенні лінійних властивостей феромагнітного екрану. Таке припущення є виправданим, з одного боку припущенням щодо роботи на лінійній ділянці кривої намагнічування, а з іншого, наявністю демпфування магнітного поля оброблюваною смугою з високою електро-провідністю.

Струм в колі електро-магнітної системи в таких умовах задо-вольняє диференційному рівнянню [14]

$$L \frac{di}{dt} + r \cdot i + \frac{g}{C} = 0, \quad g = g(0) + \int_0^t i \cdot dt, \quad (6)$$

де g – заряд конденсатора; $g(0)$ – заряд конденсатора у момент часу $t = 0$; i – струм в електричному колі (рис. 2).

Після диференціювання (6) за часом t отримуємо рівняння другого порядку

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + r \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0, \quad (7)$$

характеристичне рівняння якого має два корені

$$\gamma_{1,2} = -\frac{r}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \quad \alpha = \frac{r}{2L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (8)$$

І, таким чином, рішення рівняння (7) має дві сталі інтегрування, для визначення яких потрібно задати дві початкові умови. Першою умовою є припущення, що струм в електричному колі в початковий момент часу ($t = 0$) дорівнює нулю, а за другу будемо вважати, що початкова напруга конденсатора дорівнює $U = g(0)/C$ і, відповідно до рівняння (6), за $t = 0$, повинна виконуватися умова $di/dt = -U/L$.

З урахуванням вказаних початкових умов після комутації струм в обмотці індуктора описується залежністю

$$i(t) = -\frac{U}{2L\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}}(e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t}). \quad (9)$$

Оскільки за початкових умов було прийнято, що імпульс струму відповідає певній частоті (500 або 1000 Гц), то ємність конденсатора для одержання такої частоти струму вибирається за виразом

$$C = 1/\omega_0^2 L, \quad \omega_0 = 2\pi f. \quad (10)$$

Процес розряду конденсатора залежить від співвідношення між параметрами rLC кола (рис. 2), які і визначають чи будуть корені характеристичного рівняння (8) дійсними або комплексними, і тим самим означати чи буде розряд аперіодичним або коливальним загасаючим. Використання аперіодичного розряду для збудження однополярного імпульсу струму є недоцільним, оскільки за заданого конструктивного виконання індукційної системи величина струму індуктора стає значно меншою, ніж за коливального загасаючого розряду.

За умови комплексних коренів характеристичного рівняння струм індуктора має вигляд [14]

$$i(t) = -\frac{U}{\omega_1 \cdot L} \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot e^{-\alpha \cdot t}. \quad (11)$$

Оскільки вплив феромагнітного екрану стає більш вагомим, коли товщина електропровідної смуги c (рис. 1) приймає значення менші, ніж глибина проникнення магнітного поля, то обмежимося розглядом розрядних процесів для товщини смуги $c = 2$ мм і частоти $f = 1000$ Гц. Тоді, відповідно до табл. 2 за відсутності феромагнітного екрану із виразів (1)–(4), (9) параметри кола дорівнюють: $r = 0,0241$ Ом; $k_r = 3,181$; $L = 6,5 \cdot 10^{-6}$ Гн; $C = 0,0039$ Ф та, відповідно до (8), кутова частота власних загасаючих коливань $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = 6003,86 \text{ c}^{-1}$, коефіцієнт загасання $\alpha = 1852,58 \text{ c}^{-1}$ і тривалість імпульсу $T_1 = \pi/\omega_1 = 0,000523262 \text{ с}$. Вважаючи, що у початковому стані конденсатор був заряджений до заданої напруги $U = 850$ В, знайдемо за виразом (11) величину імпульсу густини струму в провідниках обмотки індуктора

$$j = \frac{i(t)}{s_w} = \frac{U}{\omega_1 \cdot L \cdot s_w} \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \theta(T_1 - t) = 1,36129 \cdot 10^9 e^{-1852,58t} \sin(6003,86t) \theta(0,000523262 - t), \quad (12)$$

в якому шляхом введення одиничної узагальненої функції $\theta(\dots)$ враховано, що тиристор закривається

у разі переходу струму через нуль, і густина струму в індукторі змінюється у відповідності до рис. 3.

Таким же чином визначаються електричні параметри індукційної системи за наявності феромагнітного екрану, та інших розмірів (рис. 1), частоти f , електрофізичних властивостях індукційної системи.

Тоді відповідно до табл. 2 за наявності феромагнітного екрану із співвідношень (1)–(4), (9) параметри кола приймають значення $r = 0,0247$ Ом; $k_r = 3,181$; $L = 6,24541 \cdot 10^{-6}$ Гн; $C = 0,00405583$ Ф і відповідно до (7) кутова частота власних коливань $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = 5964,4 \text{ c}^{-1}$, коефіцієнт загасання $\alpha = 1976$

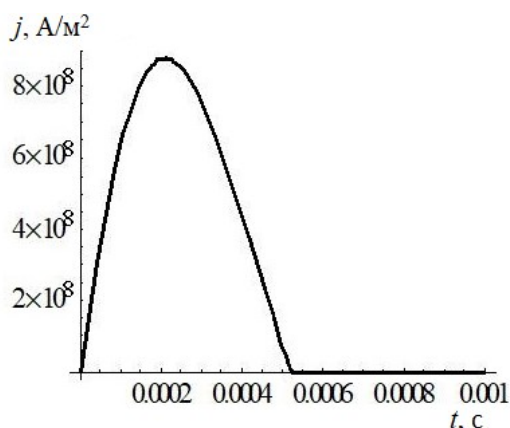


Рис. 3

с^{-1} і тривалість імпульсу $T_1 = \pi / \omega_1 = 0,000526726$ с. Вважаючи, що в початковому стані конденсатор був заряджений до напруги $U = 850$ В, знайдемо величину імпульсу густини струму в провідниках обмотки індуктора

$$j = \frac{U}{\omega_1 L S_w} \sin(\omega_1 t) e^{-\alpha t} \cdot \theta(T_1 - t) =$$

$$= 1,426 \cdot 10^9 e^{-1976t} \sin(5964,4t) \theta(0,000527 - t)$$

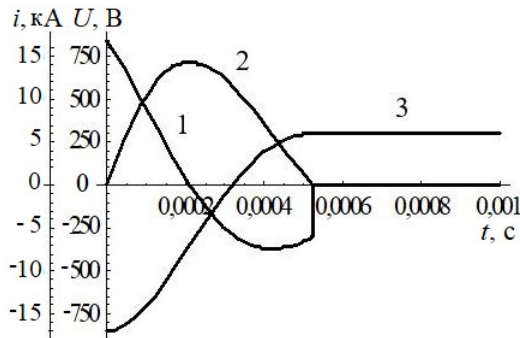


Рис. 4

напруга на конденсаторі лишається незмінною на рівні 250 В до наступного його заряджання. При цьому можливо або дозарядити конденсатор до позитивної напруги 850 В, і для запобігання небажаних для електропластичної обробки знакозмінних імпульсів струму потрібно зміщувати індуктор в нову зону обробки приблизно на розмір діаметру індуктора, або перезаряджати конденсатор до попередньої напруги (-850 В), що є менш економічним, але дає змогу збуджувати в індукторі однополярні імпульси струму однакової (не знакозмінної) полярності і повторно використовувати їх в поточній області оброблюваної смуги.

Густина індуктованих струмів і сил в електропровідній смугі. На рис. 5 наведено порівняння величини густини вихрового струму, який збуджується на поверхні електропровідної

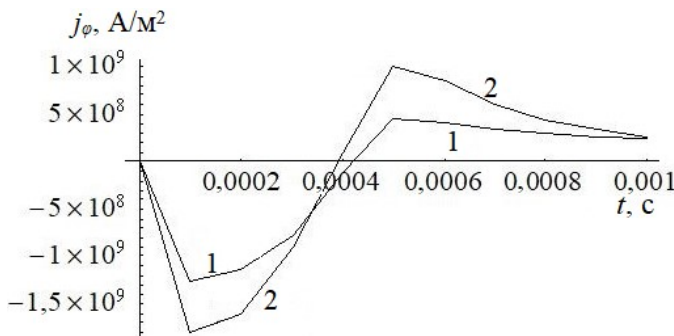


Рис. 5

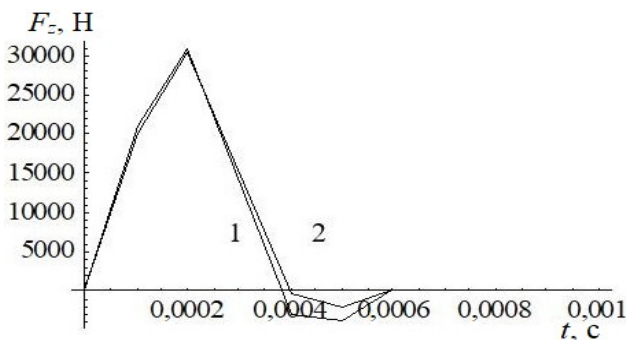


Рис. 6

яка в загальному вигляді мало відрізняється від (12).

Процес розряду конденсатора на електричне коло з використанням феромагнітного екрану для товщини смуги $c = 2$ мм і частоти $f = 1000$ Гц показано на рис. 4. Для розрахунку використано метод скінченних елементів у режимі розрахунку перехідних процесів із виразом струму в обмотці (12). Тут, як і в [14], представлено такі залежності: 1 – зміна напруги на індуктивності L (рис. 2), 2 – струм в індукторі з виразу (12), 3 – напруга на конденсаторі. Під час досягнення струмом індуктора нульового значення тиристор закривається, і в результаті розімкнення електричного кола струм і напруга в індукторі в подальшому приймають нульові значення, а

напруга на конденсаторі лишається незмінною на рівні 250 В до наступного його заряджання. При цьому можливо або дозарядити конденсатор до позитивної напруги 850 В, і для запобігання небажаних для електропластичної обробки знакозмінних імпульсів струму потрібно зміщувати індуктор в нову зону обробки приблизно на розмір діаметру індуктора, або перезаряджати конденсатор до попередньої напруги (-850 В), що є менш економічним, але дає змогу збуджувати в індукторі однополярні імпульси струму однакової (не знакозмінної) полярності і повторно використовувати їх в поточній області оброблюваної смуги.

Густина індуктованих струмів і сил в електропровідній смугі. На рис. 5 наведено порівняння величини густини вихрового струму, який збуджується на поверхні електропровідної смуги товщиною 2 мм. Крива 1 відповідає випадку використання феромагнітного екрану, крива 2 – за його відсутності. Звертає на себе увагу неочікуване зниження густини збуджуваних струмів в смугі у разі використання феромагнітного екрану, обумовлене більш глибоким проникненням магнітного поля в смугу. Характерно, що для обох виконань магнітної системи максимум густини індуктованих струмів збуджується на першій чверті тривалості імпульсу струму в індукторі (за $t = 0,0001$ с), а не за його максимумі (за $t = 0,0002$ с), що також спостерігалось і в [3]. Крім того, при закінченні імпульсу струму в індукторі в оброблюваній смугі зберігаються загасаючі струми достатньо високої густини, що потребує для їхнього суттєвого зниження зменшення частоти повторення імпульсів. При цьому зменшується просторовий крок зсуву індуктора відносно оброблюваної смуги, і таким чином знижується продуктивність електро-пластичної обробки.

Потрібна для реалізації електро-пластичного ефекту густина струму призводить до виникнення значної силової взаємодії між

індуктором і оброблюваною смугою. Незважаючи на різну величину густини струму на поверхні оброблюваної смуги (рис. 5), в обох випадках на рис. 6 спостерігаються однакової величини імпульсні сили взаємодії між індуктором і смугою, де кривою 1 позначена залежність сили взаємодії при відсутності феромагнітного екрану і кривою 2 – за його наявності. Сили взаємодії між індуктором і смугою (рис. 6) приймають максимальні значення після моменту макси-мальної густини струму (рис. 5) і ближче до моменту з максимальним струмом в обмотці (рис. 4), що також спостерігається в індукторах з П-подібними магнітопроводами [3].

В процесах електропластичної обробки спостерігається одночасний вплив на смугу і струмом, і магнітними силами. Але імпульси струму мають тривалість $10^{-4} - 10^{-3}$ с, що на кілька порядків менше термінів стимульованих ними [1] стрибків деформації в кристалах. Тому, вірогідно, вказаний вплив є лише поштовхом в електронній і фононній підсистемах кристалів, які викликають в подальшому подолання окремими дислокаціями їхнього розмноження і взаємодію, і таким чином інтенсифікують пластичну деформацію металів. Разом з тим за максимальної густини струму на поверхні смуги величина імпульсної електродинамічної сили складає, як це видно з рис. 6, 2/3 своєї максимальної величини.

Також слід зазначити, що на витки індуктора діють радіальні магнітні сили (29000 Н), які майже однакові за величиною з аксіальними (рис. 6). А тому це потребує заходів по зміцненню обмотки індуктора. Амплітуда імпульсу струму для обох конструктивних виконань індукційної системи (з феромагнітним екраном та без нього), а тому і рівень індукованої в смугі густини струму регулюється величиною початкової напруги конденсатора $U(t=0)$, а тривалість імпульсу – ємністю конденсатора C .

Таким чином, розроблений метод визначення характеристик індукційної системи полягає у наступному: на першому етапі методом скінченних елементів визначаються електричні параметри індукційної системи r, L, C за формулами (2), (3) і (9) під час живлення обмотки синусоїдним струмом з частотою $f = 1/2T_1$, що відповідає заданій тривалості T_1 однополярного імпульсу; на другому етапі з використанням знайдених параметрів r, L, C вирішується рівняння (6), на основі якого за заданих початкових умов визначається зміна напруги на індуктивності, струм в індукторі, напруга на конденсаторі, кутова частота власних коливань відповідно до (7), коефіцієнт загасання, тривалість імпульсу та за виразом (12) закон зміни густини струму в провідниках обмотки індуктора; на третьому етапі з використанням величин густини струму в провідниках обмотки індуктора (12) методом скінченних елементів визначаються розподіл змінного в часі магнітного поля, електромагнітних сил в індукційній системі і густину струмів в електропровідній смугі.

З використанням методу нема необхідності одночасно на кожному часовому кроці розв'язувати паралельно електромагнітну і колову задачі, що дає змогу зменшити вимоги до програмного засобу для розрахунку електромагнітних полів, наприклад, методом скінченних елементів. Відрізняється метод від відомого [4] тим, що тут використовуються лінійні параметри феромагнітних матеріалів індукційної системи.

Висновки. Розроблено спрощений метод визначення характеристик індукційної системи зі спіралеподібним індуктором, в якому враховується вплив феромагнітного екрану. Визначена залежність величини напруги на ємнісному накопичувачі з величиною густини струмів в немагнітній пластині обмеженої товщини. Встановлено, що застосування феромагнітного екрану дає змогу зменшити струм в індукторі, але досягти однакових величин електромагнітної сили у випадку обробки з феромагнітним екраном та без нього. Таким чином, досягнення параметрів настання електропластичного ефекту під час обробці електропровідних пластин, товщина яких менше глибини проникнення струму, відбувається із застосуванням феромагнітного екрану за величин струму в індукторі, який не перевищує максимального допустимого струму для напівпровідникового приладу, що здійснює комутацію розрядного кола.

Розроблений наближений метод планується використовувати для вибору режимів роботи імпульсного джерела живлення під час експериментальних досліджень магніто-імпульсного способу обробки зварного шву тонколистових конструкцій.

Електричні параметри індукційної системи не залежать від товщини смуги, якщо вона перевищує глибину проникнення електромагнітного поля в смугу. При цьому наявність феромагнітного екрану не значно (менше 1%) впливає на величину електричних параметрів індуктора, як це впливає з представлених даних у таблицях. Якщо товщина немагнітної смуги з

матеріалу АМг6 менша, ніж глибина проникнення електромагнітного поля, то опір за наявності феромагнітного екрану збільшується на 34% (частота 0,5 кГц) і на 5,7% (1 кГц), а індуктивність зменшується відповідно на 3,6% і 1%.

Взаємодія індуктора зі смугою зростає у разі зменшенні її товщини і електропровідності. При використанні феромагнітного екрану на поверхні такої смуги спостерігається зниження густини збуджуваних струмів на 30,5%, що обумовлене більш глибоким проникненням електромагнітного поля в смугу і зростанням опору.

Для обох виконань індукційної системи і всього діапазону товщини смуги максимум індуктованих струмів на її поверхні збуджується на першій чверті тривалості імпульсу струму в індукторі, а не при його максимумі. Сили взаємодії між індуктором і смугою приймають максимальні значення після моменту максимальної густини струму в смугі і ближче до моменту з максимальним струмом в обмотці.

Роботу виконано за бюджетною програмою «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електромагнітної обробки електропровідних середовищ» («БАР'ЄР-2», державний реєстраційний номер 0117U007714), КПКВК 6541030.

1. Васильев М.А. Особенности пластической деформации металлов и сплавов в магнитном поле. Обзор. *Успехи физики металлов*. 2007. Т. 8. С. 65–105. DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.08.01.065>
2. Лобанов Л.М., Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Карлов О.М., Пашин М.О., Васюк В.В., Ящук В.А. Нестационарные электрофизические процессы в системах снижения залишкових напряжений сварных соединений. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 10–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.010>
3. Ращепкин А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Кришук Р.С. Магнитные силы и токи индуктора для магнитно-импульсной обработки сварных соединений немагнитных тонколистовых металлов. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 74–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.074>
4. Ращепкин А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Кришук Р.С. Электромагнитное поле индуктора с Ш-подобным осердьям для магнитно-импульсной обработки материалов. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>
5. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mykhodui O.L., Sydorenko Yu.M. Effect of the Indenting Electrode Impact on the Stress-Strain State of an AMg6 Alloy on Electrodynamical Treatment. *Strength of Materials*. 2017. Vol. 49. Issue 3. Pp. 369–380. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9877-1>
6. Stepanov G., Babutski A., Mameev I., Pashchin N., Savitskii V., Tkachuk G. Redistribution of residual welding stresses in pulsed electromagnetic treatment. *Strength of Materials*. 2011. Vol. 43(3). Pp. 326–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9300-2>
7. Vasetsky Yu.M. Exact analytical and approximate asymptotic calculation methods to determine three-dimensional electromagnetic field near conducting body with flat surface. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 4. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.003>
8. Kryshchuk R.S. Influence of winding ends on the parameters of pulse inductor with U-shaped core. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 6. С. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.069>
9. Coles L.A., Roy A., Silberschmidt V.V., Novac B.M., Alotaibi T., Senior P., Smith I.R. Analysis of pulsed electroplasticity in metals. IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC). Brighton, UK, June 18-22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/PPC.2017.8291317>
10. Andre D., Bulet T., Körkemeyer F., Gerstein G., Gibson J.S.K.-L., Sandlöbes-Hauta S., Korte-Kerzel S. Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation *Materials & Design*. 2019. Vol. 183. 108153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>
11. Troitsky O.A., Stashenko V.I. Advantages of drawing and rolling metals with pulse current *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 012084 DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012084>
12. Городжа К.А., Подольцев О.Д., Трошинський Б.А. Электромагнитные процессы в импульсном электродинамическом випромінювачі для збудження пружних коливаний у бетонних конструкціях. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 3. С. 23-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.023>
13. Постников И.М. Проектирование электрических машин. К.: ГТИ, 1962. 736 с.
14. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. Ч. 2. М.-Л.: ГЭИ, 1959. 444 с.

A METHOD FOR CALCULATING ELECTROMAGNETIC FIELD OF A SPIRAL TYPE INDUCTION SYSTEM FOR MAGNETOPULSE PROCESSING OF NON-MAGNETIC METAL STRIPS WITH A FERROMAGNETIC SHIELD

A.P. Raschepkin, I.P. Kondratenko, O.M. Karlov, R.S. Kryshchuk

The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy av., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: dep7ied@ukr.net

A new method for calculating pulse current in a spiral winding of an induction system with a ferromagnetic shield is proposed for processing of nonmagnetic thin-sheet metal strips and for creating magnetoplastic and electroplastic effects by eddy currents in strips. The ferromagnetic shield is placed under the strip, and above it there is the spiral winding. The aim is developing the method for calculating pulse current of the induction system in discharge processes of a capacitor charged to certain voltage, taking into account influence of the ferromagnetic shield on distribution of time-varying magnetic field, electromagnetic forces of the induction system and density of currents in the strip. Electromagnetic parameters of the induction system are determined by computer simulation using the finite element method in the mode of harmonic currents. Current transients in an electric circuit are calculated by the new method using known mathematical dependences in the theoretical electrical engineering, and the distribution of current density and magnetic forces in the strip are calculated by the finite element method in the mode of transients. Influence of the ferromagnetic shield on electromagnetic processes in the induction system is established. Electromagnetic force between the spiral winding and the strip, current density in the strip, and moments of time at which the current and the force have maximum values are studied. References 14, figures 6, tables 2.

Key words: electroplastic processing, electromagnetic parameters, ferromagnetic shield, unipolar current pulse, transients.

1. Vasiliev M.A. Features of plastic deformation of metals and alloys in a magnetic field. Overview. *Advances in the physics of metals*. 2007. Vol. 8. Pp. 65–105. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/ufm.08.01.065>
2. Lobanov L.M., Kondratenko I.P., Zhltsov 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 Elektrodyamika*. 2016. No 6. Pp. 10–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.010> (Ukr)
3. Raschepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov A.N., Kryshchuk R.S. Magnetic forces and currents of the inductor for magnetic-pulse processing of welding joints of non-magnetic thin sheet metals. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2020. No 5. Pp.74–79. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.074> (Ukr)
4. Rashchepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov A.N., Kryshchuk R.S. Electromagnetic field of w-shaped inductor for magnetic-pulse processing of materials. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2019. No 6. Pp. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005> (Ukr)
5. Lobanov L.M., Pashchyn M.O., Mykhodui O.L., Sydorenko Yu.M. Effect of the Indenting Electrode Impact on the Stress-Strain State of an AMg6 Alloy on Electrodynamic Treatment. *Strength of Materials*. 2017. Vol. 49. Issue 3. Pp. 369–380. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9877-1>
6. Stepanov G., Babutski A., Mameev I., Pashchin N., Savitskii V., Tkachuk G. Redistribution of residual welding stresses in pulsed electromagnetic treatment. *Strength of Materials*. 2011. Vol. 43(3). Pp. 326–331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9300-2>
7. Vasetsky Yu.M. Exact analytical and approximate asymptotic calculation methods to determine three-dimensional electromagnetic field near conducting body with flat surface. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2021. No 4. Pp. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.04.003>
8. Kryshchuk R.S. Influence of winding ends on the parameters of pulse inductor with U-shaped core. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2020. No 6. Pp. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.06.069>
9. Coles L.A., Roy A., Silberschmidt V.V., Novac B.M., Alotaibi T., Senior P., Smith I.R. Analysis of pulsed electroplasticity in metals. IEEE 21st International Conference on *Pulsed Power* (PPC). Brighton, UK, June 18-22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/PPC.2017.8291317>
10. Andre D., Bulet T., Körkemeyer F., Gerstein G., Gibson J.S.K.-L., Sandlöbes-Hauta S., Korte-Kerzel S. Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation *Materials & Design*. 2019. Vol. 183. 108153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108153>
11. Troitsky O.A., Stashenko V.I. Advantages of drawing and rolling metals with pulse current *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 012084 DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012084>
12. Gorodzha K.A., Podoltsev A.D., Troshchynckiy B.O. Electromagnetic processes in pulsed electrodynamic emitter to excite elastic vibrations in concrete structures. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2019. No 3. Pp. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.03.023> (Ukr)
13. Postnikov I.M. Designing of electrical machines. Kiev: HTI, 1962. 736 p. (Rus)
14. Neiman L.R., Kalantarov P.L. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Part 2. Moskva-Leninhrad: SEI, 1959. 444p. (Rus)

Надійшла 18.10.2021

Остаточний варіант 26.01.2022