

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ІНДУКТОРІВ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ НА МЕТАЛЕВІ ВИРОБИ

Ю.М. Васецький*, докт. техн. наук, І.П. Кондратенко**, чл.-кор. НАН України
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com

Розроблено математичну модель по визначенню густини імпульсного індукваного струму в електропровідному листі і параметрів струму контура індуктора для безконтактної електроімпульсної обробки матеріалів. На основі розрахункових даних показано перспективність використання індукторів у вигляді контурів зі струмом задля впливу на зварний шов внаслідок прояву ефекту «електропластичності» в локальній області. Бібл. 7, рис. 5.

Ключові слова: тривимірне електромагнітне поле, імпульсний струм, сильний скін-ефект, зварний шов.

Вступ. Проведені останнім часом наукові та експериментальні дослідження показали, що обробка металевих матеріалів, зокрема зварних швів, імпульсним електричним струмом (ІЕС) та імпульсним електромагнітним полем (ІЕМП) позитивно впливає на зниження напружено-деформованих станів металевих конструкцій [1]. Обробка металевих виробів ІЕМП, що створює в металі магнітний тиск, який наближається до межі плинності матеріалу, сприяє зниженню рівнів напружених станів та підвищує пластичність металу [2]. Разом з тим засобом впливу на механічні властивості матеріалу зварного шва є ефект «електропластичності», який має місце за умови, що густина струму в металі є не меншою певного значення, яке, наприклад, для алюмінієвих сплавів досягає 10^9 А/м². Збудження вихрового струму в алюмінієвих сплавах задля досягнення умов прояву ефекту «електропластичності» потребують значно менших амплітудних значень струму індуктора, ніж задля досягнення магнітного тиску близького до межі плинності. Це свідчить про доцільність про-ведення досліджень в напрямку використання для обробки зварних швів ефекту «електропластичності» та розробки відповідних інструментів задля забезпечення необхідних значень густини струмів в металі.

Одним з перспективних способів забезпечення протікання в металі струму значної густини є безконтактний індукційний спосіб введення енергії в метал. При цьому напруженість індукваного електричного поля і, відповідно, густини струмів пропорційні швидкості зміни поля у часі [3]. Це обумовлює застосування швидкоплинного імпульсного електромагнітного поля, для якого має місце сильний скін-ефект, коли поле і струм існують в тонкому поверхневому шарі металевого листа [4].

Досягти введення імпульсного струму в металевий лист можна кількома шляхами. В [5] досліджено можливість застосування індуктора з Ш-подібним феромагнітним осердям та багатовитковою обмоткою. Така система дає змогу зменшити необхідну амплітуду струму джерела живлення. Разом з цим використання обмотки з декількома витками та відносно велика робоча площа індуктора значно збільшують індуктивність системи, що є несприятливим фактором для імпульсного пристрою. Найпростішим конструктивним виконанням індуктора є одновитковий струмовий контур. Така конфігурація дозволяє забезпечити локальний вплив імпульсного поля на ділянці невеликої площині, зменшити індуктивність системи і, тим самим, забезпечити менш жорсткі вимоги до джерела імпульсного струму.

Метою роботи є дослідження розподілу густини імпульсного індукваного струму в електропровідному листі та визначення необхідних параметрів імпульсу струму контуру індуктора задля реалізації в металі «електропластичного» ефекту.

Математична модель. В [6] отримано аналітичний розв'язок загальної задачі визначення електромагнітного поля, що формується в системі, яка містить довільний контур зі струмом і пласке електропровідне тіло. Наведено вирази для комплексних амплітуд напруженостей електричного і магнітного полів в двох областях: діелектричній \vec{E}_e і \vec{H}_e , де розташований контур l зі струмом \dot{I}_0 , та в електропровідній \vec{E}_i і \vec{H}_i з питомою електропровідністю γ і відносною магнітною проникністю

μ . В електропровідній області протікає індукований струм з густиною $\mathbf{j}_i = \gamma \dot{\mathbf{E}}_i$. Розв'язок для комплексних амплітуд дає частотний спектр напруженостей полів у разі заданого частотного спектра $\dot{I}_0(i\omega)$ імпульсного струму $I_0(t)$.

Перехід від виразів для частотного спектру до залежностей полів від часу здійснюється за допомогою оберненого перетворення Фур'є. В результаті вирази для напруженості електричного поля набувають вигляду

$$\mathbf{E}_e(t) = -\frac{\mu_0}{4\pi l} \oint \left[\left(\frac{\mathbf{t}}{r} - \frac{\mathbf{t}_1}{r_1} \right) \frac{\partial I_0(t)}{\partial t} - \mathbf{e}_z \times [\mathbf{t}_1 \times \nabla V_e(t)] \right] dl, \quad \mathbf{E}_i(t) = -\frac{\mu_0}{4\pi l} \oint \left[(\mathbf{t} - \mathbf{e}_z (\mathbf{t} \cdot \mathbf{e}_z)) V_{i0}(t) + (\mathbf{t} \cdot \mathbf{e}_z) \mathbf{e}_\rho V_{i1}(t) \right] dl. \quad (1)$$

Тут застосовано локальну циліндричну систему координат: вісь z спрямована в напрямку одиничного вектору \mathbf{e}_z , перпендикулярного до поверхні поділу середовищ, і проходить через точку витоку на контурі l ; радіальна координата ρ відраховується від вертикальної вісі в напрямку одиничного вектору \mathbf{e}_ρ ; r і r_1 – відстані між точкою спостереження та точкою витоку M на вихідному контурі і точкою M_1 на дзеркально відбитому від поверхні контурі; \mathbf{t} і \mathbf{t}_1 – відповідні одиничні дотичні вектори до контурів. Функції $V_e(t)$, $V_{i0}(t)$ і $V_{i1}(t)$ є результатом застосування оберненого перетворення Фур'є і визначаються наступним чином:

$$V_e(t) = \frac{4}{\pi_0} \int_0^\infty \cos \omega t \operatorname{Re} \left[i\omega \dot{I}_0 \int_0^\infty \frac{e^{-(z-z_{M1})\vartheta} J_0(\vartheta \rho)}{w(\vartheta)} d\vartheta \right] d\omega, \quad V_{i0,1}(t) = \frac{4}{\pi_0} \int_0^\infty \cos \omega t \operatorname{Re} \left[i\omega \dot{I}_0 \int_0^\infty \frac{e^{q_i z - \vartheta z_M} J_{0,1}(\vartheta \rho)}{w(\vartheta)} \vartheta d\vartheta \right] d\omega, \quad (2)$$

де $q_i = \sqrt{\vartheta^2 + i\omega \mu_0 \mu \gamma}$; $w(\vartheta) = \vartheta + q_i/\mu$; $J_k(\cdot)$ – функція Бесселя першого роду порядку k .

Наведені формули є аналітичним розв'язком у вигляді інтегральних співвідношень для розрахунку напруженості електричного поля. Разом з тим розв'язок у вигляді потрійного невластного інтеграла передбачає досить велику кількість обчислень. Спрощення може бути реалізовано з використанням асимптотичного розкладання виразів по параметру $\varepsilon_1 = \mu \delta / (\sqrt{2} r_1) = \mu / (r_1 \sqrt{\omega \mu_0 \mu \gamma})$, якій є малим у випадку сильного скін-ефекту, що має місце для імпульсного поля у разі застосування безконтактного електроімпульсного методу впливу на електропровідне середовище.

В результаті напруженість електричного поля в діелектричному середовищі набуває вигляду обмеженого асимптотичного ряду, у кожному члені якого залежності за часом і координатах розраховуються окремо за виразами, обчислення яких добре розроблено і не викликає труднощів

$$V_e(t) = \sum_{n=0}^N V_{en}(t) = \sum_{n=0}^N \frac{g_n(\mu, \gamma, r_1)}{2\Gamma((n+1)/2)} \int_0^t \left. \frac{dI_0(\zeta)}{d\zeta} \right|_{\zeta=t-\tau} \tau^{(n-1)/2} d\tau, \quad (3)$$

де $g_n(\mu, \gamma, r_1) = (-1)^n 2a_n(\mu) \left(\frac{\mu}{\sqrt{\mu_0 \mu \gamma}} \right)^{n+1} \frac{\partial^{(n)}}{\partial z^n} \left(\frac{1}{r_1} \right)$, $a_n(\mu)$ – коефіцієнти розкладання в ряд функції $1/w(\vartheta)$.

Результати розрахунків. Для конкретних розрахунків обрано систему (рис. 1), для якої максимум густини індукованого струму локалізується поблизу точки, найбільш наближеної до поверхні металевго листа. Розрахунки поля проведено із застосуванням точного і наближеного методів розрахунку тривимірного електромагнітного поля для імпульсу струму кругового контуру радіуса R , що розташований в площині, перпендикулярній до межі поділу середовищ. Геометричні розміри нормовано на відстань від центру кругового контуру до площини $H = R + h_0$, де h_0 – найменша відстань від контуру до площини.

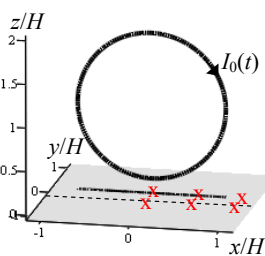


Рис. 1

Залежність струму від часу визначається таким виразом

$$I(t) = I_m [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)]. \quad (4)$$

Вибір цієї залежності обумовлено формою імпульсу струму реальних джерел, які використовуються в пристроях електродинамічної обробки зварних швів. У них фронт імпульсу, який визначає максимальні значення густини індукованого струму, досить добре описується виразом (4) при $\alpha_2 = 2\alpha_1$. В цьому випадку максимальна величина струму є $I_{\max} = I_m/4$. Конкретні значення α_1 і α_2 оцінимо із умови затухання індукованого струму в електропровідному

листі товщиною D . Визначимо тривалість фронту імпульсу як досягнення максимального значення $\tau_\phi = t_{\max} = \ln(\alpha_2/\alpha_1)/(\alpha_2 - \alpha_1)$. Тоді із оцінки характерної частоти $f_\phi = 1/\tau_\phi$ умову затухання поля у цьому листі D можна представити як $D = k_d \delta = k_d \sqrt{\tau_\phi / (\pi \mu_0 \gamma)}$, де достатньо вибрати $k_d = 3$. За $D = 3 \cdot 10^{-3}$ м і $\alpha_2/\alpha_1 = 2$ для алюмінієвого листа ($\gamma = 3,7 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$) отримуємо оцінку необхідної тривалості фронту $\tau_\phi = D^2 \pi \mu_0 \gamma / k_d^2 \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ с і коефіцієнти затухання $\alpha_1 = \alpha_2/2 = \ln 2 / \tau_\phi \approx 1/\tau_\phi = 6,67 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Задля отримання конкретних результатів затухання поля розраховано залежності густини струму на різній глибині безпосередньо під круговим контуром зі струмом радіусом $R = 5 \cdot 10^{-2}$ м і

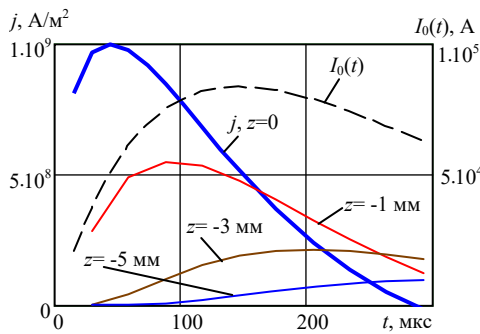


Рис. 2

відстані $h_0 = 10^{-2}$ м (рис. 2). Амплітуда імпульсу струму контуру обрана такої величини, щоб густина струму на поверхні листа складала 10^9 А/м^2 , тобто значення, за яким має місце ефект «електропластичності». Представлені дані свідчать, що за обраних значень постійних затухання для листів з товщиною $D \geq 3 - 5$ мм достатньо застосовувати модель електропровідного півпростору.

Тривимірне електромагнітне поле для індуктора у вигляді кругового струмового контуру є неоднорідним полем, яке зменшується по всім напрямкам вздовж площині листа відносно точки, найближчої до контуру. Така особливість ілюструється розрахунками залежності густини струму від часу в точках на поверхні алюмінієвого листа, положення яких на рис. 1 показано хрестиками. З точки зору використання ефекту «електропластичності» результати щодо розподілу поля можуть виявитися корисними задля визначення меж області, в якій відбуваються ці зміни, а також дослідження впливу на розміри області з меншою густиною струмів. Відповідні залежності наведено на рис. 3 за $y=0$ і на рис. 4 – $y=0,6$ см. В останньому випадку вектор густини струму має компоненту, перпендикулярну до площини контуру, і тому показано залежність модуля вектора.

За обраними геометрією системи і параметрами імпульсу амплітуда струму контура має досить високе значення $I_{\max} = 83,8 \cdot 10^3 \text{ А}$. Зменшити її можна зменшивши відстань h_0 . На рис. 5 наведено залежності за зменшеній вдвічі відстані до поверхні $h_0 = 0,5 \cdot 10^{-2}$ м.

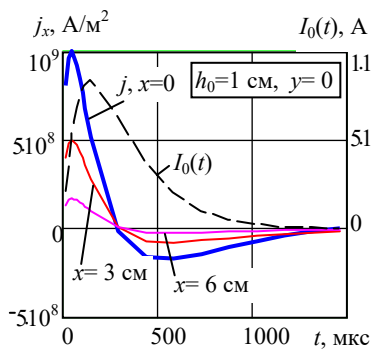


Рис. 3

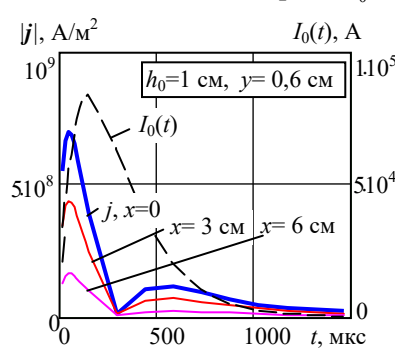


Рис. 4

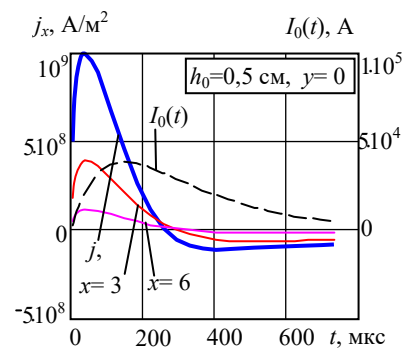


Рис. 5

Видно, що в цьому випадку більш ніж удвічі зменшується необхідна амплітуда імпульсу струму контуру, яка тепер становить $I_{\max} = 38,7 \cdot 10^3 \text{ А}$. Разом з цим зменшується і розмір області з підвищеною густиною струму. Крім того, зменшення відстані h_0 обмежено розмірами перерізу провідника, які залежать не тільки від величини струму, а й інших факторів, наприклад, частоти імпульсів. Зазначимо, що необхідна для прояву ефекту «електропластичності» величина густини струму в металі може бути досягнута не тільки за рахунок амплітудного значення імпульсу струму джерела, а й швидкості його зростання на фронті імпульсу [7].

Таким чином, із наведених результатів можна зробити **висновок**, що індукційний метод введення імпульсного струму в метал з використанням індукторів у вигляді контурів зі струмом може розглядатися як перспективний спосіб впливу на зварний шов в локальній області завдяки ефекту

«электропластичности». Розробка методу пов'язана із забезпеченням необхідних параметрів імпульсу струму джерела з врахуванням конфігурації контуру індуктора і його взаємодії з електропровідним середовищем. В цьому випадку задача має комплексний характер з її формулюванням як задачі оптимізації електромагнітної системи.

Роботу виконано за цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2) (КПКВК 6541030).

1. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И. Влияние импульсного электрического тока высокой плотности на прочность металлических материалов и напряженно-деформированное состояние элементов конструкций. К.: Наукова думка, 2014. 276 с.
2. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П., Покляцкий А.Т. Влияние электроимпульсной обработки на остаточное формирование тонколистовой сварочной конструкции. Автоматическая сварка. 2010. № 3. С. 13-17.
3. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. М.: Энергия, 1969. 352 с.
4. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. Х.: Вища школа, 1979. 139 с.
5. Ращепкін А.П., Кондратенко І.П., Карлов О.М., Кришук Р.С. Электромагнітне поле індуктора з Ш-подібним осердям для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 5-12.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>
6. Vasetsky Yu.M, Dziuba K.K. Three-Dimensional Quasi-Stationary Electromagnetic Field Generated by Arbitrary Current Contour Near Conducting Body. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 3-12.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.003>
7. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392 с.

УДК 620.179:621.373.5 УДК 621.3.011

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ИНДУКТОРА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ

Ю.М. Васецкий, докт. техн. наук, **И.П. Кондратенко**, чл.-кор. НАН Украины

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Перемоги, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com

Разработана математическая модель по определению плотности импульсного индуцированного тока в электропроводном листе и параметров тока контура индуктора для бесконтактной электроимпульсной обработки материалов. На основе расчетных данных показана перспективность использования индукторов в виде контуров с током для воздействия на сварной шов вследствие проявления эффекта «электропластичности» в локальной области. Библ. 7, рис. 5.

Ключевые слова: трехмерное электромагнитное поле, импульсный электрический ток, сильный скин-эффект, сварной шов.

ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE INDUCTOR FOR LOCAL ELECTRIC PULSE EFFECTS ON METAL PRODUCTS

Yu.M. Vasetsky, I.P. Kondratenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremohy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com

The mathematical model has been developed to determine of the induced pulsed density current in the conductive sheet and the current parameters of the inductor contour for non-contact electric pulse processing of materials. Based on the calculated data, the prospects of using inductors in the form of current contours for influencing the weld due to the "electroplasticity" effect in the local area are shown. References 7, figures 5.

Keywords: three-dimensional electromagnetic field, pulsed electric current, strong skin effect, weld.

1. Stepanov G.V., Babutskiy A.I. Effect of high-density pulsed electric current on strength of metallic materials and stress-strain state of structural components. Kyiv: Naukova dumka, 2010. 276 p. (Rus)
2. Lobanov L.M., Paschin N.A., Loginov V.P., Poklyatskiy A.T. Impact of electric pulse processing on the residual formation of a thin-sheet welding structure. *Avtomaticheskaya svarka*. 2010. No 3. Pp. 13-17. (Rus)
3. Polivanov K.M. Theoretical bases of electrical engineers. Moskva: Energiya, 1969. 352 p. (Rus)
4. Mikhaylov V.M. Pulsed electromagnetic fields. Kharkov: Vischa shkola, 1979. 139 p. (Rus)
5. Rashchepkin A.P., Kondratenko I.P., Karlov O.M., Kryshchuk R.S. Electromagnetic field of w-shaped inductor for magnetic-pulse processing of materials. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 5-12. (Ukr)
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>
6. Vasetsky Yu.M, Dziuba K.K. Three-Dimensional Quasi-Stationary Electromagnetic Field Generated by Arbitrary Current Contour Near Conducting Body. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 1. Pp. 3-12.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.01.003>
7. Knopfel G. Pulsed High Magnetic Fields. Moskva: Mir, 1972. 392 p. (Rus)

Надійшла 28.02.2020

Остаточний варіант 07.04.2020