

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.11.048>

УДК 621.791.75

**І.В. Кривцун¹, В.Ф. Демченко¹,
Д.А. Номіровський²**

¹ Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

² Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ

E-mail: krivtsun@paton.kiev.ua, dvf39@ukr.net, nomirovskii@univ.kiev.ua

До теорії оптимальних за силовою дією імпульсів зварювального струму

Представлено академіком НАН України І.В. Кривцуном

Розглянуто задачу вибору оптимальної форми імпульсів струму, які забезпечують максимальну силову дію електромагнітного поля дуги на метал зварювальної ванни при зварюванні неплавким електродом з високо-частотною імпульсною модуляцією струму. Наведено необхідну і достатню умову досягнення оптимальної форми імпульсів струму. Однією з можливих оптимальних форм імпульсної модуляції струму є меандр. В електричних колах з дугою формування прямокутних імпульсів струму неможливо, тому в якості наближення було розглянуто імпульси трапецеїдальної форми. Для таких імпульсів з фіксованою тривалістю переднього і заднього фронтів наведені результати параметричної оптимізації часових параметрів імпульсної модуляції струму.

Ключові слова: зварювання неплавким електродом, імпульсна модуляція струму, форма імпульсів, діюче значення струму, зварювальна ванна, електромагнітна сила.

В умовах дугового зварювання неплавким електродом з імпульсною модуляцією струму силова дія електромагнітного поля на дугову плазму і метал зварювальної ванни визначається амплітудними значеннями і формою імпульсів струму. При оптимальних за формою імпульсах струму інтенсифікуються гідродинамічні процеси в зварювальній ванні, зростає конвективне перенесення теплової енергії з поверхні зварювальної ванни до фронту плавлення і за рахунок цього підвищується проплавляюча здатність зварювальної дуги. Проблема вибору форми оптимальних за силовою дією імпульсів модульованого струму є предметом досліджень цієї статті.

З достатньо хорошим наближенням можна вважати, що в дуговій плазмі та в приповерхневій зоні зварювальної ванни електромагнітне поле є осесиметричним. У цьому ви-

падку, згідно з теоремою розкладання Гельмгольца, пондеромоторна сила \vec{F} , яка виникає в результаті взаємодії струму дуги з власним магнітним полем, може бути представлена [1] у вигляді суми потенційної та вихрової складових:

$$\vec{F} = -\mu_0\mu \left(\frac{1}{2} \text{grad } H_\theta^2 + \frac{H_\theta^2}{r} \vec{e}_r \right) \quad (1)$$

де μ_0 – універсальна магнітна стала; μ – магнітна проникність середовища; r, θ, z – змінні циліндричної системи координат; $H_\theta(r, z)$ – азимутальна компонента напруженості магнітного поля; \vec{e}_r – одиничний вектор у напрямку радіальної координати. При зварюванні неплавким електродом траєкторії руху матеріальних частинок у зварювальній ванні є замкнутими. У такому разі дія потенційної складової електромагнітної сили обмежується

створенням у розплаві магнітостатичного тиску $P_{st} = -\frac{1}{2}\mu_0\mu H_\theta^2$, який не заважає руху металу під дією сили іншої природи, а рушійним силовим фактором, який збуджує течію розплаву, є доцентрова вихрова сила $\vec{F}_{rot} = -\mu_0\mu \frac{H_\theta^2}{r} \vec{e}_r$. З теореми про повний струм маємо

$H_\theta(r, z) = \frac{I(r, z)}{2\pi r}$, де $I(r, z) = 2\pi \int_0^r j_z(r', z) r' dr'$ – електричний струм, що протікає в крузі радіуса r , розташованому у довільному аксіальному перетині z . Тоді вихрова складова сили Лоренця може бути записана у вигляді $\vec{F}_{rot}(r, z) = -\mu_0\mu \frac{I^2(r, z)}{4\pi^2 r^3} \vec{e}_r$. Під дією цієї сили в металі утворюється магнітний тиск $P_{mag}(r, z)$, який, виходячи із рівнянь магнітної гідростатики, визначається наступним чином: $P_{mag}(r, z) = \int_r^\infty F_{rot}(r', z) dr'$. Градієнт магнітного тиску створює силу \vec{F}_{mag} , яка збуджує рух розплаву переважно в аксіальному напрямку із швидкостями десятки сантиметрів в секунду. Змінюючи належним чином напрямки і інтенсивності конвективних потоків розплаву, можна управляти проплавляючою здатністю дуги, продуктивністю та якістю процесу зварювання.

Якщо частота імпульсної модуляції зварювального струму достатньо висока (знаходиться в кілогерцевому діапазоні), то процеси переносу імпульсу і енергії в металі зварювальної ванни через їх інерційність залежать не від поточного значення струму, а від ефективних (діючих) значень характеристик електромагнітного поля [2]. Такими є: ефективна вихрова складова електромагнітної сили $\langle \vec{F}_{rot}(r, z) \rangle$ та ефективний магнітний тиск $\langle P_{mag}(r, z) \rangle$, де під $\langle f \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$ розуміється усереднене значення функції $f(t)$ на од-

ному періоді T модуляції струму.

Нехай $I(t)$ – модульований струм, що періодично змінюється у часі з періодом T . Зі збільшенням ефективного значення струму $I_{eff} = \sqrt{\langle I^2 \rangle}$ зростає величина $\langle I^2(r, z) \rangle$, відповідно, збільшується $\langle \vec{F}_{rot}(r, z) \rangle$. У зв'язку з цим постає задача вибору такої форми імпульсу, яка б забезпечувала максимум I_{eff} при заданих амплітудних значеннях модульованого струму. Будемо вважати струм однополярним $I(t) \geq 0$ і таким, що $I_1 \leq I(t) \leq I_2$,

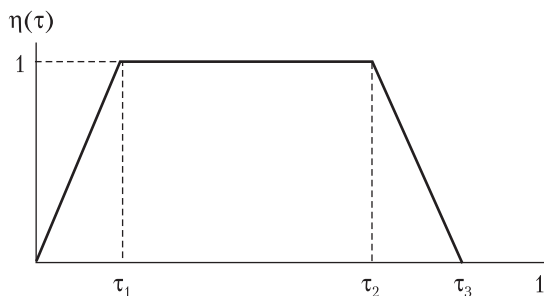


Рис. 1. Імпульс трапецеїдальної форми

$t \in [0; T]$. Для довільної форми імпульсів струму можна записати:

$$I(\tau) = I_1 + A\eta(\tau),$$

де $\tau = \frac{t}{T}$ – безрозмірний час; $A = I_2 - I_1$ – амплітуда модуляції струму; $\eta(\tau)$ – функція, яка визначає нормовану форму імпульсу струму ($0 \leq \eta(\tau) \leq 1$, $\tau \in [0; 1]$). Вирази для квадратів діючого $I_{eff} = \sqrt{\langle I^2 \rangle}$ і середнього $I_{av} = \langle I \rangle$

значень імпульсного струму запишемо у вигляді:

$$I_{eff}^2 = I_1^2 + 2AI_1\langle \eta \rangle + A^2\langle \eta^2 \rangle, \quad I_{av} = I_1 + A\langle \eta \rangle.$$

Звідси випливає наступна рівність:

$$I_{eff}^2 - I_{av}^2 = A^2(\langle \eta^2 \rangle - \langle \eta \rangle^2). \quad (2)$$

Силову дію модульованого струму на метал зварювальної ванни будемо порівнювати із силовою дією постійного струму за величиною рівного I_{av} . Форму імпульсів будемо вважати оптимальною, якщо при заданих I_1, I_2 досягається максимальна різниця між квадратами діючого і середнього значень струму. Тоді, відповідно до (2), оптимальною за даним критерієм формою імпульсу є така функція $\eta(\tau)$, яка доставляє максимум функціоналу

$$\Phi[\eta(\tau)] = \int_0^1 \eta(\tau) dt - \left(\int_0^1 \eta(\tau) dt \right)^2.$$

Справедлива наступна

Теорема. Нехай $\eta(\tau)$ – вимірна по Лебегу на відрізку $[0; 1]$ функція, така що майже для всіх $\tau \in [0; 1]$ виконуються нерівності $0 \leq \eta(\tau) \leq 1$. Тоді $\Phi[\eta(\tau)] \leq 0,25$ і рівність досягається тоді і тільки тоді, коли існує вимірна множина $B \subset [0; 1]$, $\mu(B) = 0,5$, де μ – міра Лебега на прямій, що майже для всіх $\tau \in [0; 1]$ виконується рівність

$$\eta(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau \in B, \\ 0, & \tau \notin B. \end{cases} \quad (3)$$

Доведення теореми опускаємо.

Згідно з теоремою задача про максимум функціоналу в класі вимірних за Лебегом функцій має неєдиний розв'язок і існує нескінченна кількість оптимальних функцій $\eta(\tau)$, таких що множини точок відрізка $[0; 1]$, для яких $\eta(\tau) = 0$ і $\eta(\tau) = 1$, мають однакову міру Лебега. З технічної точки зору найбільший інтерес представляють прямокутні імпульси у вигляді меандру

$$\eta_0(\tau) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \tau < 0,5, \\ 0, & 0,5 \leq \tau \leq 1, \end{cases} \quad \frac{I_{eff}^2 - I_{av}^2}{A^2} = 0,25. \quad (4)$$

Прямокутна форма імпульсів струму є певною ідеалізацією. На практиці неможливо забезпечити нескінченну швидкість зміни струму на передньому і задньому фронтах імпульсу. Максимальна швидкість зміни струму, яку можна досягти в реальних умовах, становить величину порядку 10^7 А/с, цьому відповідають тривалості фронтів імпульсів зварювального струму 10...20 мкс. В якості наближення до прямокутної форми імпульсу розглянемо трапецеїдальний імпульс струму, наведений на рис. 1.

У цьому випадку маємо $\langle \eta^2 \rangle = \frac{1}{3}(2\tau_{21} + \tau_3)$, $\langle \eta \rangle^2 = \frac{1}{4}(\tau_{21} + \tau_3)^2$, де $\tau_{21} = \tau_2 - \tau_1$. Функціоналу $\Phi[\eta(\tau)]$ відповідає функція $\Phi(\tau_{21}, \tau_3) = \frac{1}{3}(2\tau_{21} + \tau_3) - \frac{1}{4}(\tau_{21} + \tau_3)^2$. Будемо далі вважати, що тривалості переднього і заднього фронтів імпульсу збігаються і дорівнюють τ_f , тобто покладемо $\tau_f = \tau_1 = \tau_3 - \tau_2$.

При цьому безрозмірна форма імпульсу не залишається сталою при зміні періоду модуляції T , а значення функціоналу $\Phi[\eta(\tau)]$, визначеного на безлічі трапецеїдальних форм імпульсів струму, залежить від частоти модуляції $F = T^{-1}$.

У виразі $\Phi(\tau_{21}, \tau_3)$ для трапецеїдального імпульсу перейдемо до розмірних часових характеристик t_1, t_2, t_3 і частоти F . Маємо $\Phi(t_{21}, t_f, F) = \frac{F}{3}(3t_{21} + 2t_f) - F^2(t_{21} + t_f)^2$, де $t_{21} = t_2 - t_1$ – тривалість вершини імпульсу. При заданому $t_{21} = \text{const}$ існує максимум $\Phi_{\max}(t_{21}, t_f) = \frac{(3t_{21} + 2t_f)^2}{36(t_{21} + t_f)^2}$, який досягається при $F = \frac{3t_{21} + 2t_f}{6(t_{21} + t_f)^2}$. В окремому випадку $t_f = 0$ (імпульс

прямокутної форми) $\Phi_{\max}(t_{21}, t_f) = \frac{1}{4}$, $F = \frac{1}{2t_{21}}$, що відповідає наведеній вище теоремі. Аналогічно, при $t_{21} = 0$ і довільному t_f (імпульс трикутної форми) $\Phi_{\max}(t_{21}, t_f) = \frac{1}{9}$, $F = \frac{1}{3t_f}$,

тобто оптимальна тривалість імпульсу трикутної форми складає дві третини періоду модуляції. Зауважимо, що положення вершини трикутного імпульсу може бути задано довільно. При довільних t_{21}, t_f виконуються нерівності $\frac{1}{9} \leq \Phi_{\max}(t_{21}, t_f) < \frac{1}{4}$, тобто за силовою дією на метал зварювальної ванни трикутний імпульс майже в 2,5 рази поступається прямокутному.

Покладемо для визначеності $t_f = 15$ мкс. На рис. 2 наведені графіки залежності величини оптимального періоду модуляції струму і функції $\Phi(t_{21})$ від тривалості вершини трапецеїдального імпульсу в інтервалі $t_{21} \in [0; 100]$ мкс.

Як бачимо з рис. 2, а, оптимальний період модуляції струму практично лінійно залежить від величини t_{21} . Значення функції $\Phi(t_{21})$ зі збільшенням t_{21} асимптотично прямує до 0,25, що відповідає імпульсам в формі меандру, оскільки при $t_{21} \rightarrow \infty$ форма трапецеїдального імпульсу наближається до прямокутної. Ця ж тенденція зберігається і в залежностях $I_{av}(t_{21}), I_{eff}(t_{21})$, наведених на рис. 3.

Зберігаючи незмінною амплітуду A модуляції струму, можна шляхом вибору значення струму I_1 в паузі підвищувати середнє і ефективне значення модульованого струму (див. рис. 3) і збільшувати тим самим енергетичні характеристики дуги.

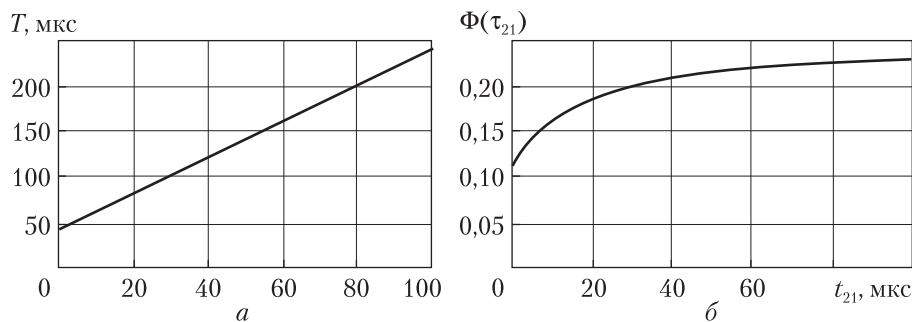


Рис. 2. Зміна оптимального періоду модуляції (а) і значень функції $\Phi(t_{21})$ (б) в залежності від тривалості вершини трапецеїдального імпульсу

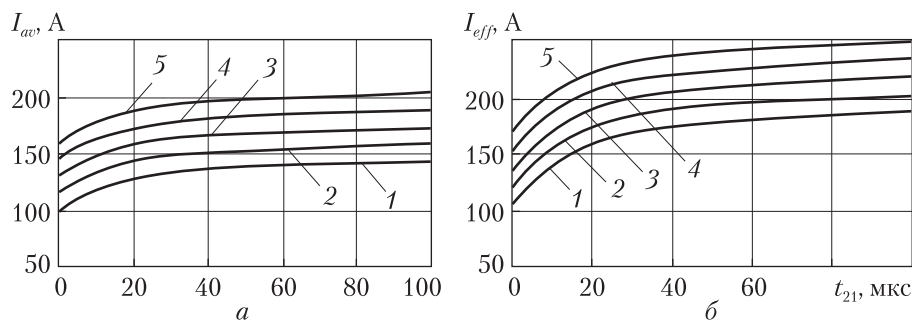


Рис. 3. Залежність середнього (а) і ефективного (б) значень модульованого струму від тривалості вершини імпульсу t_{21} при $A = 300$ А, $t_f = 15$ мкс: 1 – $I_1 = 0$; 2 – 15 А; 3 – 30 А; 4 – 45 А; 5 – 60 А

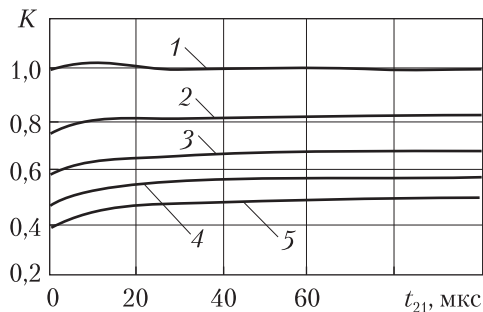


Рис. 4. Показник ефективності силового впливу модульованого струму в залежності від тривалості t_{21} вершини імпульсу при $A = 300$ А, $t_f = 15$ мкс: 1 – $I_1 = 0$; 2 – 15 А; 3 – 30 А; 4 – 45 А; 5 – 60 А

Ефективність силового впливу модульованого струму на метал, що зварюється (по відношенню до зварювання на постійному струмі, який дорівнює I_{av}), будемо оцінювати,

$$\text{виходячи із безрозмірного параметра } K = \frac{I_{eff}^2 - I_{av}^2}{I_{av}^2}.$$

Відзначимо, що різниця $I_{eff}^2 - I_{av}^2$ залишається постійною при будь-якому значенні струму I_1 в паузі, у той час як I_{av} адитивно залежить від I_1 . Тому параметр K є функцією I_1 . На рис. 4 наведені залежності параметра K від величини тривалості вершини імпульсу при різних значеннях I_1 .

Якщо $I_1 = 0$, то параметр K практично дорівнює одиниці у всьому діапазоні зміни t_{21} . Це означає, що при $I_1 = 0$ і оптимальному виборі часових параметрів трапецеїдального імпульсу його силовий вплив на метал зварювальної ванни вдвічі перевершує силовий вплив постійного струму, що за величиною збігається з середнім значенням модульованого струму. При збільшенні струму в паузі силова ефективність модульованого струму спадає — так, наприклад, $K \approx 0,5$ при $I_1 = 60$ А.

Проведений теоретичний аналіз і кількісні оцінки можуть бути корисними при проектуванні джерел зварювального струму, а також при визначенні параметрів режимів зварювання неплавким електродом з високочастотною імпульсною модуляцією струму, які забезпечують підвищену проплавляючу здатність зварювальної дуги.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Демченко В.Ф., Кривцун І.В., Крикент І.В., Шуба І.В. Силовое взаимодействие тока дуги с собственным магнитным полем. *Автомат. сварка*. 2017. № 3. С. 20—29. doi: <https://doi.org/10.15407/as2017.03.03>
2. Демченко В.Ф., Бои У., Кривцун І.В., Шуба І.В. Действующие значения электродинамических характеристик процесса сварки неплавящимся электродом с импульсной модуляцией тока дуги. *Автомат. сварка*. 2017. № 8. С. 3—14. doi: <https://doi.org/10.15407/as2017.08.01>

Надійшло до редакції 16.07.2018

REFERENCES

1. Demchenko, V. F., Krivtsun, I. V., Krikent, I. V. & Shuba, I. V. (2017). Force interaction of arc current with self-magnetic field. *The Paton Welding J.*, No. 3, pp. 15-24. doi: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.03.03>
2. Demchenko, V. F., Boi, U., Krivtsun, I. V. & Shuba, I. V. (2017). Effective values of electrodynamic characteristics of the process of nonconsumable electrode welding with pulse modulation of arc current. *The Paton Welding J.*, No. 8, pp. 2-11. doi: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.08.01>

Received 16.07.2018

*И.В. Кривцун*¹, *В.Ф. Демченко*¹, *Д.А. Номировский*²

¹ Інститут електросварки ім. Е.О. Патона НАН України, Київ

² Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ

E-mail: krivtsun@paton.kiev.ua, dvf39@ukr.net, nomirovskii@univ.kiev.ua

К ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО СИЛОВОМУ ДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСОВ СВАРОЧНОГО ТОКА

Рассмотрена задача выбора оптимальной формы импульсов тока, обеспечивающих максимальное силовое воздействие электромагнитного поля дуги на металл сварочной ванны при сварке неплавящимся электродом с высокочастотной импульсной модуляцией тока. Приведены необходимое и достаточное условия достижения оптимальной формы импульсов тока. Одной из возможных оптимальных форм импульсной модуляции тока является меандр. В электрических цепях с дугой формирование прямоугольных импульсов тока невозможно, поэтому в качестве приближения были рассмотрены импульсы трапецеидальной формы. Для таких импульсов с фиксированной длительностью переднего и заднего фронтов приведены результаты параметрической оптимизации временных параметров импульсной модуляции тока.

Ключевые слова: *сварка неплавящимся электродом, импульсная модуляция тока, форма импульсов, действующее значение тока, сварочная ванна, электромагнитная сила.*

I.V. Krivtsun¹, V.F. Demchenko¹, D.A. Nomirovskii²

¹ Ye.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kiev

² Taras Shevchenko National University of

E-mail: krivtsun@paton.kiev.ua, dvf39@ukr.net, nomirovskii@univ.kiev.ua

TO THE THEORY OF WELDING CURRENT IMPULSES OPTIMAL FOR FORCE ACTION

The problem of the optimum shape of current pulses providing the maximum force action of the electromagnetic field of an arc on a weld pool metal at the welding by a nonmelting electrode with high-frequency modulation of the current has been considered. Necessary and sufficient conditions for getting the optimum shape of welding pulses are given. One of the possible optimum forms of current pulse modulation is a meander. In electric circuits with arc, it is impossible to form rectangular current pulses. Therefore, trapezoidal pulses are considered. The results of parametric optimization of the time parameters of the current pulse modulation are given for such pulses with fixed durations of the leading and trailing fronts.

Keywords: *welding by a nonmelting electrode, pulse current modulation, pulse shape, effective current value, weld pool, electromagnetic force.*