

ВИЩІ ГАРМОНІКИ СТРУМУ В ТРАНСФОРМАТОРНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ З ІМПУЛЬСНИМИ ПРИСТРОЯМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ГОРІННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ

А.М. Жерносеков¹, О.А. Андріанов², С.В. Римар¹, О.Ф. Шатан¹, А.О. Муха¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Український національний комітет Міжнародної торгової палати. 01054, м. Київ, вул. Рейтарська, 19-Б.

E-mail: office@iccuq.org

Трансформаторні джерела живлення зварювальної дуги змінного струму промислової частоти генерують в живлячу мережу на порядок менший рівень вищих гармонік струму за значенням коефіцієнта загальних гармонійних спотворень, ніж інверторні джерела, при цьому досягається їх висока електромагнітна сумісність з іншим обладнанням мережі живлення, до того ж вони значно простіші в обслуговуванні і більш надійні. Розраховано гармонійний склад струму в процесі зварювання змінним струмом при використанні імпульсних пристроїв стабілізації горіння дуги. Показано, що застосування стабілізуючих імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги, більш переважна ніж полярність імпульсів, яка збігається з полярністю струму дуги. Перевага також спостерігається за ефективністю процесів зварювання і за меншою генерацією вищих гармонік струму. Бібліогр. 18, рис. 7.

Ключові слова: зварювальні джерела живлення, трансформатори, зварювальна дуга, стабілізуючі імпульси, вищі гармоніки струму

Вступ. В останні десятиліття досягнуті великі успіхи в розробці та широкому застосуванні джерел живлення зварювальної дуги інверторного типу з цифровими системами управління і регулюванням форми кривої зварювального струму, однак застосування зварювальної дуги змінного струму промислової частоти все ще залишається затребуваним [1–3]. Дугу змінного струму забезпечують традиційні зварювальні джерела живлення, в яких основним силовим електромагнітним елементом є зварювальний трансформатор. Такі сучасні джерела живлення, оснащені додатковими блоками управління і впливу на зварювальну дугу широко застосовуються в промисловості.

В якості перспективних напрямів використання імпульсних впливів при зварюванні змінним струмом є застосування імпульсних пристроїв стабілізації (ПС) горіння дуги, які поєднуються з традиційними джерелами живлення змінного струму [4, 5]. Застосування даних пристроїв дозволяє знизити напругу холостого ходу трансформаторів та зменшити витрати їх активних матеріалів.

Поки немає єдиного рішення про характер параметрів стабілізуючих імпульсів, таких як енергія імпульсу, час його подачі (ін'єктування) щодо моменту переходу зварювального струму через нуль, полярність струму. В роботах [3, 6] частково вдалося сформулювати та вирішити цю задачу. Критерієм оптимізації було обрано мінімум напруги холостого ходу джерела живлення, при якому дуга ще стабільно горить, а параметром, який варіюється, служила різниця зміщення фаз між зварюваль-

ним струмом і стабілізуючим імпульсом. На рис. 1 показані визначені залежності мінімальної напруги холостого ходу зварювального трансформатора, при якому горить дуга, від різниці зміщення фаз між зварювальним струмом та стабілізуючим імпульсом, коли полярність стабілізуючого імпульсу збігається з полярністю зварювального струму і коли полярність стабілізуючого імпульсу протилежна полярності зварювального струму. З аналізу отриманих кривих випливає, що залежності мають виражені мінімуми і можна розв'язувати задачу оптимізації. Також видно, що застосування стабілізуючих імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги, має перевагу, оскільки крива мінімальної напруги холостого ходу $U_{x.x.min}$ в цьому випадку знаходиться нижче, ніж при застосуванні імпульсів, що збігається з полярністю зварювального струму. Дано пояснення цього факту: стабілізуючий імпульс спрямований протилежно до зварювального струму, не перешкоджає роботі джерела живлення і сприяє тому, що після закінчення імпульсу джерело живлення працює як стабілізуючий пристрій.

Постановка задачі дослідження. Інверторні джерела живлення для дугового зварювання, маючи гнучкі параметри налаштування, відкривають широкі перспективи їхнього використання. Однак, як показує досвід промислового застосування електрозварювального обладнання, традиційні джерела живлення на базі зварювальних трансформаторів також ще залишаються затребуваними [1, 4]. Це пояснюється насамперед надійністю їх основного силового електромагнітного елементу

Жерносеков А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>, Андріанов О.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4767-3205>,

Римар С.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>, Шатан О.Ф. – <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>,

Муха А.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9810-4569>

© А.М. Жерносеков, О.А. Андріанов, С.В. Римар, О.Ф. Шатан, А.О. Муха, 2022

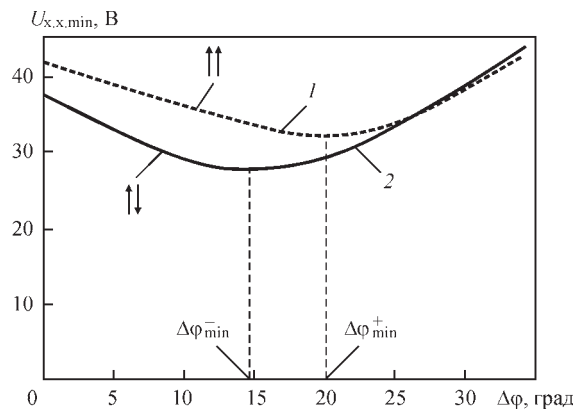


Рис. 1. Залежності мінімальної напруги холостого ходу зварювального трансформатора, при якому горить дуга, від різниці зміщення фаз між зварювальним струмом та стабілізуючим імпульсом: 1 – полярність стабілізуючого імпульсу збігається з полярністю зварювального струму; 2 – полярність стабілізуючого імпульсу протилежна полярності зварювального струму [3, 6]

– трансформатора і тим, що інверторні джерела генерують у мережу живлення значний рівень вищих гармонік струму, мають низьку електромагнітну сумісність [7] і не настільки надійні. Традиційні джерела живлення генерують в живлячу мережу значно менший спектр гармонік [7, 8]. До того ж традиційне обладнання зварювальної дуги змінного струму набагато простіше в обслуговуванні, ніж зварювальні інверторні джерела живлення, які часто живлять дугу постійним струмом. При зварюванні на постійному струмі взаємодія власного магнітного поля дуги та поля зварювального контуру відхиляє дугу внаслідок магнітного дуття, що має край негативно наслідки.

Але питання генерації вищих гармонік струму традиційними зварювальними джерелами живлення змінного струму, оснащених пристроями стабілізації зварювальної дуги, залишається недостатньо дослідженим. Вирішенню цієї задачі присвячені дослідження, наведені в даній статті.

Метою роботи є розрахунок гармонійного складу струму в процесі зварювання змінним струмом традиційними трансформаторними джерелами живлення при використанні імпульсних пристроїв стабілізації горіння дуги і аналіз генерації ними вищих гармонік струму.

Результати досліджень. Удосконалення традиційних зварювальних джерел живлення йде по шляху зменшення маси зварювального трансформатора. В даних джерелах стабільне запалювання зварювальної дуги, її горіння і стійкість процесу зварювання пов'язані з високими рівнями напруги холостого ходу. Якщо це забезпечується за рахунок напруги зварювального трансформатора, то призводить до суттєвого підвищення його маси. В Інституті електрозварювання (ІЕЗ) ім. Є.О. Патона цю проблему вирішили в тому числі за рахунок застосування помножувачів напруги [9] або пристроїв стабілізації горіння дуги [10, 11], які дозволяють знизити вторинну напругу трансформатора.

Дослідження впливу схемного рішення й способів регулювання на зовнішні характеристики традиційних трансформаторних джерел живлення, аналіз впливу даних характеристик на стійкість горіння зварювальної дуги, а також дослідження динамічних процесів в електричних колах змінного струму при подачі стабілізуючих імпульсів достатньо повно описано в роботах [3, 6, 12]. Зупинимося тут на знаходженні й аналізі гармонійного складу змінного зварювального струму при різних схемних рішеннях і способах регулювання характеристик традиційних джерел зварювальної дуги.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона накопичено великий досвід по розробці різних типів імпульсних пристроїв стабілізації дуги змінного струму. Застосування таких пристроїв на практиці дозволяє покращувати якість формування зварного шва, збільшувати продуктивність процесу зварювання, сприяти економії електроенергії та надавати можливість застосовувати більш продуктивні режими та недорогі електроди для зварювання постійним струмом [5].

Типова силова частина зварювального джерела живлення змінного струму з імпульсним пристроєм стабілізації горіння дуги. При розробці традиційних джерел живлення доцільно вибрати зварювальні трансформатори з розвинутими магнітними полями розсіювання. Регулювання зварювального струму можна забезпечити конструкцією самого трансформатора, або здійснювати електричними методами, наприклад, за допомогою додаткового реактора, який комутується електронними ключами. Перевага такого способу електричного регулювання полягає в тому, що відбувається живлення зварювальної дуги струмом без нульових пауз.

На рис. 2 наведена електрична схема зварювального джерела живлення з тиристорним регулюванням зварювального струму. Джерело складається зі зварювального трансформатора T_r , дроселя L , підключених паралельно до нього двох зустрічно включених тиристорів VS_1 і VS_2 , пристрою стабілізації горіння дуги ПС, вихід якого підключений до дугового проміжку A . Зварювальний трансформатор T_r налічує три обмотки з кількістю витків w_1 , w_2 , w_3 . Вторинна обмотка w_2 включена послідовно з дроселем L і зварювальною дугою A . Обмотка w_3 живить ПС.

Кожен з тиристорів VS_1 і VS_2 включається зі зміщенням по фазі на кут ψ щодо напруги на обмотці з кількістю витків w_2 . Зміною кута ψ здійснюється регулювання зварювального струму джерела живлення. Під час зварювального процесу величина кута залишається незмінною $\psi = const$.

При проходженні зварювального струму через нуль ПС генерує імпульс струму, що подається на електричну дугу, полегшуючи її повторне запалювання. ПС дозволяє знизити напругу холостого ходу на вторинній обмотці з кількістю витків w_2 зварювального трансформатора T_r в зв'язку із зниженням напруги запалювання дуги.

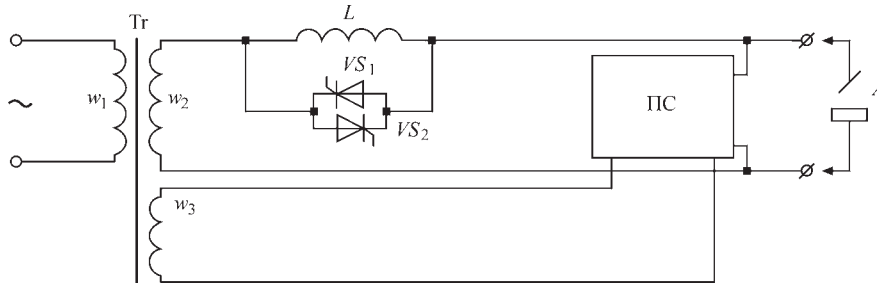


Рис. 2. Електрична схема зварювального джерела живлення з тиристорним регулюванням зварювального струму

Дослідження електромагнітних процесів у джерелах живлення змінного струму з тиристорним регулюванням. Аналіз перехідних процесів у джерелі живлення (рис. 2) при моделюванні зварювальної дуги як проти-ЕРС із напругою на дузі U_A представлено у роботі [6]. Скористаємося цими результатами для того, щоб обчислити спектр гармонік.

На рис. 3 [6] представлена осцилограма струму дуги, напруги на ній і напруги холостого ходу.

Закон зміни зварювального струму на першому етапі з врахуванням того, що при початковій фазі $\varphi_0 = \varphi$ початковий струм дорівнює нулю $I_0 = 0$:

$$i_1(t) = \frac{U_m}{\omega(L_s + L)}(\cos \varphi - \cos \omega t) - \frac{U_A}{\omega(L_s + L)}(\omega t - \varphi), \quad (1)$$

де U_m – амплітудне значення напруги на обмотці з кількістю витків w_2 ; ω – кутова частота; t – час; L_s – індуктивність розсіювання трансформатора.

З формули (1) можна визначити не тільки закон зміни зварювального струму i_1 на ділянці від φ до ψ , але й початкове діюче значення струму I_1 для другого етапу комутації

$$I_1 = \frac{U_m}{\omega(L_s + L)}(\cos \varphi - \cos \psi) - \frac{U_A}{\omega(L_s + L)}(\psi - \varphi). \quad (2)$$

Закон зміни зварювального струму на ділянці від ψ до $\psi + \alpha$ визначається з виразу

$$i_2(t) = \frac{U_m}{\omega L_s}(\cos \psi - \cos \omega t) - \frac{U_A}{\omega L_s}(\omega t - \psi) + I_1. \quad (3)$$

Очевидно, що в момент часу, коли струм i_2 стає рівним I_1 , скінчується ділянка тривалістю $\omega t = \alpha$. Дорівнявши вираз для струму i_2 у момент часу $\psi + \alpha$ до значення I_1 (формули (2) і (3)), отримаємо рівняння для визначення тривалості комутації α

$$\frac{U_A}{U_m} \alpha = \cos \psi - \cos(\psi + \alpha). \quad (4)$$

Після запирання відповідного тиристора (VS_1 і VS_2), починаючи з моменту часу $\psi + \alpha$, закон зміни зварювального струму описується виразом

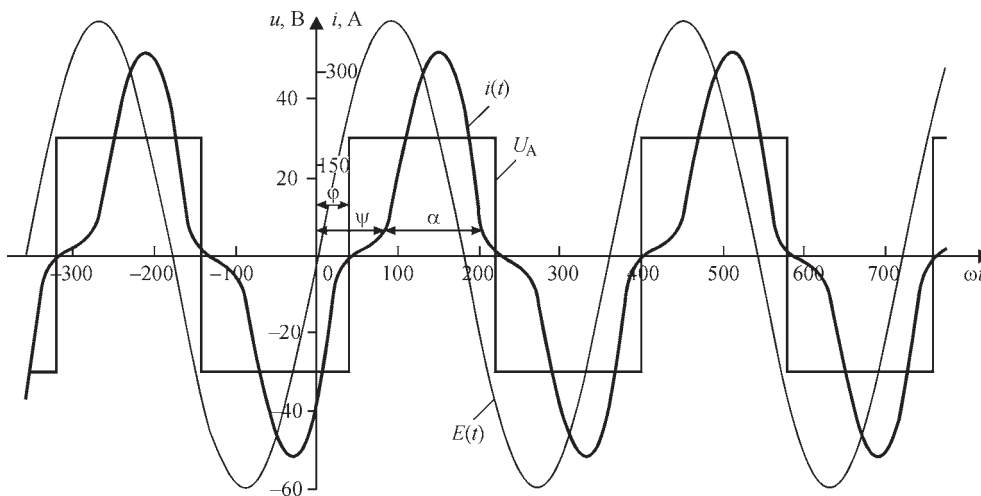
$$i_3(t) = \frac{U_m}{\omega(L_s + L)}[\cos(\psi + \alpha) - \cos \omega t] - \frac{U_A}{\omega(L_s + L)}[\omega t - (\alpha + \psi)] + I_1. \quad (5)$$

Видно, що праві частини формул (1) і (5) тотожні, тому для полегшення подальших обчислень будемо користуватися останньою.

Знаючи струми i_1 , i_2 , i_3 , а також часові інтервали їхнього протікання й задаючись кутом включення тиристорів VS_1 і VS_2 , визначимо вираз для зварювального струму на напівперіоді

$$i(t) = \begin{cases} i_1(t), & \varphi < \omega t < \psi; \\ i_2(t), & \psi < \omega t < \psi + \alpha; \\ i_3(t), & \psi + \alpha < \omega t < \pi. \end{cases} \quad (6)$$

Визначивши часові залежності струмів на трьох етапах комутації (рис. 3), можна знайти гармонійний склад зварювального струму

Рис. 3. Часові залежності струму дуги i , напруги на ній U_A і напруги холостого ходу E

$$i(t) = \sum_h \left[a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t) \right], \quad (7)$$

де h – номер гармоніки; коефіцієнти

$$a_h = \left[1 + (-1)^h \right] \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} i(t) \cos(h\omega t) dt ;$$

$$b_h = \left[1 + (-1)^h \right] \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} i(t) \sin(h\omega t) dt , \quad (8)$$

а модуль струму

$$|i_h| = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} . \quad (9)$$

На рис. 4, а показано гармонійний склад зварювального струму $|i_h|$ при живленні дуги змінним струмом (дуга як проти-ЕРС). З рисунку видно, що парні гармоніки струму відсутні.

Коефіцієнт загальних гармонійних спотворень THD_i (Total Harmonics Current Distortion [13]) визначається за формулою

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} |i_h|^2}}{|i_1|} . \quad (10)$$

Результат збігається з отриманим раніше в роботі [14] методом гармонійного балансу.

Аналіз стійкості горіння дуги змінного струму і моделювання її динаміки. Проведемо дослідження впливу стабілізуючих імпульсів на горіння зва-

ривальної дуги. Особливість цього дослідження, в основі якого лежить метод математичного моделювання, полягає у виборі динамічної моделі зварювальної дуги. Модель зварювальної дуги у вигляді проти-ЕРС, що використалася вище, для дослідження динамічних процесів в електричних колах з дугою непридатна, тому що по своїй суті є статичною.

Узагальнена математична модель динамічної дуги [15, 16] розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, найбільш адекватно описує динаміку електричної дуги як елемента електричного кола. Вона враховує не тільки нелінійність статичної вольт-амперної характеристики, але й термічну інерційність стовпа дуги. Саме термічні процеси, і в першу чергу процес іонізації-деіонізації, впливають на провідність плазми стовпа дуги. Стовп дуги змінного струму частотою 50 Гц при кожній зміні полярності встигає деіонізуватися, що вимагає підвищеної напруги для підтримки розряду. Якщо джерело живлення не може забезпечувати необхідну напругу, дуга гасне.

Розглянемо електричне коло (без підключення імпульсного стабілізатора), що зображене на рис. 5 і являє собою спрощену схему силової частини традиційних зварювальних джерел живлення змінного струму, підключену до дуги A . Система диференціальних рівнянь, які описують це коло, складається з рівняння Кирхгофа й рівняння узагальненої математичної моделі динамічної дуги

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_A = E(t); \quad \theta \frac{di_0^2}{dt} + i_0^2 = i_A^2, \quad (11)$$

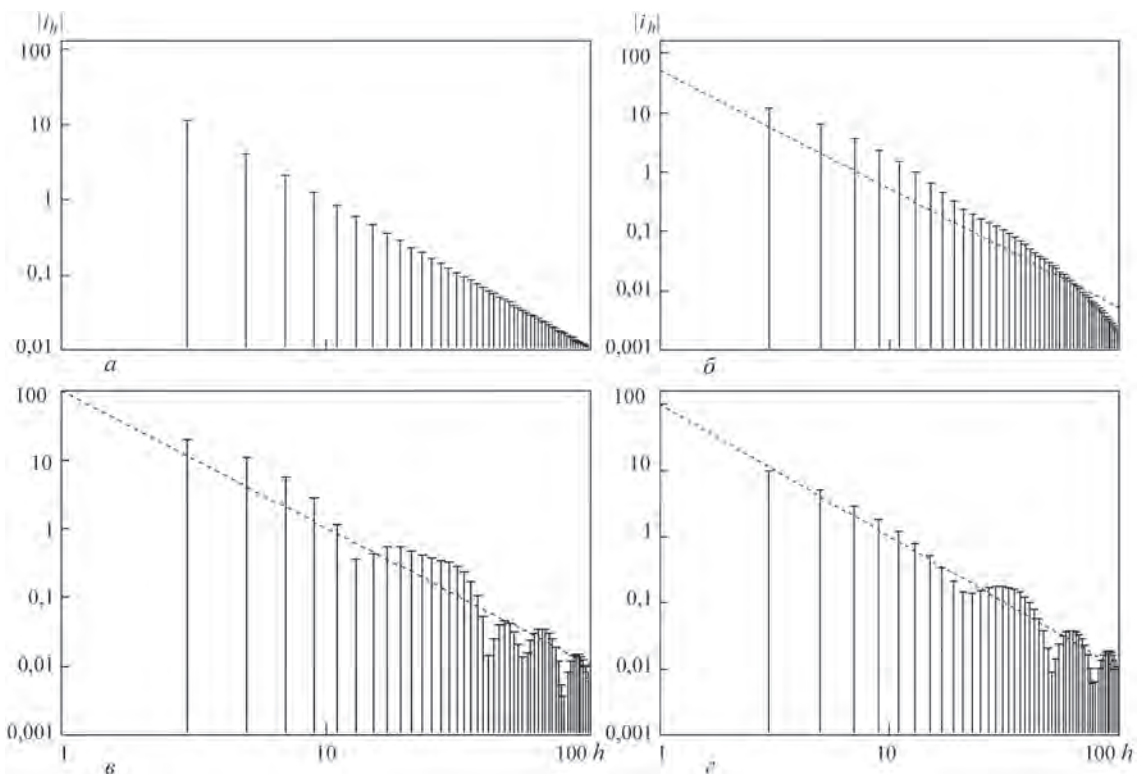


Рис. 4. Гармонійний склад зварювального струму $|i_h|$ при живленні дуги змінним струмом: дуга як проти-ЕРС (а); динамічна модель зварювальної дуги (б); дуга зі стабілізуючими імпульсами, коли полярність імпульсу збігається з полярністю струму дуги (в); полярність імпульсу протилежна полярності струму дуги (з); а – $\text{THD}_i = 9,1\%$; б – 9,2; в – 15,7; з – 7,4

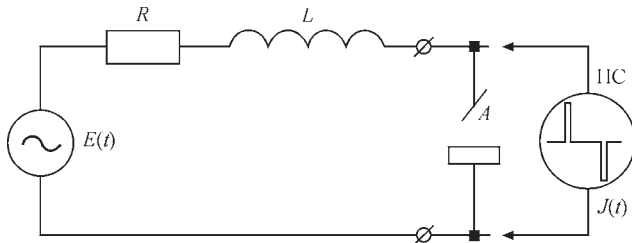


Рис. 5. Спрощена схема силової частини традиційних зварювальних джерел живлення змінного струму

де i – струм реактора L і резистора R ; $E(t)$ – напруга джерела живлення, у загальному випадку має вигляд $E(t) = U_m \sin(\omega t - \varphi)$; U_m – амплітуда напруги холостого ходу; φ – кут зміщення фаз; i_0 – струм статичного стану дуги; θ – характерний час (постійна часу дуги); i_A – струм дуги.

Для знаходження гармонійного складу зварювального струму скористаємося результатами роботи [6] і послідовністю дій по вирішенню системи рівнянь (11).

На рис. 6, а [6] представлені результати моделювання, з яких видно, що форма напруги на дузі має яскраво виражені піки запалювання на кожному напівперіоді, які перевищують напругу на дузі. Підвищена напруга забезпечується як наявністю індуктивності, так і фазовим зміщенням між струмом дуги й напругою джерела живлення.

Знаючи часові залежності струму, можна одержати його гармонійний склад (див. рис. 4, б). Хоча цей спектр гармонік відрізняється від спектра, отриманого при моделюванні дуги як проти-ЕРС (порівняно з рис. 4, а), коефіцієнт спотворень THD_1 практично не розрізняється.

Один з варіантів стабілізації дуги імпульсами струму, які подаються від додаткового джерела живлення, показує рис. 5 при приєднаному імпульсному джерелі струму ПС. Система диференціальних рівнянь, що описує перехідні процеси на етапі імпульсу, виходить із системи (11), якщо струм дуги [3, 6]

$$i_A = i + J(t) = i + J_m \sin \Omega t, \quad (12)$$

де J_m і Ω – амплітуда й частота імпульсів струму.

Як видно з рис. 6, б [6] додаткові імпульси знижують напругу на дузі, яка майже не змінюється протягом напівперіоду змінного струму.

При зміні параметрів імпульсів струму й параметрів основного джерела живлення можна досліджувати стійкість системи. У комп'ютерних математичних пакетах є процедури для інтегрування систем звичайних диференціальних рівнянь. Однак ці процедури забезпечують безперервне інтегрування й не пристосовані для інтегрування систем, праві частини яких різні на різних інтервалах часу. Безпосереднє застосування їх неможливо. Потрібна доробка, модифікація й адаптація їх для задач подібного класу. Опишемо методику, що застосовувалася при цих дослідженнях.

Існує модифікований метод стрільби й метод багаторазової стрільби для одержання періодичних рішень в автономних електричних колах з дугою [17], який можна застосовувати до неавтономних кіл з дугою. Досвід роботи [6] показав, що зведення задачі Коші до крайової задачі з умовами зшивки напівперіоду на рівні I і I_0

$$i\left(0, \frac{\pi}{\omega}, I, I_0\right) = -I; \quad i_0\left(0, \frac{\pi}{\omega}, I, I_0\right) = I_0 \quad (13)$$

є невиправдано громіздким і вимагає потужної обчислювальної техніки (тут $i(t_0, t, I, I_0)$ і $i_0(t_0, t, I, I_0)$ формальне позначення рішення досліджуваної нами системи). Пояснюється це необхідністю додаткового рішення варіаційної задачі.

Деякі комп'ютерні математичні пакети, наприклад, MathCAD, дозволяють формально записувати умови зшивки на напівперіоді й вирішувати отримані рівняння без залучення варіаційних методів. Рівняння для зшивки при нульовому струмі виглядають наступним чином:

$$i\left(\varphi, \frac{\pi}{\omega}, 0, I_0\right) = 0; \quad \left(\varphi, \frac{\pi}{\omega}, 0, I_0\right) = I_0. \quad (14)$$

тут I_0 і φ – невідомі, що підлягають визначенню.

Саме цей шлях, через його простоту, є перспективним при застосуванні його результатів для гармонійного аналізу.

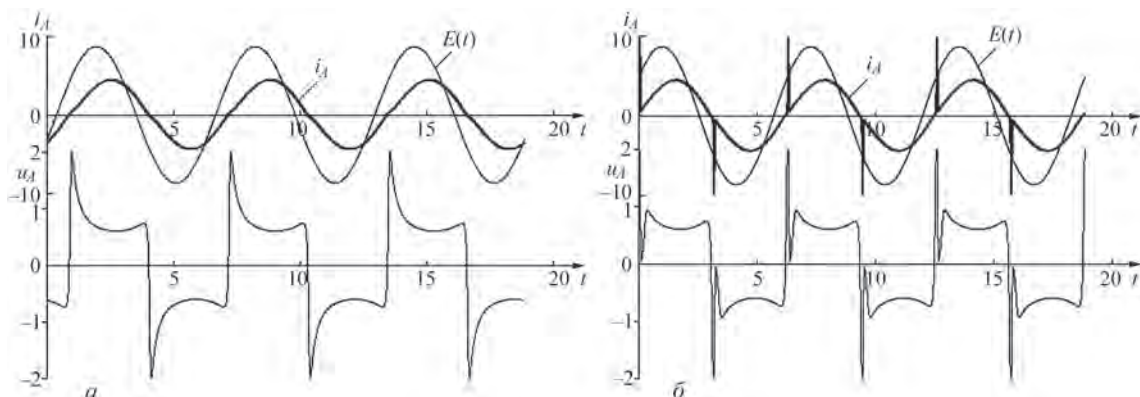


Рис. 6. Часові залежності струму дуги i_A , напруги на ній U_A і напруги холостого ходу E , отримані в результаті моделювання: а – без імпульсів струму; б – з імпульсами струму

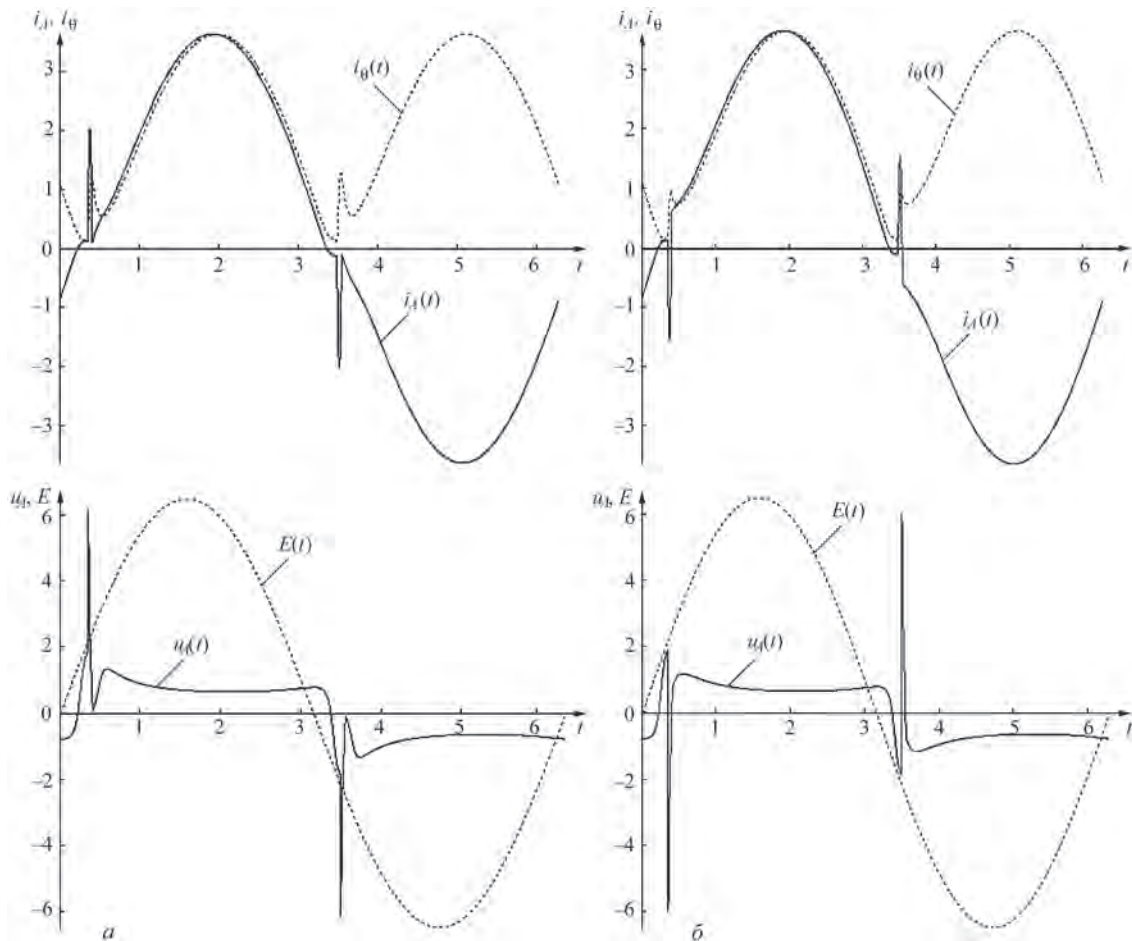


Рис. 7. Часові залежності струмів і напруги у джерелі живлення зі стабілізуючими імпульсами: полярність імпульсу збігається з полярністю струму дуги (а); полярність імпульсу протилежна полярності струму дуги (б)

Гармонійний аналіз режимів стабілізації. На рис. 7 показані часові залежності струмів і напруги у джерелі живлення зі стабілізуючими імпульсами [3, 6], одержані по наведеним вище формулам, які досить добре збігаються з осцилограмами, отриманими експериментально [5]. Рис. 7, а відображає випадок, коли полярність імпульсу збігається з полярністю струму дуги, а рис. 7, б, коли полярність імпульсу протилежна полярності струму дуги.

По цим часовим залежностям струму по формулам (8) і (9) одержано його гармонійний склад, показаний на рис. 4, в, г. На рис. 4, в наведено гармонійний склад струму в джерелі живлення зі стабілізуючими імпульсами, коли полярність імпульсу збігається з полярністю струму дуги, а на рис. 4, г, коли полярність імпульсу протилежна полярності струму дуги.

Як було сказано вище, кращим є режим, коли полярність стабілізуючого імпульсу протилежна полярності зварювального струму [3, 6]. Його технологічна ефективність підтверджена в роботі [18]. Порівняння рис. 4, а, б, г демонструє, що застосування такого режиму є більш перспективним ще й з погляду електромагнітної сумісності. Рівень вищих гармонік з $\text{THD}_i = 7,4\%$ менше ніж рівень з $\text{THD}_i = 9,1$ і $9,2\%$ для джерел живлення без стабілізаторів горіння зварювальної дуги.

Висновки

1. Одним із перспективних напрямів застосування імпульсних впливів при зварюванні змінним струмом є використання імпульсних пристроїв стабілізації горіння дуги у поєднанні з трансформаторними джерелами живлення змінного струму.

2. Застосування стабілізуючих імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги, більш переважна. При цьому можливо одержати мінімальні масогабаритні показники джерела живлення та досягти високої електромагнітної сумісності за рахунок низького рівня вищих гармонік, що генерується у мережу живлення.

3. Отримане значення сумарного коефіцієнта нелінійних спотворень струму нижче за існуючі стандарти на якість електроенергії. Це відкриває перспективу модернізації існуючих і створення нових конкурентоспроможних джерел живлення на базі зварювальних трансформаторів з імпульсною стабілізацією зварювальної дуги.

Список літератури

1. Заруба И.И., Андреев В.В., Дыменко В.В. (2001) Усовершенствование трансформаторов для ручной дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, 3, 45–48.
2. Кидзи И., Кобаяси К., Исии Д., Ямаока Х. (2003) Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение. *Там же*, 10–11, 59–63.

3. Андрианов А.А., Сидорец В.Н. (2009) Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока. *Електротехніка і електромеханіка*, **2**, 5–12.
4. Патон Б.Е., Заруба И.И., Дыменко В.В., Шатан А.Ф. (2006) Снижение материалоемкости источников питания и потребления электроэнергии при сварке. *Автоматическая сварка*, **10**, 20–29.
5. Патон Б.Е., Заруба И.И., Дыменко В.В., Шатан А.Ф. (2007) *Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги*. Київ, Екотехнологія.
6. Андрианов О.А. (2010) *Оптимізація процесу стабілізації зварювання корозійностійких сталей змінним струмом*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, 05.03.06. Київ, Нац. техн. ун-т України «Київський політехн. ін-т».
7. Рымар С.В., Жерносеков А.М., Сидорец В.Н. (2011) Влияние однофазных источников питания сварочной дуги на электрическую сеть. *Автоматическая сварка*, **12**, 9–15.
8. Рымар С.В., Жерносеков А.М., Сидорец В.Н. (2011) Влияние сварочных источников питания на трехфазную электрическую сеть. *Там же*, **10**, 49–55.
9. Пентегов И.В., Латанский В.П., Склифос В.В. (1992) *Малогабаритные источники питания с улучшенными энергетическими показателями. Новые сварочные источники питания*. Сб. науч. тр. Киев, АН Украины, ИЭС им. Е.О. Патона, 66–71.
10. Заруба И.И., Дыменко В.В., Кухарский В.Я. (1991) Применение многостовых источников переменного тока для дуговой сварки. *Автоматическая сварка*, **2**, 59–63.
11. Пентегов И.В., Дыменко В.В., Склифос В.В. (1994) Сварочные источники питания с импульсным поджигом дуги. *Там же*, **7–8**, 36–39.
12. Сидорец В.Н., Андрианов А.А. (2007) Методы анализа режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск*. Силовая электроника та енергоефективність, **5**, 71–74.
13. Paice, D.A. (1995) *Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse Methods for Clean Power*. NY, IEEE PRESS.
14. Сидорец В.Н., Кункин Д.Д., Москович Г.Н. (2011) Гармонический анализ переменного тока электрической сварочной дуги. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск*. Силовая электроника та енергоефективність, **1**, 219–222.
15. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. (1988) Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги. *Автоматическая сварка*, **11**, 36–40.
16. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. (2013) *Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка».
17. Сидорец В.Н. (2006) Метод многократной стрельбы для исследования бифуркаций динамических систем. *Електронне моделювання*, **4** (28), 3–13.
18. Шатан А.Ф., Андрианов А.А., Сидорец В.Н., Жерносеков А.М. (2009) Эффективность стабилизации дуги переменного тока при сварке покрытыми электродами. *Автоматическая сварка*, **3**, 31–33.

References

1. Zaruba, I.I., Andreev, V.V., Dymenko, V.V. (2001) Improvement of transformers for manual arc welding. *The Paton Welding J.*, **3**, 43-46.
2. Kiji, N., Kobayashi, K., Ishii, J., Yamaoka, H. (2003) Development of high efficiency arc welding methods. *The Paton Welding J.*, **10–11**, 56-60.
3. Andrianov, A.A., Sidorets, V.N. (2009) Optimization of modes for stabilization of alternating-current welding arc. *Elektrotehnika i Elektromechanika*, **2**, 5–12 [in Ukrainian].
4. Paton, B.E., Zaruba, I.I., Dymenko, V.V., Dymenko, V.V., Shatan, A.F. (2006) Lowering of material content of power sources and power consumption in welding. *The Paton Welding J.*, **10**, 15-23.
5. Paton, B.E., Zaruba, I.I., Dymenko, V.V., Dymenko, V.V., Shatan, A.F. (2007) *Welding power sources with pulse stabilization of arc burning*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
6. Andrianov, O.A. (2010) Optimization of welding stabilization process of corrosion-resistant steels by alternating current. In: *Syn of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree*. Kyiv, NTUU KPI [in Ukrainian].
7. Rymar, S.V., Zhernosekov, A.M., Sidorets, V.N. (2011) Effect of single-phase power sources of welding arc on electric mains. *The Paton Welding J.*, **12**, 7-12.
8. Rymar, S.V., Zhernosekov, A.M., Sydorets, V.N. (2011) Influence of welding power sources on three-phase mains. *The Paton Welding J.*, **10**, 40-45.
9. Pentegov, I.V., Latansky, V.P., Sklifos, V.V. (1992) *Small-sized power sources with improved power indices*. Kyiv, PWI, 66–71 [in Russian].
10. Zaruba, I.I., Dymenko, V.V., Kukharsky, V.Ya. (1991) Application of multioperator alternating-current power sources for arc welding. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 59–63 [in Russian].
11. Pentegov, I.V., Dymenko, V.V., Sklifos, V.V. (1994) Welding power sources with pulse arc ignition. *Avtomatich. Svarka*, **7–8**, 36–39 [in Russian].
12. Sidorets, V.N., Andrianov, A.A. (2007) Methods of analysis of stabilization modes of alternating-current welding arc. *Tekhnichna Elektrodynamika. Sylova Elektronika ta Energoefektyvnist*, **5**, 71–74 [in Russian].
13. Paice, D.A. (1995) *Power Electronic Converter Harmonics. Multipulse Methods for Clean Power*. NY, IEEE PRESS.
14. Sidorets, V.N., Kunkin, D.D., Moskovith, G.N. (2011) Harmonic analysis of alternating current of electric welding arc. *Tekhnichna Elektrodynamika. Sylova Elektronika ta Energoefektyvnist*, **1**, 219–222, [in Russian].
15. Pentegov, I.V., Sidorets, V.N. (1988) Energy parameters in mathematical model of dynamic welding arc. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 36–40 [in Russian].
16. Sidorets, V.N., Pentegov, I.V. (2013) Deterministic chaos in nonlinear circuits with electric arc. Kyiv, IAW [in Russian].
17. Sidorets, V.N. (2006) Method of multiple shooting for the study of bifurcations of dynamical systems. *Elektronnoe Modelirovanie*, **4** (28), 3–13 [in Russian].
18. Shatan, A.F., Andrianov, A.A., Sidorets, V.N., Zhernosekov, A.M. (2009) Efficiency of stabilisation of the alternating-current arc in covered-electrode welding. *The Paton Welding J.*, **3**, 21-23.

HIGHER CURRENT HARMONICS IN TRANSFORMER POWER SOURCES WITH PULSED DEVICES OF WELDING ARC STABILIZATION

A.M. Zhernosekov¹, O.A. Andrianov², S.V. Rymar¹, O.F. Shatan¹, A.O. Mukha¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Ukrainian National Committee of International Chamber of Commerce (ICC Ukraine). 19B, Reitarska St. 01034, Kyiv.

E-mail: office@iccuq.org

Transformer power sources of welding arc of industrial frequency alternating current generate into the mains the level of higher current harmonics, which is by an order of magnitude lower by the value of the coefficient of general harmonic distortion, than that of the inverter power sources. Here, their high electromagnetic compatibility with other equipment of the mains is achieved. Moreover, they are much easier to maintain and more reliable. Harmonic composition of current during a.c. welding was calculated at application of pulsed devices of arc stabilization. It is shown that application of stabilizing pulses with the polarity opposite to that of arc current, is more advantageous than the use of pulses with the polarity coinciding with that of arc current. Advantages as to welding process effectiveness and smaller generation of higher current harmonics are also observed. 18 Ref., 7 Fig.

Keywords: welding power sources, transformers, welding arc, stabilizing pulses, higher current harmonics

Надійшла до редакції 10.07.2022