

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ДЖЕРЕЛІ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ЗМІННИМ СТРУМОМ

В.М. Сидорець<sup>1</sup>, Ю.В. Бондаренко<sup>2</sup>, О.Ф. Бондаренко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,  
вул. К. Малевича, 11, Київ, 03680, Україна,

<sup>2</sup> Донбаський державний технічний університет,  
пр. Леніна, 84, Лисичанськ, 93100, Україна,

E-mail: [bondarenko.julie@gmail.com](mailto:bondarenko.julie@gmail.com)

<sup>3</sup> Національний технічний університет України «КПІ»,  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

*Досліджено електромагнітні процеси, що відбуваються в електричному колі джерела живлення для дугового зварювання змінним струмом, а також особливості функціонування схеми регулювання зварювального струму. Побудовано графіки залежностей струмів та напруг від часу, які наочно ілюструють електромагнітні процеси у схемі та ефективність і плавність регулювання. Визначено діапазон зміни кута відкриття електронних ключів і отримано сімейство діаграм зварювальних струмів при різних кутах регулювання. Бібл. 2, рис. 2.*

**Ключові слова:** джерело живлення, дугове зварювання, змінний струм, електромагнітний процес.

**Вступ.** Нероз'ємне з'єднання металевих деталей та конструкцій шляхом зварювання широко використовується в будівництві, машинобудуванні, приладобудуванні, електронній промисловості тощо. Більше 85% всього зварювального виробництва сьогодні складає дугове зварювання. Найбільш відповідальна роль в обладнанні для дугового зварювання належить джерелу живлення, яке має забезпечувати стабільне горіння дуги. У роботі джерел живлення для дугового зварювання змінним струмом найбільш критичними є моменти (інтервали), коли зварювальний струм дорівнює нулю [1]. Тому при побудові таких джерел перевагу надають схемним топологіям, які забезпечують відсутність нульових пауз струму та використовують додаткові схемні рішення для підтримання горіння дуги. Зараз основним типом джерел живлення для дугового зварювання змінним струмом є джерела на основі зварювальних трансформаторів. Для дугового зварювання постійним струмом застосовуються інверторні джерела. Перші мають перевагу з точки зору схемотехнічної простоти та надійності роботи, особливо в монтажних та польових умовах, другі виражають за масогабаритними показниками.

Предметом даного дослідження є джерело живлення на базі зварювального трансформатора з розвинутим розсіюванням та тиристорним регулюванням струму, в якому використовується додатковий реактор та пристрій стабілізації горіння дуги. Схема такого джерела має кращі масогабаритні показники та здатна здійснювати більш ефективно і плавно регулювання струму порівняно з традиційними схемами на основі зварювальних трансформаторів, де регулювання виконується механічним способом і в багатьох випадках ступенево.

Мета даної роботи – аналіз електромагнітних процесів, що відбуваються в електричних колах означеного джерела живлення, та дослідження особливостей функціонування схеми регулювання зварювального струму.

**Описання досліджуваної схеми.** На рис. 1, а показано схему трансформаторного джерела живлення з тиристорним регулюванням зварювального струму та додатковим реактором  $L_R$ , де БК – блок керування тиристорами, ПСГД – пристрій стабілізації горіння дуги. Вихід джерела підключено до дугового проміжку А. БК генерує імпульси керування тиристорами  $VS1$  та  $VS2$ . Регулювання зварювального струму здійснюється зміною тривалості відкритого стану тиристорів. ПСГД при проходженні зварювального струму через нуль генерує імпульс, який полегшує повторне запалювання дуги. Наявність у схемі ПСГД дозволяє знизити напругу холостого ходу трансформатора  $TV$  [2] і відповідно покращити його масогабаритні показники. На рис. 1, б представлено еквівалентну схему силової частини джерела живлення на половині періоду струму, де  $e(t)$  – вхідна напруга;  $L_S$  – індуктивність розсіювання трансформатора;  $S$  – ключ, що симулює роботу тиристорів;  $U_A$  – напруга на дузі. Дуга моделюється джерелом ЕРС, оскільки впродовж горіння напруга на ній практично не змінюється, а її напрямок є протилежним напрямку протікання струму в колі. Принцип роботи схеми полягає в наступному. На початковому етапі тиристор закриті, і струм протікає через реактори  $L_S$  і  $L_R$ . У момент часу, який визначається кутом керування, тиристор  $VS1$  або  $VS2$  вмикається і шунтує реактор  $L_R$ , що призводить до збільшення швидкості наростання струму. Через тиристор продовжує протікати струм, по-

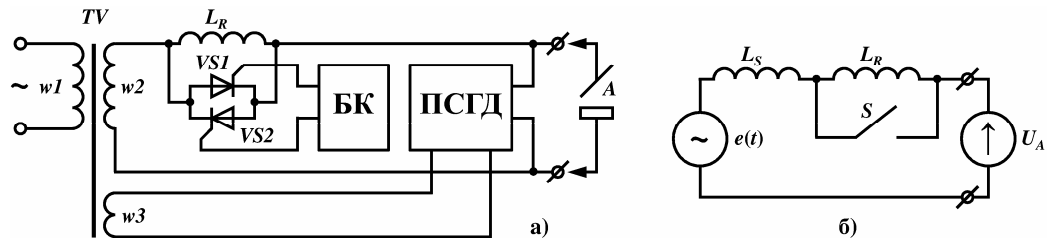


Рис. 1

ки не досягне значення, яке він мав на момент ввімкнення (природна комутація). На останньому етапі струм знову протікає через реактори  $L_S$  і  $L_R$ .

**Математичне описання електромагнітних процесів у схемі.** Диференційне рівняння, що описує електричне коло на половині періоду (рис. 1, б), представляє собою закон Кірхгофа для контуру

$$L \frac{di}{dt} + U_A = U_m \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

де  $L$  – індуктивність кола (сума  $L_S$  і  $L_R$  або тільки  $L_S$  залежно від етапу роботи);  $U_m$  – амплітуда вхідної напруги. Загальний розв'язок рівняння (1) має наступний вигляд:

$$i(t, I_0, \varphi_0) = \frac{U_m}{\omega L} \cdot (\cos \varphi_0 - \cos \omega t) - \frac{U_A}{\omega L} (\omega t - \varphi_0) + I_0, \quad (2)$$

де  $I_0, \varphi_0$  – відповідно початкове значення струму та початкова фаза.

Зсув фази  $\varphi$  між вхідною напругою та зварювальним струмом визначимо за формулою

$$\varphi = \arccos \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_A}{U_m} \right). \quad (3)$$

Закон зміни струму на першому етапі роботи схеми отримаємо з рішення рівняння (2) з урахуванням того, що при початковій фазі  $\varphi_0 = \varphi$  початковий струм  $I_0 = 0$

$$i_1(t) = \frac{U_m}{\omega(L_S + L_R)} \cdot (\cos \varphi - \cos \omega t) - \frac{U_A}{\omega(L_S + L_R)} (\omega t - \varphi). \quad (4)$$

Початковий струм  $I_1$  для другого етапу

$$I_1 = \frac{U_m}{\omega(L_S + L_R)} \cdot (\cos \varphi - \cos \psi) - \frac{U_A}{\omega(L_S + L_R)} (\psi - \varphi), \quad (5)$$

де  $\psi$  – кут регулювання.

Закон зміни струму на другому етапі

$$i_2(t) = \frac{U_m}{\omega L_S} \cdot (\cos \psi - \cos \omega t) - \frac{U_A}{\omega L_S} (\omega t - \psi) + I_1. \quad (6)$$

Закон зміни струму на третьому етапі

$$i_3(t) = \frac{U_m}{\omega(L_S + L_R)} \cdot (\cos(\psi + \alpha) - \cos \omega t) - \frac{U_A}{\omega(L_S + L_R)} (\omega t - (\psi + \alpha)) + I_1, \quad (7)$$

де  $\alpha$  – кут відкритого стану тиристора.

Рівняння для визначення кута відкритого стану тиристора  $\alpha$  отримаємо, прирівнявши вираз для струму  $i_2(t)$  в момент  $(\psi + \alpha)$  до значення  $I_1$

$$\frac{U_A}{U_m} \cdot \alpha = \cos \psi - \cos(\psi + \alpha). \quad (8)$$

Формули (4) і (7) є тотожними, тому для спрощення розрахунків можна користуватися (4). Використовуючи умову періодичності  $i(\pi/\omega, 0, \varphi) = 0$ , знаходимо кут зсуву фази  $\varphi$  між вхідною напругою та зварювальним струмом (3).

За допомогою (4) також можна визначити діапазон зміни кута регулювання  $\psi$ . Мінімальне значення кута  $\psi_{min} = \varphi$ , а максимальне  $\psi_{max}$  співпадає з кутом, при якому функція  $i_1(t)$  має максимум. Знайшовши похідну за часом від  $i_1(t)$  та прирівнявши її до нуля, отримаємо

$$\psi_{max} = \pi - \arcsin \left( \frac{U_A}{U_m} \right). \quad (9)$$

**Графічне представлення електромагнітних процесів у схемі.** На рис. 2, а показано діаграму часу зварювального струму на періоді, а також діаграми вхідної напруги  $e(t)$  і напруги дуги  $U_A$ , на рис. 2, б – сімейство діаграм зварювального струму на половині періоду при різних значеннях кута регулювання  $\psi$ . Як видно з рисунків, завдяки наявності додаткового реактора  $L_R$  зварювальний струм не містить нульових пауз, а його форма суттєво залежить від значення кута регулювання  $\psi$  і є доволі близькою до синусоїдальної при значеннях кута, близьких до мінімального і максимального.

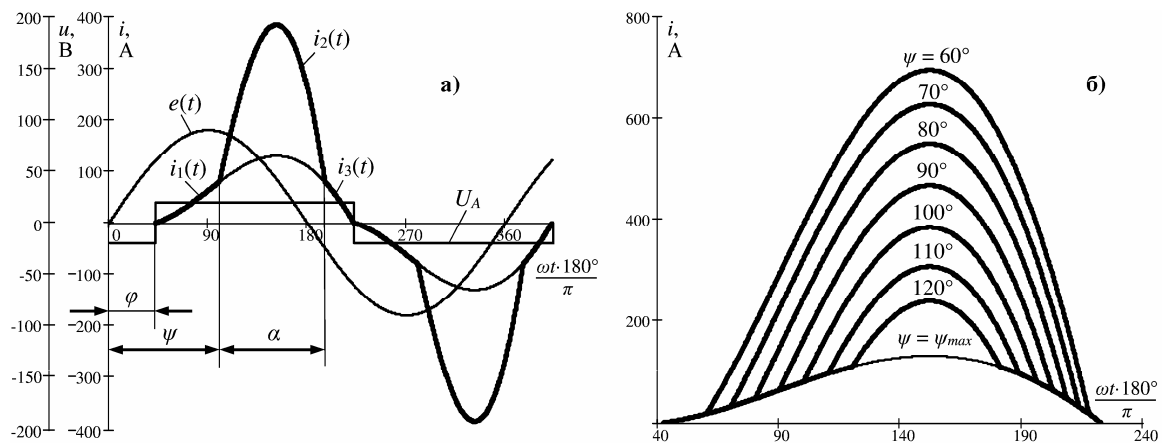


Рис. 2

**Висновки.** Математичні вирази, отримані в роботі, дозволили розрахувати значення зварювального струму в досліджуваній схемі на необхідному інтервалі часу та переконатися у тому, що схема забезпечує відсутність нульових пауз струму. Побудоване за допомогою отриманих формул сімейство діаграм наочно продемонструвало залежність форми зварювального струму від значення кута регулювання, а також ефективність і плавність регулювання. Одержані закономірності відкривають перспективу подальших досліджень інтегральних характеристик зварювального струму та оцінки параметрів якості енергії, що споживається джерелом живлення при роботі на електричну дугу.

1. Патон Б.Е. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией. – Киев.: Экотехнология, 2007. – 248 с.

2. Андрианов А.А., Сидорец В.Н. Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – №2. – С. 5-8.

УДК 621.314: 621.791

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИСТОЧНИКЕ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

В.Н. Сидорец<sup>1</sup>, Ю.В. Бондаренко<sup>2</sup>, А.Ф. Бондаренко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> – Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины,  
ул. К. Малевича, 11, Киев, 03680, Украина,

<sup>2</sup> – Донбасский государственный технический университет,  
пр. Ленина, 84, Лисичанск, 93100, Украина,

E-mail: [bondarenko.julie@gmail.com](mailto:bondarenko.julie@gmail.com)

<sup>3</sup> – Национальный технический университет Украины «КПИ»,  
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Исследованы электромагнитные процессы, протекающие в электрической цепи источника питания для дуговой сварки переменным током, а также особенности функционирования схемы регулирования сварочного тока. Построены графики зависимостей токов и напряжений от времени, которые наглядно иллюстрируют электромагнитные процессы в схеме, эффективность и плавность регулирования. Определен диапазон изменения угла открытия электронных ключей и получено семейство диаграмм сварочных токов при различных углах регулирования. Библ. 2, рис. 2.

**Ключевые слова:** источник питания, дуговая сварка, переменный ток, электромагнитный процесс.

## THE STUDY OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN POWER SUPPLY FOR AC ARC WELDING

V.M. Sydorets<sup>1</sup>, Yu.V. Bondarenko<sup>2</sup>, O.F. Bondarenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> – Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine,  
K. Malevich str., 11, Kyiv, 03680, Ukraine,

<sup>2</sup> – Donbass State Technical University,  
Lenin ave., 84, Lysychansk, 93100, Ukraine,

E-mail: [bondarenko.julie@gmail.com](mailto:bondarenko.julie@gmail.com)

<sup>3</sup> – National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,  
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

The electromagnetic processes in electrical circuit of power supply for AC arc welding and particularities of welding current regulation circuit operation were studied. The timing diagrams of currents and voltages, which visually illustrated electromagnetic processes in the circuit and the effectiveness and smoothness of regulation, were depicted. The range of variation of electronic switches opening angle was found and the diagram set of welding currents at different regulation angles was obtained. References 2, figures 2.

**Key words:** power supply, arc welding, alternative current, electromagnetic process.

1. Paton B. Ye. Welding power supplies with pulse stabilization. – Kiev: Ekotekhnologiya, 2007. – 248 p. (Rus)

2. Andrianov A.A., Sydorets V.N. Optimization of AC welding arc stabilization modes // Elektrotehnika і Elektromekhanika. – 2009. – No 2. – Pp. 5–8. (Rus)

Надійшла 29.01.2016  
Остаточний варіант 23.03.2016