DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).4](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).4)
УДК 621.791.037

DEVELOPMENT OF A LOW-AMPERE POWER SOURCE FOR ARGON-ARC WELDING AND SURFING USING COMPUTER MODELING

РОЗРОБЛЕННЯ МАЛОАМПЕРНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ АРГОНОДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Dmitry S. Hladchenko
gladchenko304@gmail.com

Stanislav V. Drahan
stanyslav.dragan@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0001-8634-782X

Д. С. Гладченко,
магістр зварювання

С. В. Драган,
канд. техн. наук, проф.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. In serial welding production, the most popular are power sources, which supported stable arc burning in the current range of 60...500 A. But, if the current does not exceed 20 A, then the use of these devices becomes either not economically justified, or even impossible at all. However, there are a number of technological processes (welding of thin-sheet metals, welding and surfacing of heat-resistant alloys, welding of elements of different thickness, etc.), for which the use of low-amperage welding arc reveals great technological possibilities. Therefore, the development of low-amperage power sources that ensure stable operation in the range of small currents is an important direction in the development of welding equipment. Due to the fact that low-amperage power sources are not mass produced, there are no proven methods for their design, which significantly complicates the development process. Classical methods of calculation do not always provide results that coincide with practice. The article presents the results of the development of an experimental power source for pulsed arc welding with a non-consumable electrode of a low amperage arc using an adequate computer model. The well-known LTSpice/SWCadIII program was used for modeling the power circuit blocks of the source. Verification of the developed source model under the influence of control signals, as well as changes in the parameters of the system elements, confirmed its adequacy to the real object of modeling. Also, using the model, the system parameters obtained as a result of theoretical calculation were corrected.

Key words: low-amperage arc; pulse-arc welding; computer model; research; characteristics.

Анотація. У серійному зварювальному виробництві найбільш затребуваними є джерела живлення, що підтримують стабільне горіння дуги в діапазоні струмів 60...500 А. Однак якщо струм не перевищує 20 А, то застосування цих апаратів стає або економічно не виправданим, або взагалі не можливим. Проте існує ряд технологічних процесів (зварювання тонколистових металів, зварювання і наплавлення жароміцних сплавів, зварювання елементів, різних за товщиною та ін.), для яких використання малоамперної зварювальної дуги розкриває великі технологічні можливості. Тому розроблення малоамперних джерел живлення, що забезпечують стабільну роботу в діапазоні малих струмів, є актуальним напрямком розвитку зварювальної техніки. Малоамперні джерела живлення серійно не випускаються, відсутні й відпрацьовані методики їх проектування, що істотно ускладнює процес розробки. Класичні методи розрахунку не завжди дають результати, що збігаються із практикою. У статті наведені результати розробки експериментального джерела живлення для імпульсно-дугового зварювання неплавким електродом малоамперною дугою із застосуванням адекватної комп'ютерної моделі. Для моделювання блоків силової схеми джерела використана широко відома програма LTSpice/SWCadIII. Перевірка розробленої моделі джерела під час впливу сигналів регулювання, а також під час зміни параметрів елементів системи підтвердила адекватність моделі реальному об'єкту моделювання. Також за допомогою моделі були відкориговані параметри системи, отримані в результаті теоретичного розрахунку.

Ключові слова: малоамперна дуга; імпульсно-дугове зварювання; комп'ютерна модель; дослідження; характеристики.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Виготовлення зварних листових конструкцій із металів товщиною 0,5...2,0 мм, наприклад, сифонів, компенсаторів, пластин холодильників і т. ін., ускладнене через виникнення пропалин, значних термічних деформацій та великих залишкових напружень, а також схильність матеріалів до утворення гарячих тріщин. Особливою проблемою є отримання тонкого поверхневого шару матеріалів із функціональними властивостями, дуговим наплавленням на конструкційні сталі. Усе це робить проблему обробки таких металів дуговими способами досить актуальною.

Одним із шляхів розв'язання даної проблеми є використання зварювальних технологій із неплавким електродом в аргоні (ТІГ), у тому числі й імпульсно-дугових процесів, із застосуванням спеціалізованих джерел живлення [1; 2].

Імпульсно-дугове зварювання та наплавлення дозволяють істотно поліпшити якість з'єднань (у порівнянні з режимом безперервного струму), але більшість серійних промислових джерел спрямована на реалізацію технології зварювання струмами не менше 20...50 А, що зумовлює низьку ефективність їх використання для зварювання конструкційних сталей і сплавів завтовшки не більше 1...2 мм. Слід також зауважити, що сучасні інверторні джерела живлення, які дозволяють отримати широкий діапазон зварювального струму, поки ще є відносно дорогим технологічним устаткуванням [3].

Тому постає завдання пошуку можливостей створення спеціалізованого малоамперного джерела для імпульсно-дугового зварювання та наплавлення ТІГ із застосуванням перевірених технічних рішень. Але через складність електромагнітних процесів у дузі під час живлення її імпульсним струмом [4–6] використання стандартних методик, за якими розробляються загальнопромислові джерела живлення, призводить до появи розрахункових результатів, що неповною мірою відповідають практичному макетуванню зразка. Унаслідок цього виникає потреба тривалої доводки дослідних зразків, що значно збільшує трудові та фінансові витрати на розробку. Актуальним за таких обставин є застосування методів комп'ютерного моделювання під час розроблення зазначених джерел живлення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Головною особливістю дуги малої потужності є низька стабільність її горіння. Причини, що знижують стабільність дугового розряду при струмах нижче 40 А, пов'язані, насамперед, із більш інтенсивним зростанням електропровідності дугового проміжку порівняно зі зростанням струму, а також із блуканням активних плям по електродах, причому зі знижен-

ням струму стабільність горіння дуги погіршується [1; 2; 7]. Стабільність горіння малоамперної дуги під час зварювання або наплавлення можна суттєво підвищити, якщо використати імпульсний режим подачі струму, за якого малий струм чергової дуги змінюється більш високим робочим струмом [8].

Застосування імпульсної модуляції струму забезпечує також вирішення проблеми забезпечення більшої глибини проплавлення за одночасного зниження потужності дуги під час зварювання, що в цілому сприяє підвищенню якості зварного з'єднання. Під час подачі зварювального імпульсу струму з високою швидкістю зростання попередньому фронту, як показано за допомогою математичного моделювання [5], можна досягти збільшення здатності малоамперної дуги до проплавлення.

Таким чином, розробка спеціалізованого джерела живлення для імпульсно-дугового зварювання неплавким електродом зі стабілізацією малоамперної дуги дозволить забезпечити необхідні технологічні вимоги до зварювального процесу.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕ ВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Виконаний аналіз серійних промислових установок для аргоно-дугового зварювання [9; 10] показав таке: 1) закладені в них параметри силової схеми забезпечують під час зварювання на режимах, близьких до нижньої межі регулювання струму, використання лише 5...15% номінальної потужності джерела живлення; 2) схемні рішення вітчизняних генераторів імпульсного струму створюють фіксовану частоту імпульсів, що обмежує дозування енергії імпульсної дуги та знижує технологічні показники джерел; 3) малоамперні джерела живлення серійно не випускаються, тому відсутні відпрацьовані методики їх проектування; 4) класичні методи розрахунку не завжди дають результати, які задовільно збігаються із практикою.

Усе зазначене вище суттєво ускладнює процес розробки джерел живлення для аргонодугового зварювання неплавким електродом струмом силою не більше 40 А.

Комп'ютерна симуляція моделі джерела живлення у процесі його розробки дозволить дослідити його параметри в різних режимах навантаження, порівняти їх із параметрами аналогічних джерел і вибрати оптимальне схемне рішення.

Мета статті – розробка та дослідження за допомогою комп'ютерного моделювання малоамперного джерела для імпульсно-дугового зварювання й наплавлення неплавким електродом.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Під час розроблення та дослідження джерела використані відомі методи розрахунку і конструювання зварювальних джерел живлення [9; 10] та про-

грамний продукт LTSpice/SWCad III компанії Linear Technology [11]. Вибір алгоритму комп'ютерного моделювання джерела зумовлений широким застосуванням даної програми багатьма професійними розробниками електронних пристроїв, у тому числі й зварювального обладнання.

Об'єктом дослідження є комп'ютерна модель силової схеми джерела для імпульсно-дугового зварювання та наплавлення неплавким електродом із номінальним струмом силою 50 А.

Предмет дослідження – визначення впливу сигналів системи керування магнітним шунтом силового трансформатора та параметрів стабілізуючого дроселя на вихідні параметри джерела: величину базового й імпульсного струму, тривалість імпульсу, рівень пульсації випрямленого струму.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для визначення раціональної схеми джерела живлення врахуємо, насамперед, вимоги, що висувуються до джерел живлення для зварювання неплавким електродом постійним струмом [6; 12]. Умовна робоча напруга під час навантаження джерела має відповідати рівнянню $U_p = 10 + 0,04I_d$. Зовнішня характеристика повинна бути спадною з напругою холостого ходу від 50 до 100 В. Таким чином забезпечуються стійкість дугового процесу зварювання чи наплавлення та стабільність підтримання режиму під час коливань довжини дуги, що особливо важливо у випадку малої сили струму.

Зазвичай традиційні джерела живлення являють собою випрямлячі, які складаються із трансформатора та випрямного блока на діодах або тиристорах. Переважну більшість сучасних джерел становлять транзисторні випрямлячі або інверторні джерела живлення [9; 13; 14].

Принципово до складу розроблюваного джерела мають входити такі блоки (рис. 1): 1) силовий транс-

форматор; 2) силовий випрямний блок; 3) стабілізуючий блок; 4) генератор імпульсного струму; 5) осцилятор; 6) блок зниження струму в кінці зварювання (у випадку використання джерела у складі установки для автоматичного зварювання).

Зважаючи на експериментальний зразок джерела, під час конструювання його блоків доцільно передбачити застосування елементів схеми з відносно невеликою вартістю.

Найбільш придатним для створення базового струму є трансформатор типу ТРПШ із керованим шунтом підмагнічення. Для забезпечення зварювальної дуги постійним струмом із мінімальною пульсацією під час розроблення джерела використано однофазну мостову схему випрямлення з ємнісно-індуктивним фільтром на виході.

Схема генератора імпульсного струму обрана на основі аналізу систем живлення з безпосереднім перетворенням енергії електричної мережі та являє собою відоме технічне рішення ключової схемотехніки з використанням транзисторів як комутаторів високих струмів.

Однофазний трансформатор ТРПШ стрижневого типу з магніто-керованим шунтом містить первинну і вторинну обмотки, рознесені на окремі стрижні, завдяки чому збільшується індуктивність розсіювання та формується спадна статична вольт-амперна характеристика. Регулювання робочого струму здійснюється шляхом підмагнічування заліза шунта постійним струмом, унаслідок чого змінюється магнітний потік розсіювання трансформатора.

Складна електромагнітна схема таких трансформаторів зумовила обмеженість інформації щодо конкретної інженерної методики розрахунку їх конструкції, тому під час проектування трансформатора була застосована комбінована методика [13; 15; 16].

Для визначення параметрів та характеристик трансформатора за основу прийняті рекомендації

Рис. 1. Блок-схема силової частини джерела живлення

щодо вибору режиму імпульсного аргонодугового зварювання нержавіючих сталей постійним струмом [7].

Відповідно до умовної осцилограми зварювального струму (рис. 2) для зварювання металу товщиною 0,5...2,5 мм вибрані параметри складають: $I_6 = 6...8$ А; $I_i = 50...60$ А; $t_i = 0,10...0,60$ с; $t_{\Pi} = 0,15...0,50$ с.

Рис. 2. Умовна осцилограма зварювального струму

Номінальна величина зварювального струму трансформатора розраховується за формулою [2]

$$I_{\text{ном}} = \sqrt{\frac{I_i^2 t_i + I_{\Pi}^2 t_{\Pi}}{t_i + t_{\Pi}}} \quad (1)$$

Для вибраних максимальних значень параметрів циклу розрахований за формулою (1) номінальний струм $I_{\text{ном}} = 44,64$ А. З метою забезпечення запасу технологічної надійності роботи силового трансформатора прийнято $I_{\text{ном}} = 50$ А.

На підставі стандартного співвідношення між робочою напругою та напругою холостого ходу трансформатора [13], а також з урахуванням вимог техніки безпеки мінімальна напруга холостого ходу трансформатора складає $U_0 = 70$ В.

Таким чином, головні технічні параметри силового трансформатора прийняті такими: вхідна напруга

$U_1 = 220$ В; напруга холостого ходу $U_0 = 70$ В; номінальний зварювальний струм $I_{\text{ном}} = 50$ А; базовий зварювальний струм $I_{\text{зв}} = 8...12$ А; межі регулювання робочої напруги $U_d = 10...12$ В.

Кількість витків обмоток та площа магнітопроводу трансформатора визначені розрахунком за загальноприйнятою методикою [13] і складають відповідно: первинна обмотка $w_1 = 250$ витків; вторинна обмотка $w_2 = 96$ витків; площа перерізу осердя $S = 22$ см².

Розрахунок параметрів магнітного шунта є складним інженерно-технічним завданням, тому під час проектування, не втрачаючи необхідної для практики точності, скористалися спрощеною методикою розрахунку [17]. Розрахункова потужність шунта $P_{\text{ш}} = 5,7$ кВт·А.

Площа перерізу магнітного шунта, яка залежить від потужності шунта $P_{\text{ш}}$, визначається залежністю

$$S_{\text{ш}} = (4,1...4,8) \cdot \left(\frac{P_{\text{ш}}}{f B_{\text{ш}} K_2^{1,5}} \cdot 1,17 \right)^{\frac{4}{7}}, \quad (2)$$

де $f = 50$ Гц – частота струму живильної мережі; $B_{\text{ш}} = 1,6$ Тл – індукція насичення магнітопроводу електротехнічної сталі типу Э310; $K_2 = 3$ – коефіцієнт, що враховує відношення розрахункової потужності магнітного шунта до повної вихідної потужності трансформатора.

Тоді при $P_{\text{ш}} = 5,7$ кВт·А розрахункова площа згідно із (2) складає $S_{\text{ш}} = 22$ см².

Максимальний струм керування шунтом (струм намагнічування) $I_{\text{к.макс}}$ повинен забезпечувати повне витиснення основного магнітного потоку із шунта, тому він був розрахований за формулою

$$I_{\text{к.макс}} = \frac{B_{\text{ш}} l_{\text{сер}}}{\mu \mu_0 w_{\text{ш}}}, \quad (3)$$

де $l_{\text{сер}} = 0,47$ м – довжина середньої магнітної лінії шунта; $\mu = 700$ – відносна магнітна проникність електротехнічної сталі Э310; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала; $w_{\text{ш}} = 80$ – кількість витків обмотки шунта.

Рис. 3. Електрична схема (а), зовнішній вигляд (б) і конструктивна схема силового трансформатора (в): w_1 – первинна обмотка; w_2 – вторинна обмотка; w_3, w_4 – обмотки керування магнітного шунта; w_5 – обмотка живлення блока зниження зварювального струму; цифрами позначені виводи обмоток

Розрахований за формулою (3) струм $I_{к.мак} = 1,9$ А.

На підставі виконаних розрахунків розроблена конструкція силового трансформатора з магнітно-керованим шунтом (рис. 3) та визначені його головні параметри (табл. 1).

Таблиця 1. Основні розрахункові параметри силового трансформатора з керованим шунтом

Параметр	Трансформатор	Шунт
Потужність, кВА	3,5	1,4
Номинальний струм, А:		
І обмотки	16,8	1,9
ІІ обмотки	50	
шунта		
Кількість витків:		80
І обмотки w_1	300	
ІІ обмотки w_2	96	
шунта $w_3 + w_4$		
Площа перерізу осердя, см ² :	22	22
трансформатора S		
шунта $S_{ш}$		
Обмотковий дріт, мм:	2,24	
І обмотки (ПСДКТ)	2,5×4,5	2×1,06
ІІ обмотки (АПСД)		
шунта (ПСДКТ)		
Габаритні розміри, мм	265×161×240	62×85×42
Маса (орієнтовно), кг	32	2,8

Але визначений аналітичним шляхом максимальний струм повного магнітного насичення шунта не дає уявлення про лінійний відрізок функції керування. Цей недолік можна виправити за допомогою комп'ютерного моделювання.

Програмний продукт LTSpice має вбудовані засоби, які дозволяють моделювати поведінку трансформаторів із розгалуженим осердям, ураховуючи

нелінійність їх роботи, викликану гістерезисом магнітного потоку [18; 19]. Модель магнітного шунта, розроблена Д. Чаном [18], містить основні параметри петлі магнітного гістерезису: H_c – коерцитивна сила; B_r – залишкова індукція; B_s – індукція насичення. Результати моделювання намагнічування осердя шунта зображені на рис. 4.

В основу побудови моделі силового нелінійного трансформатора покладений принцип дуальності (подібності) процесів, які відбуваються в електричних та магнітних колах. Під час моделювання кожний фрагмент реального осердя зображується елементарною нелінійною індуктивністю, яка має параметри осердя (матеріал, його довжину, немагнітний зазор та переріз). Відповідно до принципу дуальності всі паралельні кола реального осердя в моделі зображуються відповідними індуктивностями, з'єднаними послідовно, і навпаки.

Важливим етапом розроблення джерела живлення постійного струму є розрахунок і конструювання випрямного та стабілізуючого блоків, які забезпечують зварювальну дугу постійним струмом у заданому діапазоні пульсацій. Для проектного джерела використано однофазну мостову схему з ємнісно-індуктивним фільтром на виході з коефіцієнтом пульсацій зварювального струму не більше 5% [20]. Завдяки цьому має бути забезпечена стабільність процесу імпульсно-дугового зварювання.

Коефіцієнт пульсацій вихідного блока розраховується як

$$k_n = \frac{2}{3(4_\pi f)^2 LC - 1}, \quad (4)$$

де L і C – індуктивність та ємність фільтра відповідно.

Прийнявши значення $L = 18$ мГн, $C = 2000$ мкФ, отримаємо з формули (4) $k_n = 4,8$ %, що задовольняє встановленій вимозі.

а)

б)

Рис. 4. Моделювання петлі гістерезису магнітного шунта з електротехнічної сталі Э310: а) комп'ютерна модель шунта; б) петля гістерезису

Розроблена комп'ютерна модель силової частини джерела живлення наведена на рис. 5, в якій елементи L4, L5 імітують ідеальний трансформатор, за допомогою якого відбувається передача енергії з первинної обмотки до вторинної; елементи L1, L6 – електромагнітні параметри осердя реального трансформатора; L2 – індуктивність розсіювання рознесених обмоток; L3, L8 – обмотки магнітного шунта. Джерело струму G1 імітує процес насичення магнітного шунта внаслідок проходження керуючих імпульсів.

Елементи схеми, розташовані після силового трансформатора, моделюють роботу випрямного блока, їхні параметри відповідають розрахунковим значенням. Діод D5 – елемент із параметрами, що відповідають властивостям малоамперної дуги постійного струму [15].

Розроблений генератор імпульсів зварювального струму (рис. 6) з'єднується безпосередньо з магнітним шунтом.

Робота генератора базується на принципі дії регульованого мултивібратора, зібраного на біполярних транзисторах VT1 та VT2. Змінними резисторами R2, R3 можна задавати тривалість імпульсу t_i та паузи t_n

між імпульсами (див. рис. 2). Мултивібратор через польові транзистори VT3, VT4 керує відкриттям ключового транзистора VT5, тим самим передаючи керуючий імпульс на обмотки шунта, які в даній схемі замінені резистором R12.

Змінюючи напругу на виході джерела, що живить обмотки шунта через транзистор VT6, можна керувати амплітудою імпульсу або величиною постійного струму під час зварювання в безімпульсному режимі.

Змінним резистором R11 можна задавати величину базового струму в імпульсному режимі. Двопозиційний перемикач SA1 переводить роботу генератора в імпульсний режим або режим роботи на постійному струмі.

Дослідження роботи розробленої електронної моделі джерела живлення в режимі постійного струму показали два важливі моменти. По-перше, підтвердилися результати розрахунків щодо потужності джерела, максимальний робочий струм складає 37 А. По-друге, максимальна індукція насичення магнітного шунта $B_{\text{ш}} = 0,9$ Тл, що значно менше від розрахункової величини $B_{\text{ш}} = 1,6$ Тл. Відповідно, максимальний струм керування $I_{\text{к.макс}} = 1,1$ А також менший від

Рис. 5. Комп'ютерна модель трансформатора ТРПШ та випрямного блока

Рис. 6. Генератор імпульсного струму

Рис. 7. Осцилограми струму на дузі: а) магнітний шунт у стані насичення; б) потік підмагнічування у шунті відсутній

Рис. 8. Осцилограми струму на дузі під час роботи в імпульсному режимі при індуктивності стабілізуючого дроселя: а) 9 мГн; б) 18 мГн

розрахованого $I_{к.мах} = 1,9$ А, тому можна очікувати зниження загальних витрат споживаної потужності трансформатора. Осцилограми роботи трансформатора в режимі постійного струму показані на рис. 7.

Дослідження моделі в режимі генерації керуючих імпульсів (рис. 8) дає можливість оцінити вплив стабілізуючого дроселя вихідного фільтра на роботу джерела.

Як видно з осцилограми на рис. 8,а, індуктивність фільтра 9 мГн забезпечує достатньо малу тривалість спаду імпульсу 0,15 с, але пульсації зварювального струму великі; фільтр з індуктивністю 18 мГн добре згладжує пульсації (див. рис. 8,б), але період спаду імпульсу зростає до 0,25 с. Така поведінка моделі повністю відповідає роботі реального пристрою [21; 22].

Рис. 9. Статична вольт-амперна характеристика джерела: 1 – базовий струм ($I_{ксп} = 0$); 2 – граничний режим ($I_{ксп} = 1,9$ А); 3 – робочий діапазон режимів

Рис. 10. Регульовальна характеристика

Зовнішні статичні вольт-амперні та регульовальні характеристики джерела створювали методом експериментально-комп'ютерного моделювання, тобто як навантаження для даного джерела використовували певний резистор зі змінним опором. Кожному значенню цього опору відповідають певні параметри зварювального струму та напруги. Результати моделювання характеристик наведені на рис. 9 і 10, з яких видно, що, зокрема, характер зміни вихідної напруги джерела в цілому відповідає реальному об'єкту моделювання.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз поведінки комп'ютерної моделі показав, що силова частина джерела живлення в цілому адекватно реагує на сигнали керування, її параметри задовільно збігаються з результатами розрахунків, зокрема: максимальний робочий струм моделі складає 37 А, розрахунковий показник – 40 А; пульсації вихідного струму для моделі – 7,1%, за розрахунками – 4,8%.

Розроблена модель дала можливість більш детально дослідити роботу трансформатора з урахуванням магнітного гістерезису. Аналіз результатів моделювання дозволив знизити максимальний струм

керування із 1,9 А до 1,1 А, що сприятиме поліпшенню енергетичних характеристик джерела.

Також за допомогою моделювання був підтверджений факт впливу величини індуктивності стабілізуючого дроселя вихідного фільтра на зміну швидкості спаду імпульсу зварювального струму.

ВИСНОВКИ

Розроблена конструкція експериментального малоамперного джерела живлення для дугового зварювання та наплавлення неплавким електродом забезпечує роботу джерела в імпульсному й безімпульсному режимах, ґрунтується на перевірених технічних рішеннях і не потребує дорогих комплектуючих деталей.

Створена комп'ютерна модель адекватно відображає електромагнітні процеси, які відбуваються під час зварювання в силовому трансформаторі з магнітно-керуванням шунтом, і дозволяє дослідити роботу джерела під час зміни параметрів системи: керуючих імпульсів, компонентів електричної схеми та величини навантаження.

Розраховані з використанням комп'ютерної моделі статична вольт-амперна та регульовальна характеристики джерела відповідають реальному об'єкту моделювання.

REFERENCES

- [1] Kononenko, V. Ya. (2007). *Svarka v srede zashchitnykh gazov plavyashchimsya i neplavyashchimsya elektrodom* [Welding in shielding gas with a consumable and non-consumable electrode]. Kiev : Nika-Print.
- [2] Makarenko, N. A., Koshevoy, A. D., Granovsky, A. V., & Bogutsky, A. A. (2007). Mikroimpul'snaya svarka tonkolistovogo metala [Micropulse thin sheet metal welding]. *Visnyk Donbaskoyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi* [Bulletin of Donbas State of Machine and Equipment Academy], 2(10), 209–212.
- [3] Retrieved from <https://storgom.ua/argonno-dugovaia-svarka.html>.
- [4] Meister, R. A., Lubnin, M. A., Golovko, S. A., Meister, A. R., & Grigoriev, A. N. (2011). Otsenka ustoychivosti goreniya dugi na malikh tokakh [Estimation of arc stability at malikh currents]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universita imeni akademika M. F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after academician MF Reshetnev], 2, 171–174.
- [5] Krivtsun, I. V., Krikent, I. V., & Demchenko, V. F. (2013). Modelirovaniye dinamicheskikh kharakteristik impul'snoy dugi s tugoplavkim katodom [Simulation of the dynamic characteristics of a pulsed arc with a refractory cathode]. *Avtomat. svarka* [Automat. welding], 7(723), 14–25.
- [6] Krivtsun, I. V., Demchenko, V. F., & Krikent, I. V. (2010). Model' protsessov teplo- masso- i elektroperenosa v anodnoy oblasti i stolbe svarochnoy dugi s tugoplavkim katodom [Model processes of heat, mass and electric transfer in the anodic region and the column of the welding arc with a refractory cathode]. *Avtomat. svarka* [Automat. welding], 6(685), 3–11.
- [7] Meister, R. A., & Meister, A. R. (2012). Osobennosti svarki maloampernoy dugoy standartnymi vol'framovymi yelektrodami [Features of low-ampere arc welding with standard tungsten electrodes]. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 5, 592–600.
- [8] Leskov, G. I. (1970). *Elektricheskaya svarochnaya duga* [Electric welding arc]. Moscow: Mashinostroyeniye [Mechanical Engineering].
- [9] Milyutin, V. S., & Korotkov, V. A. (1999). *Istochniki pitaniya dlya svarki: ucheb. posobiye* [Power sources for welding: tutorial]. Chelyabinsk : Metallurgiya Urala [Metallurgy of the Urals].
- [10] Dragan, S. V. (2002). *Dzherela zhivleniya dlya zvaryvannya plavlenniyam*: Navch. posibnik [Power Supplies for Melting Welding: A Tutorial]. Mykolaiv : UDMTU.
- [11] Krampit, M. A., & Zernin, E. A. (2014). Raschety elektronnykh skhem istochnikov pitaniya dlya svarki v programme LTSpiceIV [Calculations of electronic power supply circuits for welding in the LTSpiceIV program]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'ne problemy sovremennogo mashinostroyeniya»* [Proceedings of the international scientific-practical conference «Actual problems of modern engineering»]. Yurga : UTI TPU.
- [12] GOST R MEK 60974-1–2012. *Oborudovaniye dlya dugovoy svarki. Chast' 1. Istochniki svarochnogo toka*. IEC 60974-4: 2010. Vveden 01.01.2014. [GOST R IEC 60974-1–2012. Arc welding equipment. Part 1. Sources of welding current. IEC 60974-4: 2010. Introduced 01/01/2014].
- [13] Zaks, M. I., Kagansky, B. A., & Pechenin, A. A. (1988). *Transformatory dlya elektrodugovoy svarki* [Transformers for electric arc welding]. Leningrad: Energoatomizdat.
- [14] Volodin, V. Ya. (2010). *LTSpice komp'yuternoye modelirovaniye elektronnykh skhem* [LTSpice computer simulation electronic circuits]. St. Petersburg: BHW-Petersburg.

- [15] Bamdas, A. M., & Shapiro, S. V. (1964). *Transformatory, reguliruyemye podmagnichivaniyem* [Transformers, adjustable bias]. Moscow : Energiya [Energy].
- [16] Bilibin, K. I., Vlasov, A. I., and others (2005). *Konstruktorско-tekhnologicheskoye proyektirovaniye elektronnoy apparatury* [Design and technological design of electronic equipment]. Moscow : Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman [Publishing MSTU. N.E. Bauman].
- [17] Kostikov, V. G., Parfenov, E. M., & Shakhnov, V. A. (2001). *Istochniki elektropitaniya elektronnykh sredstv* [Sources of electronic power]. Moscow : Goryachaya liniya-Telekom [Hotline-Telecom].
- [18] Loos, A. V., Lukutin, A. V., & Saraev, Yu. N. (1998). *Istochniki pitaniya dlya impul'snykh elektrotekhnologicheskikh protsessov* [Power sources for pulse electrotechnological processes]. Tomsk: Izdatel'sko-poligraficheskaya firma TPU [TPU publishing and printing company].
- [19] Meister, R. A., Lubnin, M. A., Golovko, S. A., Meister, A. R., & Grigoriev, A. N. (2011). Otsenka ustoychivosti gorennya dugi na mal'kikh tokakh [Estimation of arc stability at low currents]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. M. F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian State Aerospace University. MF Reshetnev], 2, 171–174.
- [20] Smirnov, V. V. (ed.) (1986). *Oborudovaniye dlya dugovoy svarki: Spravochnoye posobiye* [Arc Welding Equipment: Reference Guide]. Leningrad : Energoatomizdat.
- [21] Volodin, V. Ya. (2011). *Sozdayem sovremennyye svarochnyye apparaty* [We create modern welding machines]. Moscow : DMK.
- [22] Sidorets, V. N., Krivtsun, I. V., Demchenko V. F., Krikent, I. V., & Kovalenko, D. V. (2016). Raschetnoye i eksperimental'noye issledovaniye staticheskikh i dinamicheskikh vol't-ampernykh kharakteristik argonovoy dugi s tugoplavkim katodom [Calculated and experimental study of the static and dynamic current-voltage characteristics of an argon arc with a refractory cathode]. *Avtomat. svarka* [Automat. welding], 2(750), 7–13.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кононенко, В. Я. (2007). *Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом*. Киев : Ника-Принт.
- [2] Макаренко, Н. А., Кошевой, А. Д., Грановский, А. В., & Богущий, А. А. (2007). Микроимпульсная сварка тонколистового металла. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, 2(10), 209–212.
- [3] URL : <https://storgom.ua/argonno-dugovaia-svarka.html>.
- [4] Мейстер, Р. А., Лубнин, М. А., Головки, С. А., Мейстер, А. Р., & Григорьев, А. Н. (2011). Оценка устойчивости горения дуги на малых токах. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева*, 2, 171–174.
- [5] Кривцун, И. В., Крикент, И. В., & Демченко, В. Ф. (2013). Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом. *Автомат. сварка*, 7(723), 14–25.
- [6] Кривцун, И. В., Демченко, В. Ф., & Крикент, И. В. (2010). Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной области и столбесварочной дуги с тугоплавким катодом. *Автомат. сварка*, 6(685), 3–11.
- [7] Мейстер, Р. А., & Мейстер, А. Р. (2012). Особенности сварки малоамперной дугой стандартными вольфрамовыми электродами. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 5, 592–600.
- [8] Лесков, Г. И. (1970). *Электрическая сварочная дуга*. Москва : Машиностроение.
- [9] Милютин, В. С., & Коротков, В. А. (1999). *Источники питания для сварки: учеб. пособие*. Челябинск : Металлургия Урала.
- [10] Драган, С. В. (2002). *Джерела живлення для зварювання плавленням: навч. посібник*. Миколаїв : УДМТУ.
- [11] Краппит, М. А., & Зернин, Е. А. (2014). Расчеты электронных схем источников питания для сварки в программе LTSpiceIV. *Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного машиностроения»*. Юрга : ЮТИ ТПУ.
- [12] *ГОСТ Р МЭК 60974-1–2012. Оборудование для дуговой сварки. Часть 1. Источники сварочного тока. IEC 60974-4: 2010*. Введен 01.01.2014.
- [13] Закс, М. И., Каганский, Б. А., & Печенин, А. А. (1988). *Трансформаторы для электродуговой сварки*. Ленинград : Энергоатомиздат.
- [14] Володин, В. Я. (2010). *LTSpice компьютерное моделирование электронных схем*. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург.
- [15] Бамдас, А. М., & Шапиро, С. В. (1964). Трансформаторы, регулируемые подмагничиванием. Москва : Энергия.
- [16] Билибин, К. И., Власов, А. И. и др. (2005). *Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры*. Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
- [17] Костиков, В. Г., Парфенов, Е. М., & Шахнов, В. А. (2001). *Источники электропитания электронных средств*. Москва : Горячая линия-Телеком.
- [18] Лоос, А. В., Лукутин, А. В., & Сараев, Ю. Н. (1998). *Источники питания для импульсных электротехнологических процессов*. Томск : Издательско-полиграфическая фирма ТПУ.
- [19] Мейстер, Р. А., Лубнин, М. А., Головки, С. А., Мейстер, А. Р., & Григорьев, А. Н. (2011). Оценка устойчивости горения дуги на малых токах. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М. Ф. Решетнева*, 2, 171–174.
- [20] Смирнов, В. В. (ред.) (1986). *Оборудование для дуговой сварки: справочное пособие*. Ленинград : Энергоатомиздат.
- [21] Володин, В. Я. (2011). *Создаем современные сварочные аппараты*. Москва : ДМК.
- [22] Сидорев, В. Н., Кривцун, И. В., Демченко В. Ф., Крикент, И. В., & Коваленко, Д. В. (2016). Расчетное и экспериментальное исследование статических и динамических вольт-амперных характеристик аргоновой дуги с тугоплавким катодом. *Автомат. сварка*, 2(750), 7–13.