

Анатолій Жерносеков¹, Володимир Халіков², Олександр Шатан³, Віталій Приходько⁴

¹ доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
завідувач відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

² доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший викладач кафедри електричних мереж та систем
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: xvavlad@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

³ науковий співробітник, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

⁴ провідний інженер відділу імпульсних процесів і технологій дугового зварювання

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: cool_vetal@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2544-2901>

ІМПУЛЬСНІ СТАБІЛІЗАТОРИ ГОРІННЯ ДУГИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ЗМІННИМ СТРУМОМ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ

У статті розглянуто розроблення пристроїв стабілізації зварювальної дуги змінного струму, що надають якісно інший рівень функціональності зварювальним трансформаторам промислової частоти. Показано, що попри стрімке поширення та використання інверторних джерел постійного струму для дугового зварювання металів, зварювання змінним струмом, із застосуванням простих і невибагливих зварювальних трансформаторів, які працюють на частоті струму промислової мережі живлення продовжує бути актуальним. Стосовно до ручного дугового зварювання покритими електродами та неплавким електродом на змінному струмі промислової частоти, проблема підвищення стійкості горіння дуги вирішується завдяки використанню імпульсних стабілізаторів горіння дуги. Вибір полярності імпульсів істотно впливає на параметри стабілізаційного пристрою та процесу зварювання змінним струмом. Проведені дослідження впливу полярності імпульсу на параметри самих імпульсних стабілізаторів горіння дуги. Розглянуто схемотехнічну реалізацію пристроїв стабілізації із застосування стабілізаційних імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги.

Ключові слова: змінний струм; промислова частота; джерело живлення; трансформатор; зварювальна дуга; імпульсні стабілізатори; параметри імпульсу.

Рис.: 7. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Незважаючи на стрімке поширення та використання інверторних джерел постійного струму для дугового зварювання металів, зварювання змінним струмом, із застосуванням простих і невибагливих зварювальних трансформаторів, які працюють на частоті струму промислової мережі живлення, витримало перевірку часом і продовжує бути актуальним.

Перевагою інверторних джерел є порівняно невеликі маса та габарити, що ґрунтуються на роботі понижуючого трансформатора на підвищеній частоті в декілька десятків кГц. Загалом це надає можливості належної мобільності у процесі виконання робіт, але вимагає відповідних культур виробництва, обслуговування, інфраструктури ремонту інверторних джерел струму і т. ін. Також це пов'язано з використанням порівняно складних високотехнологічних систем управління та регулювання відповідних силових напівпровідникових ключових транзисторів. Причому здебільшого належні вольт-амперні характеристики таких джерел струму одержують за рахунок відповідного регулювання рівнів зворотних зав'язків по струму дуги та напруги на ній, а не за рахунок параметрів силової частини інвертора, які б обмежували можливі струмові перевантаження, що виникають у процесі зварювання.

Водночас зварювальні трансформатори, що працюють на промисловій частоті, і через це мають відносно значну масу, за своїм устроєм простіші й тому вимагають мінімального обслуговування та поточного ремонту. У них належні вольт-амперні характеристики одержують за рахунок відповідного конструктивного виконання магнітопроводу та розміщення обмоток. Такі зварювальні установки є не стільки електронними, скільки електротехнічними пристроями. Вони можуть працювати й на відкритих майданчиках та не критичні до несприятливих умов: запиленості, незначних опадів, ускладненому тепловому режиму роботи тощо.

Постановка проблеми. Дугове зварювання змінним струмом має як свої недоліки, так і переваги. За своїм технологічним впливом дуга змінного струму подібна до модуляції струму дуги постійного струму з частотою 50 Гц. Тобто структура металу зварного шва виявляється більш дрібнозернистою, а якість зварного шва краще, ніж при зварюванні постійним струмом покритими електродами. Крім того, треба зазначити відсутність магнітного дугтя при зварюванні змінним струмом, що є досить актуальним при зварюванні кореневих швів, а також труб великого діаметра. При зварюванні змінним струмом алюмінію та його сплавів неплавким електродом в інертних газах і їх сумішах досягається очищення поверхні виробів від окисних плівок. Тому джерела для зварювання змінним струмом залишаються ефективним інструментом для розробки нових технологій зварювання [1; 2].

До недоліків зварювання змінним струмом промислової частоти (50-60 Гц) належать: низька стійкість горіння дуги, зумовлена періодичними її згасаннями; у деяких випадках підвищене розбризкування металу й насичення його газами, яке також пов'язане з погіршенням стійкості горіння дуги. Проте цьому можна завадити пристроями стабілізації горіння дуги з використанням достатньо малокошторисних засобів промислової електроніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема підвищення стійкості горіння дуги на змінному струмі промислової частоти вирішується завдяки використанню імпульсних стабілізаторів горіння дуги (ІСГД) [3-7]. Такого роду пристрої протягом років розроблялися, їх принципи оприлюднювалися та популяризувалися ІЄЗ ім. Є. О. Патона [8; 9]. З кожним наступним етапом розвитку елементної бази електронних компонентів відповідним чином модифікувалися конструктивні реалізації пристроїв ІСГД і, таким чином, використання сучасних компонентів їх схемотехнічно спростило та здешевило ці пристрої.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Принцип роботи ІСГД пояснюють епюри струму I_D дуги та напруги U_D на ній із накладеними імпульсами U_i стабілізації горіння дуги, що наведені на рис. 1. Є декілька варіантів подання стабілізаційних імпульсів, серед основних є згідно спрямований та зустрічно спрямований (рис. 2).

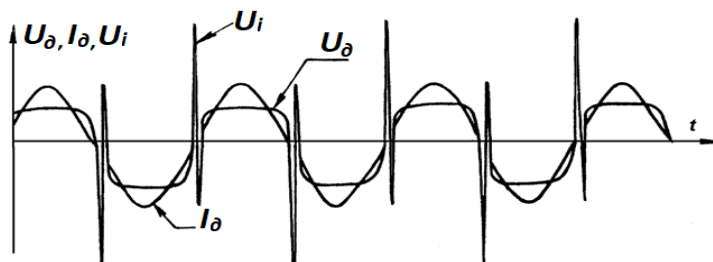


Рис. 1. Форми струму I_D дуги та напруги U_D на ній та імпульси U_i стабілізації горіння дуги

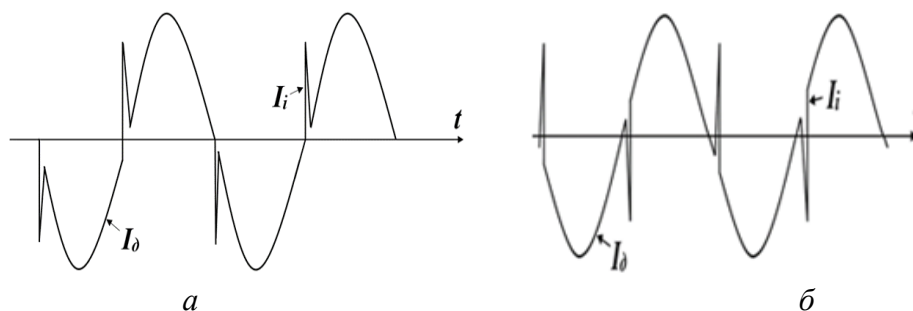


Рис. 2. Епюри зварювального струму та стабілізаційних імпульсів: а – згідно спрямований; б – зустрічно спрямований

Вибір полярності імпульсів істотно впливає на параметри стабілізаційного пристрою та процесу зварювання змінним струмом промислової частоти. В ІЄЗ ім. Є. О. Патона проведено дослідження щодо визначення впливу згідно та зустрічно спрямованого імпульсу на процес зварювання.

Метою дослідження є підвищення енергоефективності зварювальних джерел живлення змінного струму промислової частоти за рахунок розробки на сучасному рівні пристроїв стабілізації дуги.

Виклад основного матеріалу. Проведені дослідження впливу полярності стабілізаційного імпульсу на параметри пристроїв ІСГД. На рис. 3, 4 показано відповідно залежності тривалості стабілізаційного імпульсу (τ_i), та індуктивності (L) від зварювальних струмів (I_d) при згідно спрямованих та зустрічно спрямованих стабілізаційних імпульсах та різних напругах холостого ходу (U_{xx}). З рис. 3 видно, що при застосуванні в ІСГД згідно спрямованого імпульсу, тільки трансформатор з $U_{xx} = 80$ В може забезпечити регулювання зварювальних струмів від 75 до 600 А при прийнятних значеннях інших параметрів. Проте висока напруга U_{xx} призводить до підвищених габаритів та собівартості трансформатора.

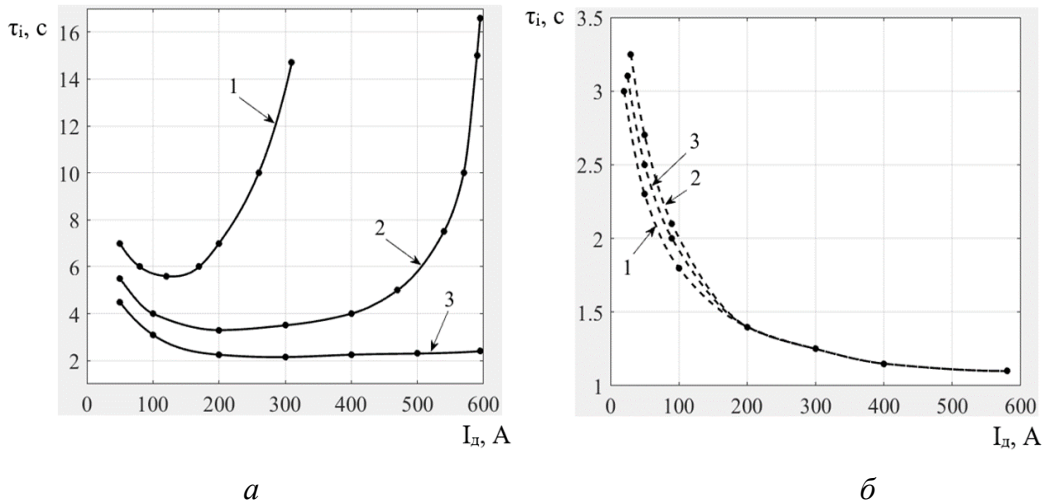


Рис. 3. Залежності тривалості стабілізаційного імпульсу ($\tau_i \times 10^{-4}, c$) від значення зварювального струму I_d (1- $U_{xx} = 45$ В; 2- $U_{xx} = 60$ В; 3- $U_{xx} = 80$ В):
 а – згідно спрямований імпульс – суцільна крива;
 б – зустрічно спрямований імпульс – штрихова крива

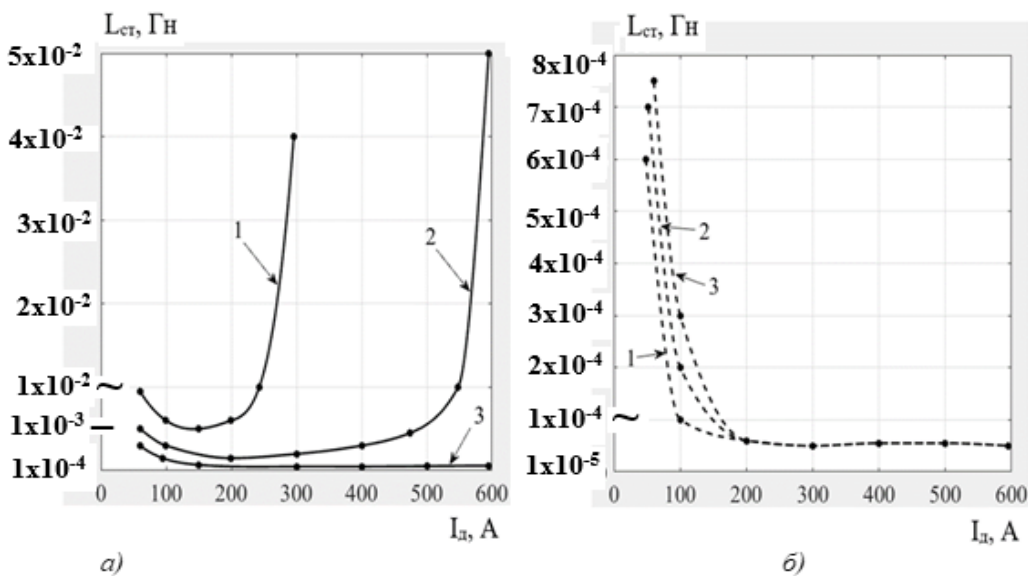
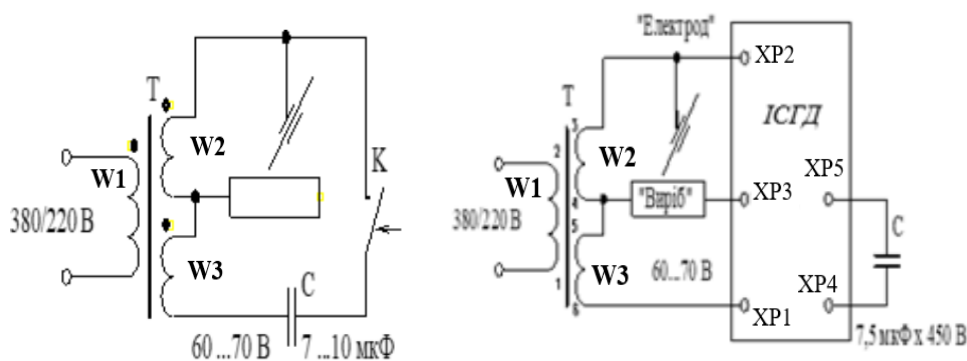


Рис. 4. Залежності індуктивності від значення зварювального струму (1- $U_{xx} = 45$ В; 2- $U_{xx} = 60$ В; 3- $U_{xx} = 80$ В):
 а – згідно спрямований імпульс – суцільна крива;
 б – зустрічно спрямований імпульс – штрихова крива

Аналіз кривих показує, що робота устаткування зі згідно спрямованим імпульсом стабілізації дуги ускладнена в діапазоні малих (до 100 А) і великих (понад 250 А) зварювальних струмів. Зі зустрічно спрямованим імпульсом регулювання досягається в діапазоні 50...600 А вже при $U_{xx} = 45$ В. На малих значеннях зварювальних струмів збільшення $I_{ст}$ здійснюється за рахунок збільшення індуктивності самого трансформатора в цьому діапазоні. Застосування стабілізаційних імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги, переважніше.

При цьому можливо також одержати мінімальні масогабаритні показники джерела живлення та досягти високої електромагнітної сумісності за рахунок мінімального рівня вищих гармонік, що генерується в живлячу мережу [7].

Розглянемо схемотехнічну реалізацію ІСГД із застосування стабілізаційних імпульсів, полярність яких протилежна полярності струму дуги. Щоб одержати імпульси, достатньої потужності для підтримання активності дуги в інтервалі проміжку часу, близькому до спаду її струму до нуля, необхідно мати відповідне джерело струму (рис. 5). Це реалізується виконанням додаткової обмотки **W3** на магнітопроводі зварювального трансформатора **T**, приблизно тієї ж напруги, що і його основна вторинна обмотка **W2** та в частині фазування, увімкненій з останньою в тому ж напрямку. Напруга обмотки **W3** повинна становити близько 60 ... 70 В при потужності, що відбирається у 130 ... 160 ВА. Як альтернатива може бути взято й окремий мережевий трансформатор на 50 Гц із відповідними вказаними напругою вторинної обмотки та потужністю. Імпульси, що стабілізують горіння дуги із відповідними параметрами U_i та I_i , одержують короткочасним, на частку півперіоду, замиканням ключа **K** після переходу напругою дуги нульового рівня. Якщо як ключ використовувати зустрічно-паралельно включені тиристори, то, використовуючи властивість їх комутації, можна обмежитися тільки вибором моменту його увімкнення. Параметри та форма стабілізаційних імпульсів визначаються характеристиками контуру з обмоток **W2**, **W3**, конденсатора **C**, ключа **K**, напруги відповідних обмоток та струму дуги.



а)

б)

Рис. 5. Схема генерації імпульсів стабілізації горіння дуги (а) та схема з'єднання ІСГД зі зварювальним трансформатором (б)

Розглянемо один із варіантів реалізації ІСГД на прикладі розробленої принципової схеми (рис. 6).

Основою управляючої частини стабілізатора є компаратор, виконаний на операційному підсилювачі DA1:А, який генерує імпульси у формі меандра, фронти якого майже збігаються з переходом через нуль напруги на електроді. Конденсатори С2 та С3 разом із відповідними резисторами забезпечують належну завадостійкість та деякий зсув фронтів компаратора відносно напруги на **W2**, для забезпечення підвищеного значення напруги на електроді при холостому ході установки. У разі потреби, шляхом замикання - розмикання контактів PS2 може виконуватися деяка зміна постійної часу цього RC-фільтра. В подальшому підсилені по потужності, за допомоги комплементарної пари транзисторів VT4, VT5, вихідні імпульси

DA1:A, через конденсатор С6 та трансформатор Т1, диференціюються. Одержані в результаті цього відносно вузькі імпульси, які збігаються з тим чи іншим фронтом меандра й використовуються як вмикачі для відповідного тиристора (VS1,VS2). Останні у своєму зустрічно-паралельному з'єднанні й використовуються як ключ К (див. рис. 5, а).

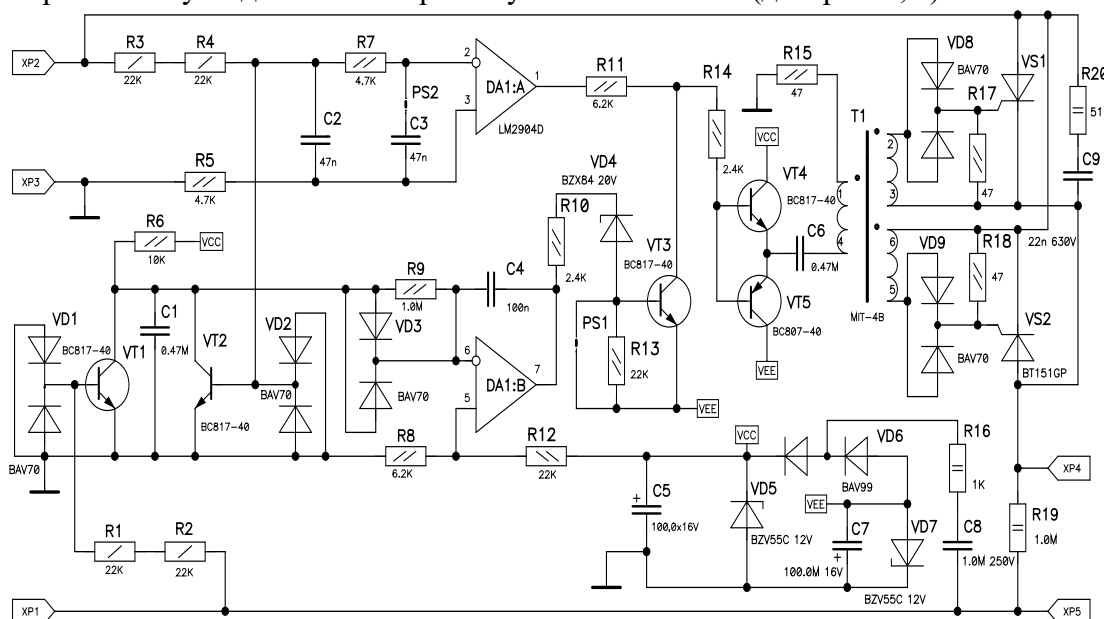
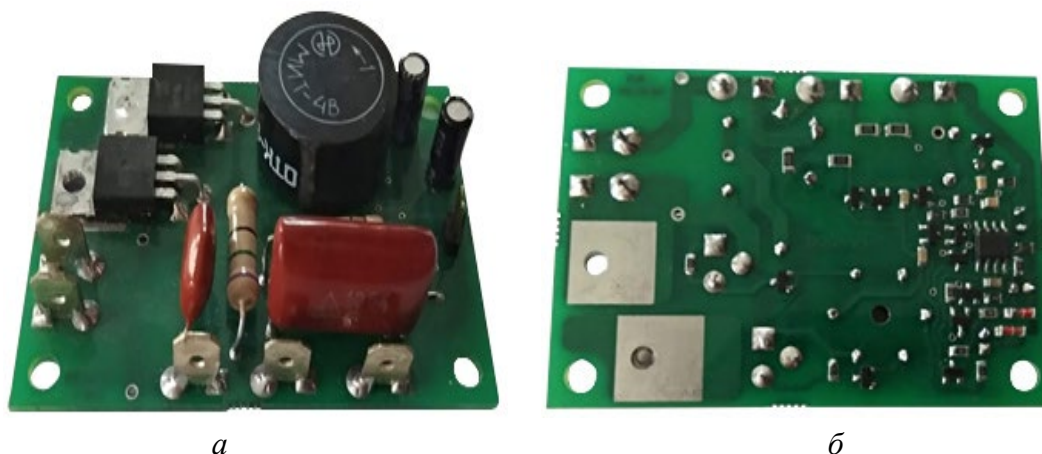


Рис. 6. Принципова схема одного із варіантів ІСГД

Функціонування стабілізатора забезпечує відносно малопотужний двополосний блок живлення $\pm 12\text{ V}$ (VCC, VEE), який зібраний на основі VD5,VD6,VD7 та пов'язаних із ними компонентів.

Вузол виконаний на основі VT1, VT2, VT3 та DA1:B реалізує функцію блокування ІСГД при тривалості холостого ходу установки більше ніж кілька секунд. Проте ця функція, якщо буде потреба, може блокуватися замиканням винесених контактів (джампера) PS1.

На рис. 7 показано конструктивну реалізацію такого типу ІСГД. Його монтаж виконано на відносно малорозмірній склотекстолітовій друкованій платі розміром 69,0×48,0 мм. Цьому сприяє використання так званих SMD-компонентів із використанням технології їх поверхневого монтажу (рис. 7, б). Як видно із рис. 7, а, для кожного із тиристорів, які використовуються як силовий ключ, не передбачено ніякого тепловідводу, через достатність розсіювання тепла власним корпусом. Поруч із тиристорами розміщено дві клеми для приєднання зовнішнього конденсатора С (рис. 7, б) контуру генерації стабілізаційних імпульсів.



а

б

Рис. 7. Конструктивна реалізація стабілізатора:

а – зовнішній вигляд; б – технології поверхневого монтажу SMD-компонентів

Висновки. Досвід використання розроблених ІСГД дозволяє зробити висновок, що вони забезпечують достатньо високу стабільність горіння дуги від зварювального трансформатора змінним струмом при: ручному дуговому зварюванні низьколегованих конструкційних сталей електродами для змінного та постійного струму типу МР-3, АНО-4, УОНІ-13/55; дуговому зварюванні нержавіючих та інших спеціальних сталей плавкими електродами типу ОЗЛ-8, ОЗЛ-26, ЦЛ-39; дуговому зварюванні чавуну плавкими електродами типу ЦЧ-4; при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом нержавіючих сталей, алюмінію і його сплавів при контактному способі початкового запалювання дуги.

Список використаних джерел

1. Разработка высокоэффективных способов дуговой сварки и их применение / И. Кидзи, К. Кобаяси, Д. Исии, Х. Ямаока // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10-11. – С. 59-63.
2. Коротинський, О. Є. Високоєфективні джерела для дугового зварювання на основі ємнісних накопичувачів електричної енергії / О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк, І. В. Вертецька // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 3. – С. 47-53. – DOI: <http://doi.org/10.37434/as2021.03.08>.
3. Патент України № 109334 Пристрій для збудження та стабілізації процесу горіння дуги змінного струму МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01) / Н. М. Махлін, О. Є. Коротинський, М. І. Скопюк ; заявл. № а2014 00292. – 10.08.2015, бюл. № 15.
4. Патент Україна № 114990 Пристрій стабілізації дуги змінного струму МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01) / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, Заяв. № а2016 06797. – 28.08.2017, бюл. № 16.
5. Патент Україна №114998 Стабілізатор дуги змінного струму МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01) / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, Заяв. № а2016 08173. – 28.08.2017, бюл. № 16.
6. Махлин, Н. М. Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методы расчета Ч. 2. / Н. М. Махлин, А. Е. Коротынский // Автоматическая сварка. – 2015. – № 7. – С. 28-40.
7. Бурлака В. В. Стабілізатор дуги змінного струму для зварювальних трансформаторів / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенна // Автоматическая сварка. – 2018. – № 3. – С. 48-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.09>.
8. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги / Б. Е. Патон, И. И. Заруба, В. В. Дименко, А. Ф. Шатан. – Київ : Екотехнологія, 2007. – 248 с.
9. Вищі гармоніки струму в трансформаторних джерелах живлення з імпульсними пристроями стабілізації горіння зварювальної дуги / А. М. Жерносеков, О. А. Андріанов, С. В. Римар, О. Ф. Шатан, А. О. Муха // Автоматичне зварювання. – 2022. – № 10. – С. 35-41. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.10.05>.

References

1. Kidzi, I., Kobayasi, K., Isiyi, D., & Yamaoka, Kh. (2003). Rozrobka vysokoefektyvnykh sposobiv duhovoho zvaryuvannya ta yikh zastosuvannya [Development of highly effective methods of arc welding and their application]. *Avtomatychne zvariuvannya – Automatic welding*, 10-11, 59-63.
2. Korotynskyy, O.E., Skopyuk, M.I., & Vertetska I.V. (2021). Vysokoefektyvni dzherela dlia dovhovichnoho zvariuvannya na osnovi yemnisnykh nakopychuvachiv elektrychnoi enerhii [Highly efficient sources for arc welding based on capacitive storage of electric energy]. *Avtomatychne zvariuvannya – Automatic welding*, 3, 47-53. <http://doi.org/10.37434/as2021.03.08>.
3. Makhlin, N.M., Korotynskyy, O.E., & Skopyuk, M.I. (2015). Prystriy dlya zbudzhennya ta stabilizatsiyi protsesu horinnya duhy zminnoho strumu [Device for excitation and stabilization of the AC arc burning process]. *Ukrayina, Patent № 109334 (10.08.2015, byul. № 15), МПК В 23 К 9/067 (2006.01), В 23 К 9/073 (2006.01)*.
4. Burlaka, V.V., & Hulakov, S.V. (2017). Prystriy stabilizatsiyi duhy zminnoho strumu [Device for stabilizing an alternating current arc]. *Ukraina, Patent № 114990 (28.08.2017, byul. №16), МПК V 23 К 9/067 (2006.01), V 23 К 9/073 (2006.01)*.
5. Burlaka, V.V., & Hulakov, S.V. (2017). Stabilizator duhy zminnoho strumu [Patent Ukraine No. 114998 Stabilizer of the arc of the strum]. *Ukraina, Patent №114998 (28.08.2017, byul. № 16), МПК V 23 К 9/067 (2006.01), V 23 К 9/073 (2006.01)*.

6. Makhlin, N.M., & Korotynskiy, A.Ye. (2015). Asinkhronnyye vozбудiteli i stabilizatory dugi: analiz i metody rascheta. Ch. 2 [Asynchronous exciters and arc stabilizers: analysis and calculation methods Part 2]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 7, 28-40.

7. Burlaka, V.V., Hulakov, S.V., & Pidnebenna, S.K. (2018). Stabilizator duhy zminnoho strumu dlya zvaryuvalnykh transformatoriv [Stabilizer of an alternating current arc for welding transformers]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 3, 48-51. <http://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.09>.

8. Paton, B.Ye., Zaruba, I.I., Dimenko, V.V., & Shatan, A.F. (2007). *Svarochnyye istochniki pitaniia s impulsnoi stabilizatsiei goreniia dugi [Welding sources of power with impulse stabilization of arc burning]*. Ekotekhnologiya.

9. Zhernosekov, O.M., Andrianov, O.O., Rimar S.V., Shatan, O.F., & Mukha, O.O. (2022). Vyshchi harmoniky strumu u transformatornykh dzherelakh zhyvlennia z impulsnyimi prystroyamy stabilizatsiyi horinnya zvaryuvalnoi duhy [Higher current harmonics in transformer power sources with impulse devices for stabilizing welding arc combustion]. *Avtomatychne zvariuvannia – Automatic welding*, 10, 35-41. <https://doi.org/10.37434/as2022.10.05>.

Отримано 22.06.23

UDC 621.314.2: 621.791.03

Anatolii Zhernosekov¹, Volodymyr Khalikov², Oleksandr Shatan³, Vitalii Prykhodko⁴

¹Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Pulsed Processes and Technology of Arc Welding Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zhernosekov@paton.kiev.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

²Doctor of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Senior Lecturer of Electrical Networks and Systems Department, National technical University of Ukraine «Igor Sikorsky KPI» (Kyiv, Ukraine).

E-mail: xvavlad@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

³Scientific Researcher, Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shatanaf57@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6553-7421>

⁴Lead Engineer, Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: cool_vetal@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2544-2901>

IMPULSE COMBUSTION STABILIZERS INDUSTRIAL FREQUENCY AC WELDING ARCS

The work deals with the development of AC welding arc stabilization devices that provide a qualitatively different level of functionality to industrial frequency welding transformers. It is shown that despite the rapid spread and use of inverter sources of direct current for arc welding of metals, welding with alternating current, using simple and unpretentious welding transformers, which work at the frequency of the current of the industrial power supply network, continues to be relevant. With regard to manual arc welding with coated electrodes and a non-fusible electrode on alternating current of industrial frequency, the problem of increasing the stability of arc burning is solved thanks to the use of impulse stabilizers of arc burning. The purpose of the study is to increase the energy efficiency of industrial frequency alternating current welding power sources due to the development of arc stabilization devices at the modern level.

The choice of the polarity of the pulses significantly affects the parameters of the stabilizing device and the AC welding process. Studies of the influence of the pulse polarity on the parameters of the pulse arc stabilizers themselves have been carried out. The schematic implementation of stabilization devices using stabilizing pulses, the polarity of which is opposite to the polarity of the arc current, is considered.

The experience of using the developed stabilizers allows us to conclude that they provide sufficiently high stability of arc burning from an alternating current welding transformer during manual arc welding of low-alloy structural steels covered with electrodes, arc welding of stainless and other special steels, arc welding of cast iron, during non-fusible argon arc welding electrode of stainless steels, aluminum and its alloys with the contact method of initial ignition of the arc.

Key words: alternating current; industrial frequency; power source; transformer; welding arc; pulse stabilizers; pulse parameters.

Fig.: 7. References: 9.