

# ВИКОРИСТАННЯ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ БАГАТОПОСТОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

О.С. Коротинський, М.І. Скопюк

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

Проведено аналіз структур багатопостових джерел для дугового зварювання, виконаних на основі ємнісних накопичувачів енергії. Показана їх перспективність для створення високоефективних зварювально-технологічних систем. Розглянуто структури централізованих систем живлення зварювальних постів, в яких використовується один потужний накопичувач електричної енергії. Більш гнучкою є децентралізована система живлення постів, коли на кожному робочому місці встановлюється власний накопичувач електричної енергії. Її перевага полягає в тому, що можна використовувати стандартний випрямляч типу ВДГМ. Для суднобудування може використовуватися комбінована система живлення, в якій реалізовані позитивні якості обох систем живлення і яка забезпечує високу якість і енергоефективність процесу зварювання. Як приклад використання багатопостових джерел живлення приведена схема, яка побудована на основі методу переносу заряду. Бібліогр. 13, рис. 6.

*Ключові слова:* імпульсно-дугове зварювання, ємнісний накопичувач енергії, конденсатор з подвійним електричним шаром, метод переносу заряду, багатопостові зварювальні системи, конвертор понижуючого типу

Відомо, що на великих підприємствах машинобудівної промисловості широко застосовуються багатопостові зварювальні системи (БЗС), особливо це стосується суднобудування. Еволюція цих систем йшла шляхом підвищення їх енергоефективності. На першому етапі це були роботи, пов'язані з виключенням з їх складу баластних реостатів, застосування яких зменшувало к.к.д. БЗС в ряді випадків до 40 %. Розробки цього напрямку базувалися, головним чином, на створенні різних типів конверторів [1, 2], які суттєво скорочували втрати електроенергії і доводили к.к.д. до 80...85 %.

Використання БЗС при зварюванні надає користувачеві ряд переваг, таких як:

- скорочення енергоспоживання в два-три рази в порівнянні зі зварюванням однопостовими зварювальними пристроями [1];
- зниження витрат від холостого ходу [3];
- зменшення витрат на придбання обладнання [1];
- підвищення безпеки праці при проведенні зварювальних робіт, оскільки енергія підводиться до зварювального поста при напрузі 60...70 В (при однопостовому зварюванні 220 або 380 В) [2]. БЗС на сучасному етапі вирішується застосуванням напівпровідникових понижуючих перетворювачів [3, 4], тому забезпечення стабільної роботи зварювальних постів по підтримці заданої точності технологічних режимів зварювання в умовах зовнішніх впливів вимагає більш докладного розгляду.

Є відомим спосіб керування БЗС, згідно якого, для стабілізації рівня напруги на низьковольтних шинопроводах використовують одне, стабілізо-

ване за рівнем вихідної напруги, джерело зварювального струму і кілька нестабілізованих джерел. Всі зазначені джерела підключені до промислової мережі трифазного струму (380 В, 50 Гц), їх виходи підключені постійно до ділянок низьковольтного шинопровода. Напруга холостого ходу на шинопроводі створюється цим, стабілізованим за рівнем вихідної напруги, сумарним джерелом. При збільшенні струмового навантаження на зварювальній дузі падіння напруги на шинопроводі компенсується шляхом додаткового підключення до шинопровода нестабілізованих джерел живлення. Якщо струм в загальному шинопроводі зменшується, відключення додаткових нестабілізованих джерел здійснюється в зворотньому порядку [5, 6]. Таким чином, стабілізація напруги на загальному шинопроводі досягається ціною збільшення масогабаритних показників зварювального устаткування без підтримки заданої точності технологічних режимів зварювання, їх програмування, а також, за відсутності можливостей по реалізації процесів зварювання модульованим струмом.

Останнім часом спостерігається все більше і більше спроб використати для стабілізації енергетичних потоків в зварювальних процесах різні накопичувачі електричної енергії. Зокрема, є відомими пристрої для перетворення енергії електрохімічних накопичувачів в енергію горіння електрозварювальної дуги [7, 8] і способи управління енергетичними потоками з метою їх стабілізації в БЗС з використанням електрофізичних накопичувачів [9].

Однак слід зазначити, що БЗС мають певні недоліки, пов'язані із залежністю зварювального струму від коливань напруги і зміни довжини

дугового проміжку; взаємним впливом зварювальних постів один на одного при їх одночасній роботі, відсутністю можливостей підтримки заданої точності технологічних режимів зварювання та їх програмування; а також з відсутністю можливості зварювання модульованим струмом.

Застосування високочастотних перетворювачів в якості зварювальних постів, в яких стабілізація технологічних режимів здійснюється ШІМ-регуляторами, не забезпечує повною мірою неперервність зварювального струму і напруги на виході пристрою.

Істотним недоліком таких БЗС, побудованих на використанні конверторів, є погіршення параметрів електромагнітної сумісності (ЕМС). А це призводить до значних витрат по електроенергії підприємств, зайнятих виробництвом зварних конструкцій.

У зв'язку з цим метою даної роботи є розвиток нових підходів у створенні БЗС, побудованих як це буде показано далі, на основі ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) БЗС які, виконані на основі ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ), можуть використовувати схеми відповідно трьом топологічним структурам. На рис. 1, *а* показана структура з централізованим ЄНЕ [9]. Децентралізована структура БЗС, де на кожному посту встановлено окремий накопичувач, наведена на рис. 1, *б*. І нарешті, комбінована схема живлення постів пока-

зана на рис. 2 [10]. Тут використовуються загальні ЄНЕ, а на кожному посту встановлюються додаткові накопичувачі. Ця структура БЗС забезпечує максимальну стабільність енергії постів, а також високу якість формування зварних з'єднань.

До складу централізованої системи живлення постів (рис. 1, *а*) входить керований випрямляч (КВ), датчик контролю напруги (ДН) на шинопроводі, до нього підключений ємнісний накопичувач енергії, основне призначення якого формування стабільної напруги живлення постів. Стабілізація напруги живлення в даному випадку здійснюється блоком керування (БК), який підключений до виходу ДН.

Децентралізована структура (рис. 1, *б*) може використовувати звичайний випрямляч (В) без особливо жорстких вимог до стабільності вихідної напруги. Однак за це доводиться платити ускладненням обладнання постів, на яких додатково встановлюються зарядні пристрої (ЗП) і постові накопичувачі ЄНЕ/п. Її переважно використовувати при створенні малопостових систем (2 – 4 поста), наприклад, для створення автономних польових зварювально-технологічних комплексів для зварювання трубопроводів.

Найкращою є комбінована система живлення постів (рис. 2), в якій з'єднані позитивні якості описаних вище систем багатопостового зварювання [10]. Тут є спільний накопичувач, електрична ємність

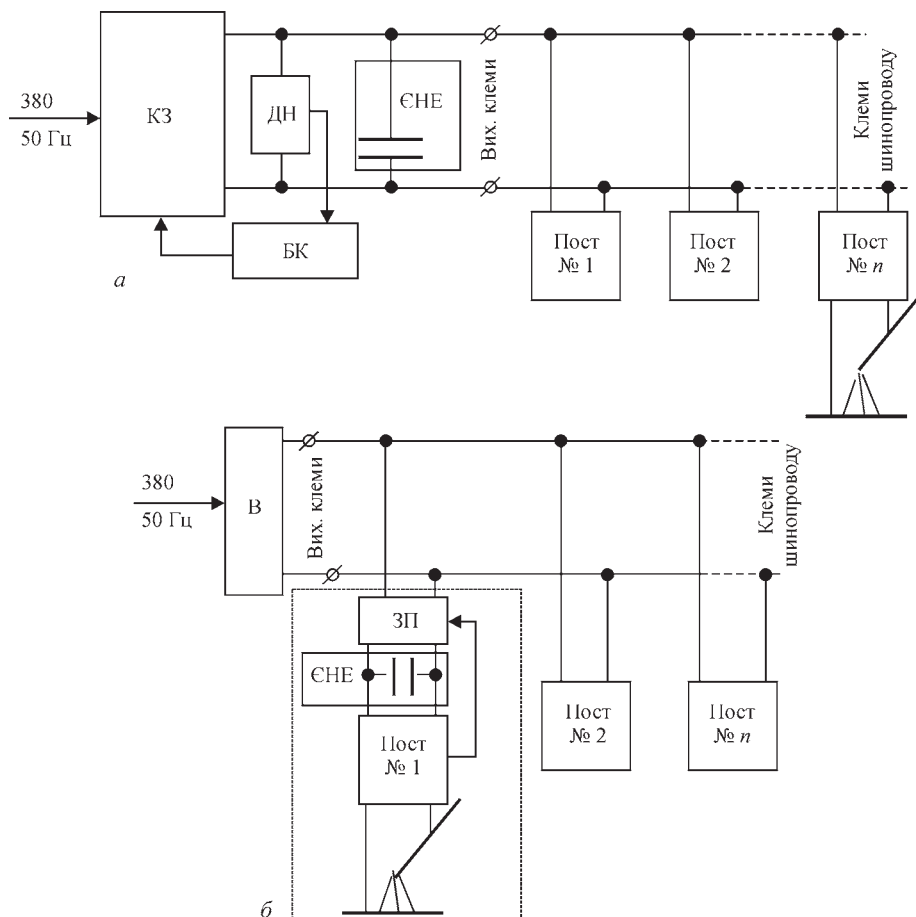


Рис. 1. Структури багатопостових зварювальних систем з ємнісними накопичувачами: *а* – централізована; *б* – децентралізована

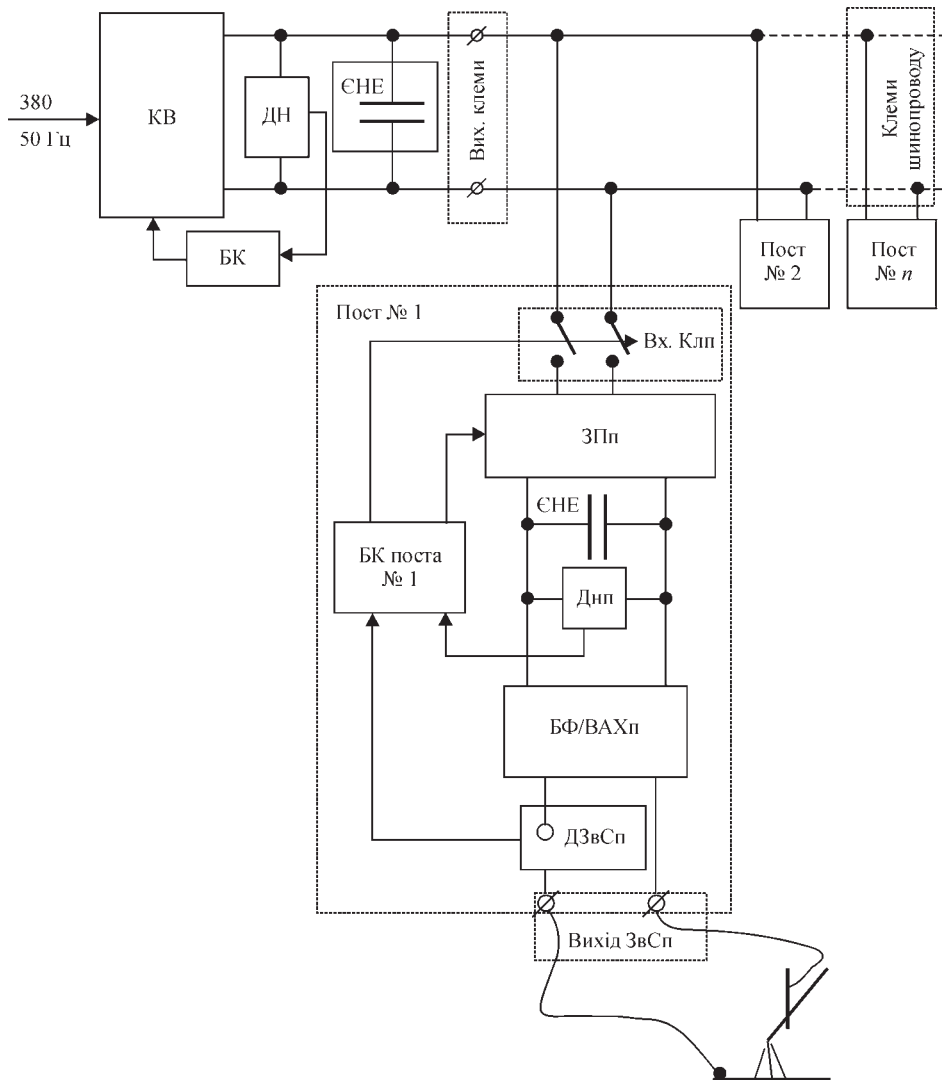


Рис. 2. Багатопостова зварювальна система з комбінованою схемою живлення постів

якого значно нижче в порівнянні з централізованою системою живлення, а на кожному посту встановлений індивідуальний накопичувач СНЕ/п, функція якого додаткова стабілізація живлячої напруги. Опис роботи цієї структури БЗС наводимо нижче.

Напруга промислової мережі живлення (380 В, 50 Гц) понижується до безпечного рівня силовим понижуючим трансформатором, що входить до складу керованого випрямляча КВ. Понижена напруга випрямляється та перетворюється в струм заряду накопичувача СНЕ. Рівень енергії накопичувача, в даному прикладі, це конденсатор, контролюється датчиком напруги ДН (визначається як  $U = Q/C_n$ , де  $C_n$  – ємність накопичувача;  $U$  – рівень напруги на його клеммах;  $Q$  – рівень накопиченого заряду), причому сигнал датчика напруги, який приходить на вхід блоку керування БК, встановлює таку швидкість (величину струму) заряду, при якій виконується умова  $R_{зв}(I_{ш}) \leq R_d(I_{ш})$ , де  $R_{зв}$  – внутрішній опір керованого випрямляча КВ,  $I_{ш}$  – струм шинопроводу,  $R_d$  – сумарний опір зварювальних постів, які підключені до шинопроводу.

Напруга шинопроводу через силові клеми вхідного ключа поста ВхКлп підключається до зарядного пристрою поста ЗПп, виходи якого підключені до клем накопичувача поста СНЕ/п (батарея конденсаторів надвисокої ємності), рівень напруги на клеммах якого контролюється датчиком напруги ДНп. До клем накопичувача СНЕ/п підключені входи блока формування вольт-амперних характеристик поста БФ/ВАХп. Величина зварювального струму, яка необхідна для виконання конкретного технологічного процесу зварювання, контролюється ДЗвСп, сигнал якого керує частотою перемикачів вхідного ключа ВхКлп для підтримання необхідного рівня заряду накопичувача СНЕ/п, який необхідний для виконання конкретного технологічного процесу зварювання.

СНЕ на основі конденсаторів з подвійним електричним шаром мають істотні відмінності від класичних конденсаторів, які необхідно враховувати при їх використанні в БЗС. Однією з таких характеристик суперконденсаторів (СК) є кулонівська енергоефективність, суть якої полягає в тому, що з причини електрохімічних процесів, що супро-

воджують їх роботу, ці пристрої не можна розряджати до рівня нижче деякого наперед заданого рівня заряду. Як правило його величина складає 25...30 % від максимального рівня заряду.

Саме тому енергія, яка передається в навантагу, забезпечується частковим розрядом накопичувача. Пояснимо це простим прикладом.

$$W_3 = \frac{C_n U_3^2}{2} \text{ і } W_p = \frac{C_n U_p^2}{2}.$$

Енергія, що передається в навантагу  $\Delta W$ , визначається різницею між  $\Delta W_3$  та  $\Delta W_p$ :

$$\Delta W = \frac{C_n}{2} (U_3^2 - U_p^2).$$

Якщо позначити  $U_p = \alpha U_3$ , де  $\alpha$  характеризує рівень напруги при розряді  $C_n$ , то отримаємо:

$$\Delta W = \frac{C_n U_3^2}{2} (1 - \alpha^2).$$

Враховуючи те, що заряд накопичувача дорівнює  $Q = C_n U_3$  останній вираз можна представити наступним чином:

$$\Delta W = U_3 Q \frac{(1 - \alpha^2)}{2} = U_3 Q K_E,$$

де  $K_E = \frac{(1 - \alpha^2)}{2}$ .

Якщо ввести параметр  $\gamma_3$  (рис. 3), який характеризує ефективність використання заряду накопичувача та позначити його співвідношенням  $\gamma_3 = \frac{Q}{\Delta Q}$ , то в результаті отримаємо:

$$\gamma_3 = \frac{1}{K_E} = \frac{2}{1 - \alpha^2}$$

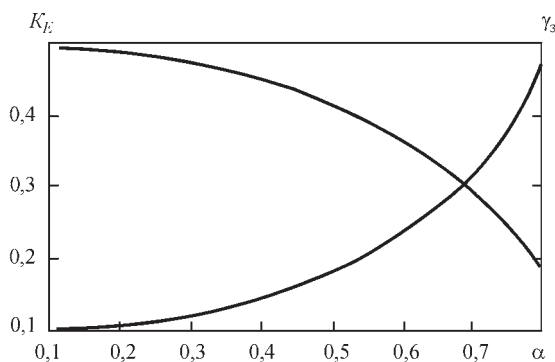


Рис. 3. Кулонівська енергоефективність накопичувачів на основі конденсаторів з подвійним електричним шаром в залежності від коефіцієнта  $\alpha$

В якості постових перетворювачів для описаних вище топологічних структур БЗС нами запропоновані і експериментально досліджені такі зварювальні модулі: пристрій для живлення неплавкого зварювального електрода [11]; пристрій для перетворення змінної напруги промислової частоти в змінну напругу довільної частоти [12] або пристрій для формування різнополярних зварювальних імпульсів струму [13].

З урахуванням викладеного вище розглянемо більш докладно реалізацію методу переносу заряду в постових конверторах.

В основі топології джерел, виконаних на базі перетворювачів з переносом заряду (ППЗ) покладений ємнісний накопичувач енергії (ЄНЕ), оснащений зарядним пристроєм (ЗП) з високими динамічними параметрами та модулем керування (МК). Останній реалізує алгоритми керування в зарядному колі ЄНЕ, а також процеси переносу заряду в зварювальному контурі.

Для того щоб функціонально зв'язати процеси, які мають місце в джерелах з переносом заряду, скористаємося наступними міркуваннями. Як відомо, заряд ( $g_n$ ) у накопичувачі можна визначити виразом

$$g_n = C_n U_3,$$

де  $C_n$  – ємність накопичувача;  $U_3$  – напруга його заряду.

З іншого боку заряд витрачається зварювальним ланцюгом:

$$g = I_{зв} t,$$

де  $I_{зв}$  – зварювальний струм;  $t$  – час зварювання.

Тоді умовою існування безперервного зварювального струму буде співвідношення

$$C_n U_3 = I_{зв} t.$$

Якщо припустити, що процес перетворення енергетичного потоку проходить кожен період, тобто  $t = 1/f$ , то останній вираз можна привести до вигляду

$$C_n U_3 = I_{зв} / f.$$

Отже струм зварювання  $I_{зв}$  визначається співвідношенням

$$I_{зв} = C_n U_3 f = I_{зв} f.$$

Вираз зварювального струму пов'язує всі основні параметри джерел на основі ППЗ. Він є базою для розрахунку всіх процесів і вузлів даного типу джерел для дугового зварювання.

Реалізація вище описаного алгоритму роботи зварювального джерела представлена на рис. 4.

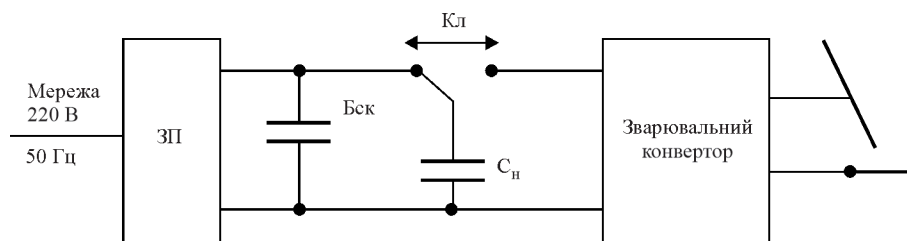


Рис. 4. Структурна схема зварювального джерела на основі перетворювачів з переносом заряду

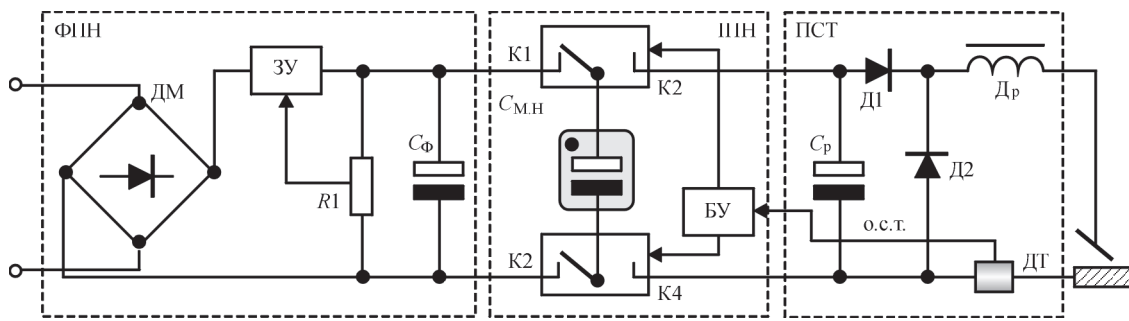
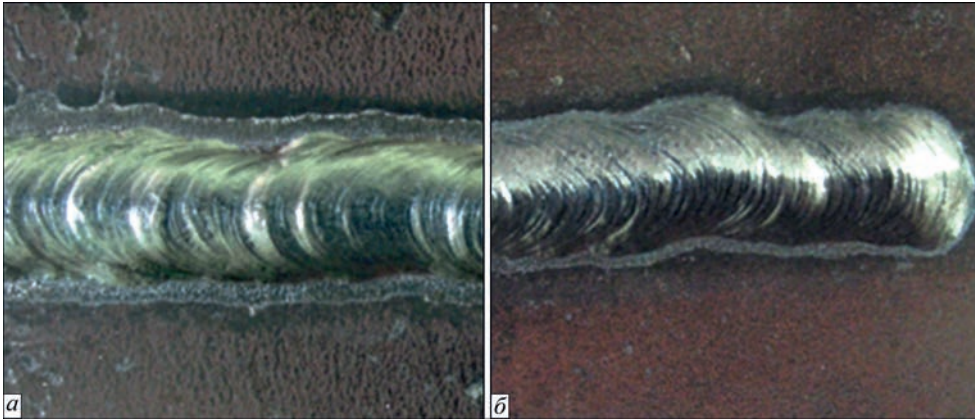


Рис. 5. Перетворювач з переносом заряду

Рис. 6. Результати експериментального дослідження постійного перетворювача з переносом заряду: *a* – 10; *б* – 100 Гц

У його склад входять зарядний пристрій (ЗП), батарея суперконденсаторів (Бск), дозуючий накопичувач ( $C_{\text{н}}$ ), який власне живить зварювальний конвертор. Вибір частоти роботи пристрою задається комутатором.

В якості практичного використання описаного вище підходу на рис. 5 показана схема джерела зварювального струму, що представляє собою топологію конвертора понижуючого типу (КПТ). Пристрій складається із трьох основних вузлів: формувача постійної напруги (ФПН), імпульсного перетворювача напруги (ШПН) і перетворювача зварювального струму (ПЗС). До складу ФПН входять випрямляч діодного моста (ДМ), зарядний пристрій (ЗУ), рівень спрацювання якого задається потенціометром  $R1$  і фільтруючий конденсатор ( $C_{\text{ф}}$ ). Імпульсний перетворювач напруги складається із молекулярного накопичувача  $C_{\text{мн}}$  і блоку ключів К1-К4, алгоритм комутації яких задається блоком управління (БУ). Режим функціонування останнього визначається сигналом зворотнього зв'язку по зварювальному струму о.с.т. В ШПН реалізується відомий режим «літаючого» конденсатора, за допомогою якого забезпечується квазігальванічна розв'язка між вхідним контуром і зварювальним ланцюгом. Робота блоку ПЗС аналогічна роботі перетворювача понижуючої напруги, тому її опис ми не приводимо. Детальний опис його роботи можна знайти в [4]. Аналогічно можна реалізувати метод переносу заряду в будь-яких топологіях джерел зварювального струму.

Результати експериментального дослідження постійного перетворювача, виконаного відповід-

но до схеми, представленої на рис. 5, показані на рис. 6. Наплавлення виконувалося електродами марки УОНИ-13 / Н1-БК, які зазвичай використовуються для корозійностійкої арматури. Нами використовувався режим динамічного горіння дуги на двох фіксованих частотах: *a* – 10 та *б* – 100 Гц. Зварювальні струми в обох випадках були рівні і відповідали величині в 120 А, причому був підключений режим меандру.

## Висновки

На закінчення даної роботи слід зазначити, що використання ємнісних накопичувачів в структурі багатопостових зварювальних систем має комплекс позитивних результатів. До них в першу чергу відносяться:

- висока енергетична ефективність, яка обумовлена низьким внутрішнім опором суперконденсаторів;
- можливість створення різних топологічних структур багатопостових зварювальних систем в залежності від технологічних задач, які відрізняються простотою і надійністю технічної реалізації;
- забезпечення високої стабільності режимів зварювання завдяки швидкій реакції на дестабілізуючі чинники, що пов'язано з високою швидкодією постійних комплексів;
- істотно покращеними параметрами електромагнітної сумісності, завдяки чому в живильну електромережу підприємств не генеруються високочастотні гармоніки.

## Список літератури

1. Бункин П.Я., Донской А.В. (1985) *Многопостовые сварочные системы*. Ленинград, Судостроение.
2. (1986) *Оборудование для дуговой сварки. Справочное пособие*. Смирнов В.В. (ред.). Ленинград, Энергоатомиздат.
3. Коротинский А.Е., Махлин Н.М., Полосков С.И. (2009) Высокоэффективные многопостовые сварочные системы с расширенными технологическими возможностями. *Сварка и диагностика*, **1**, 5–8.
4. Коротинский А.Е., Махлин Н.М., Богдановский В.А. (2002) К расчету электронных регуляторов сварочного тока для многопостовых сварочных систем. *Автоматическая сварка*, **12**, 19–27.
5. Андросенко В.И., Сергевнин Б.И. (1989) А.с. СССР № 1473923. Оpubл. 23.04.89, бюл. № 15.
6. Андросенко В.И., Сергевнин Б.И. (1986) А.с. СССР № 1276453. В.И. Оpubл. 15.12.86, бюл. № 46.
7. Магерль К., Биндер Ю., Штигльбаур В., Артельсмаир Б. (2013) *Способ и устройство для преобразования энергии, а также сварочный аппарат*. Пат. RU 2495734. Оpubл. 20.10.2013, бюл. № 29.
8. Магерль К., Биндер Ю., Штигльбаур В., Артельсмаир Б. (2014) *Способ и устройство для преобразования энергии, а также сварочный аппарат*. Пат. RU 2507043. Оpubл. 20.02.2014, бюл. № 5.
9. Патон Б.С., Коротинський О.С., Скопюк М.І. (2017) *Спосіб керування багатопостовою системою дугового електричного зварювання з накопичувачем*. Пат. UA № 116573. Оpubл. 25.05.2017, бюл. № 10.
10. Патон Б.С., Коротинський О.С., Скопюк М.І. (2019) *Спосіб керування багатопостовою системою дугового електричного зварювання з накопичувачем*. Пат. UA 119296. Оpubл. 27.05.2019, бюл. № 10.
11. Коротинський О.С., Скопюк М.І., Драченко М.П., Вертецька І.В. (2015) *Пристрій для живлення неплавкого зварювального електрода*. Пат. UA № 99852. Оpubл. 25.06.2015, бюл. № 12.
12. Коротинський О.С., Скопюк М.І., Драченко М.П., Шапка В.О. (2015) *Пристрій для перетворення змінної напруги промислової частоти в змінну напругу довільної частоти*. Пат. UA № 103509. Оpubл. 25.12.2015, бюл. № 24.
13. Коротинський О.С., Скопюк М.І. (2015) *Пристрій для конденсаторного точкового зварювання*. Пат. UA 9657. Оpubл. 10.02.2015, бюл. №3.

## References

1. Bunkin, P.Ya., Donskoj, A.V. (1985) *Multistation welding systems*. Leningrad, Sudostroenie [in Russian].
2. (1986) *Arc welding equipment: Refer. Book*. Ed. by V.V. Smirnov. Leningrad, Energoatomizdat [in Russian].
3. Korotynsky, A.E., Makhlin, N.M., Poloskov, S.I. (2009) High-efficient multistation welding systems with extended technological possibilities. *Svarka i Diagnostika*, **1**, 5–8 [in Russian].
4. Korotynsky, A.E., Makhlin, N.M., Bogdanovsky, V.A. (2002) About design of electronic controllers of welding current for multistation welding systems. *The Paton Welding J.*, **12**, 16-24.
5. Androsenko, V.I., Sergevnin, B.I. (1989) In: USSR author's cert. 1473923. Publ. 23.04.89 [in Russian].
6. Androsenko, V.I., Sergevnin, B.I. (1989) In: USSR author's cert. 1276453. Publ. 15.12.86 [in Russian].
7. Magerl, K., Binder, Yu., Shtiglbaur, V., Artelsmair, B. (2013) *Method and device for energy conversion and welding apparatus*. Patent 2495734 RU. Publ. 20.10.2013 [in Russian].
8. Magerl, K., Binder, Yu., Shtiglbaur, V., Artelsmair, B. (2014) *Method and device for energy conversion and welding apparatus*. Patent 2507043 RU. Publ. 20.02.2014 [in Russian].
9. Paton, B.E., Korotynskyi, O.E., Skopyuk, M.I. (2017) *Control mode of multistation arc welding system with accumulator*. Patent 116573 UA. Publ. 25.05.2017 [in Ukrainian].
10. Paton, B.E., Korotynskyi, O.E., Skopyuk, M.I. (2019) *Control mode of multistation arc welding system with accumulator*. Patent 119296 UA. Publ. 25.05.2019 [in Ukrainian].
11. Korotynskyi, O.E., Skopyuk, M.I., Drachenko, M.P., Vertetska, I.V. (2015) *Supply device for nonconsumable welding electrode*. Patent 99852 UA. Publ. 25.06.2015 [in Ukrainian].
12. Korotynskyi, O.E., Skopyuk, M.I., Drachenko, M.P., Shapka, V.O. (2015) *Device for conversion of alternating voltage of commercial frequency into alternating voltage of arbitrary frequency*. Patent 103509 UA. Publ. 25.12.2015 [in Ukrainian].
13. Korotynskyi, O.E., Skopyuk, M.I. (2015) *Device for capacitor-discharge spot welding*. Patent 9657 UA. Publ. 10.02.2015 [in Ukrainian].

## USE OF CAPACITIVE ENERGY STORAGES TO CREATE HIGHLY-EFFICIENT MULTISTATION WELDING SYSTEMS

O.Ye. Korotynsky, M.I. Skopyuk

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The analysis of structures of multi-station sources for arc welding, designed on the base of capacitive energy storages, was carried out. Their prospects for creation of highly-efficient welding and technological systems are shown. The structures of centralized power supply systems of welding stations are considered, in which one powerful electric energy capacitor is used. A decentralized power supply system is more flexible, when the own electric energy capacitor is installed at each workplace. Its advantage consists in the fact that a standard rectifier of type VDGM can be used. For shipbuilding, a combined power supply system can be used, which implements the positive qualities of both power supply systems and provides a high quality and power efficiency of the welding process. As an example of the use of multi-station power sources, a scheme is given, which is based on the method of charge transfer. 13 Ref., 6 Fig.

*Keywords: pulse-arc welding, capacitive energy storage, capacitor with double electric layer, charge transfer method, multistation welding systems, step-down converter*

Надійшла до редакції 13.07.2021



**Електронно-лучева сварка. Технології. Обладнання. Матеріали: Сб. статей под ред. чл.-кор. НАН України В.М. Нестеренкова.** — Інститут електро-сварки ім. Е.О. Патона НАН України, 2021. — 390 с.

Замовлення на книги прохання надсилати до редакції журналу.

Тел.: (044) 200-82-77, E-mail: journal@paton.kiev.ua