

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-3(25)-78-84

УДК 621.311.6

Володимир Халіков¹, Анатолій Жерносеков², Олександр Шатан³, Андрій Муха⁴

¹доктор 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 ID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-5005>

²доктор 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 ID: <https://orcid.org/0000-0002-6404-2221>

³науковий співробітник

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України (Київ, Україна)

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

⁴провідний інженер

науково-технічний комплекс “Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона” НАН України (Київ, Україна)

E-mail: a.mukha@ntk.in.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9810-4569>

ФОРМУВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ

Актуальними є дослідження щодо поліпшення ефективності технології дугового зварювання та функціонування обладнання. Розглянута теоретична й апаратна реалізація зворотних зв'язків систем управління трифазними дуговими випрямлячами для належного формування їхніх вольт-амперних характеристик і модифікацій зворотних зв'язків систем. Розроблена універсальна й компактна система управління дуговими випрямлячами з можливістю її застосування в установках для зварювання в середовищі інертних і активних газів.

Ключові слова: зварювальна дуга; джерело живлення; регулювання; випрямлячі; зворотні зв'язки; вольт-амперна характеристика.

Рис.: 5. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Дугове зварювання плавким і неплавким електродом посідає перше місце при виготовленні різноманітних конструкцій та виробів [1], у тому числі в різних просторових положеннях, а також під водою [2; 3]. Тому актуальними є дослідження щодо поліпшення ефективності технології зварювання та функціонування устаткування.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку технологій зварювання металів характеризується широким застосуванням електронних систем управління та регулювання для устаткування. Тенденції до функціонального та апаратного ускладнення такого роду електротехнічних установок вимагають належного комп'ютерного моделювання систем і їхніх вузлів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження процесів дугового зварювання мають як більш теоретичний характер щодо фізики плазми дуги [4], так і практичний щодо устаткування та джерел живлення зварювальної дуги [5; 6; 7]. Але залишається беззаперечною необхідністю подальшого застосування програмних пакетів автоматизованого проєктування із можливостями трансляції одержаних результатів відразу у виробництві.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Для установок електродугового зварювання важливим є форма та характер поведінки вольт-амперних характеристик (ВАХ) їхніх джерел живлення. При цьому ВАХ фактично забезпечують зварювально-технологічні властивості джерела живлення дуги та визначають ефективність технології зварювання. Нині досить поширено використання різних систем візуального імітаційного моделювання, наприклад, програмних пакетів MATLAB із пакетом візуального моделювання Simulink. Таке моделювання може бути ефективним при розробці систем управління джерелами живлення для дугових процесів зварювання, особливо в системах з кількома зворотними зв'язками.

Метою дослідження є підвищення ефективності зварювальних процесів за рахунок розробки систем управління випрямлячів шляхом імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо систему регулювання трифазним дуговим випрямлячем. Такі установки завжди були достойною альтернативою інверторним джерелам струму дуги, особливо в області суттєво значних значень струмів, де відбуваються більші спотворення струму живлячої мережі.

У моделі рис. 1, виконаній у середовищі візуального моделювання Simulink- MATLAB, для узгодження електротехнічних елементів і їхніх зв'язків із математичними блоками використовуються проміжні елементи: ID (Current Measurement) U1, U2, U3, UD (Voltage Measurement) – аналоги вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Модель дозволяє маніпулювати значеннями зворотних зав'язків (33) як по струму навантаження (Gain1), так і по нарузі на ньому (Gain 2,). Функцію опорної напруги – U_0 із діапазоном значень $0 \dots 10$ виконує блок Slider Gain, що підключений до суматора Sum. Ці значення блоком Fcn приводяться до необхідних ($5^0 \dots 115^0$) для входу alpha_deg синхронізатора, для цього в діалоговому вікні Expression блоку повинно бути задана функція: $u*((115-5)/10)+5$.

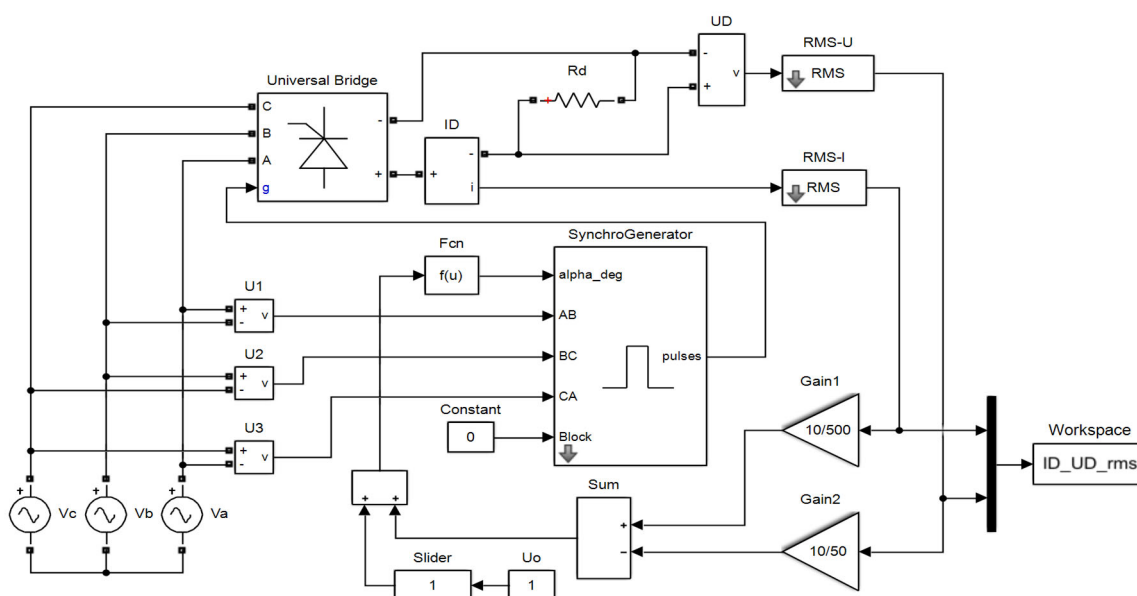


Рис. 1 Імітаційна модель системи джерела живлення зі зворотними зв'язками

Одержання ВАХ полягає в одночасному застосуванні файлу моделі та m-файлу, який задає значення навантаження, запускає процес моделювання, зчитує його результат із робочої пам'яті (Workspace), змінює величину навантаження і повторює знову ту ж саму процедуру. Після закінчення циклу моделювання по одержаних даних він будує власні ВАХ у заданих координатах. Таким чином, необхідно одночасно використовувати власну модель та редактор-відладчик із відкритим m-файлом, причому останній фактично забезпечує автоматизацію процесу одержання результатів. Більш відкрита архітектура організації обчислень в MATLAB дозволяє виконувати такий багатократний параметричний аналіз процесів у рамках використання того самого середовища, що недоступно для інших замкнених систем моделювання.

Конкретні приклади m-файлів із відповідними коментарями та методика їх застосування були авторами детально висвітлені у [8]. Там само показано, як можна досягти спрощення процедур, уникнувши використання відладчика та запускаючи m-файл прямо із вікна моделі.

Якщо задати значення коефіцієнтів передачі обох блоків Gain нульовими, то результатом наведених дій буде згенерований графік сімейства ВАХ при варіаціях U_0 ($0 \dots 8$), що і показано на рис. 2. Ці характеристики показують енергетичні можливості джерела струму при різних значеннях опорної напруги за відсутності в системі ЗЗ.

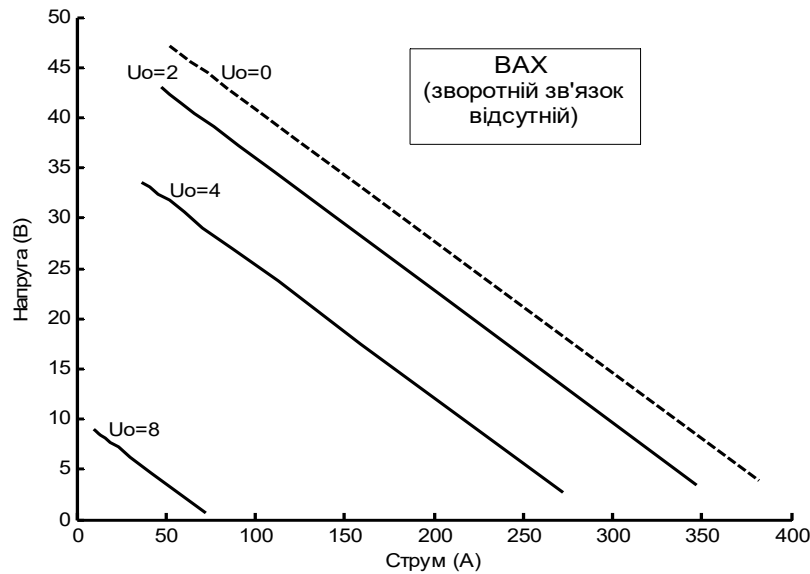


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики джерела за відсутності зворотного зв'язку

Зміна опорного параметру U_o призводить до зміщення ВАХ у напрямку зменшення струму та напруги і їх розміщенню паралельно граничній прямій, що характеризується параметром $U_o = 0$ (рис. 2), щ підвищує максимальні можливості джерела струму з погляду енерговіддачі (на рис. 2 штрихова лінія).

Якщо в системі із двома каналами ЗЗ (рис. 1), пронормувати до одиничного значення величини коефіцієнтів підсилення по струму $K_i = 10/500$ (Gain 1) та по напрузі $K_u = 10/50$ (Gain 2) і відповідним чином здійснити варіацію значень цих коефіцієнтів, застосовуючи згадану методологію, то одержимо сімейство характеристик (рис. 3). Як видно з рис. 3, нормоване значення коефіцієнта підсилення по струму для Gain 1 незмінне і рівне 1,2 що відповідає його параметру $K_i = 12/500$. Відповідно для Gain 2 в області середніх значень струмів дуги 40...175А нормоване значення коефіцієнта підсилення по напрузі може бути незмінним (0,75) і лише в областях малих та великих струмів для цієї ВАХ цей коефіцієнт необхідно дещо збільшити.

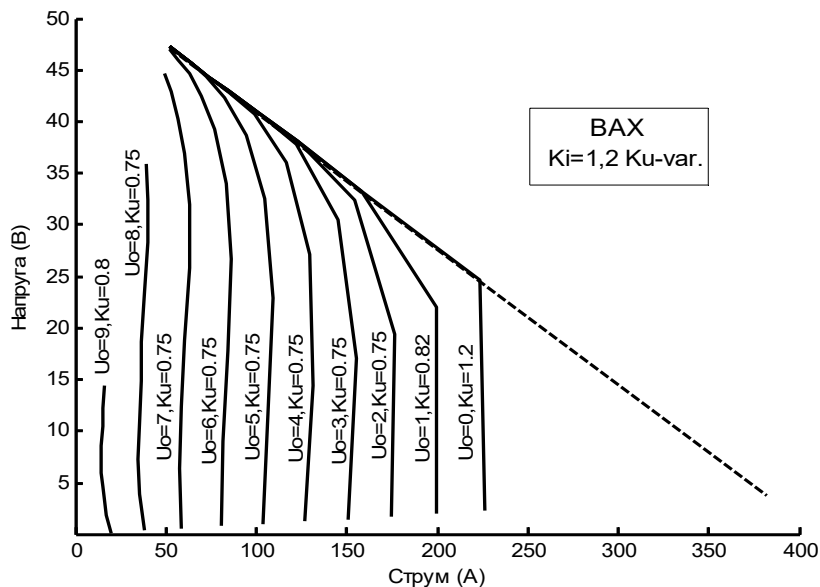


Рис. 3. Вольт-амперні характеристики джерела дуги зі зворотними зв'язками

У підсумку ефект досягається взаємовідніманням сигналів обох каналів зворотного зв'язку. Із рис. 3 видно, що в області середніх струмів 40...175А немає потреби змінювати значення K_u ($K_u = 0,75$), в області малих струмів необхідність корекції досить незначна (збільшення K_u від 0,75 до 0,8), проте при нарощуванні струму навантаження до максимального, величину коефіцієнта необхідно збільшити на 60 % (із 0,75 до 1,2). Причиною є нелінійність характеристики випрямляча, що пов'язана з фазовим регулюванням синусоїдальної напруги. Варіації значень K_u , від наведених на рис. 3 в ту чи іншу сторону, призведуть до візуального ефекту «випуклості» або «пологості» вертикального відрізка ВАХ.

При технології ручного дугового зварювання з крапельним перенесенням металу електрода необхідно формувати більш складну форму ВАХ джерела. Адже процес проходить із епізодичними, проте досить частими замиканнями дугового проміжку. При цьому зміна режиму теплопередачі в районі шва супроводжується так званим «залипанням» електрода, чим створюються некомфортні умови роботи, знижується продуктивність праці. Усунення цього ефекту можливе через відповідне збільшення величини струму в момент замикання дугового проміжку. При цьому за рахунок інтенсифікації виділення тепла проходить прискорене руйнування перемички між краплею та власне електродом і відбувається відновлення дугового проміжку.

Система з реалізацією такого принципу може бути модифікацією моделі рис. 1, коли наявна інформація про замикання дугового проміжку. Переважно зниження напруги між електродом та виробом до значень $U_{kz} = 7...14V$ досить однозначно про це свідчать. Реалізація цієї функції повинна полягати в такій модифікації кола ЗЗ, при якому зменшення величини U_d нижче за рівень U_{kz} приводить до належного зменшення рівня ЗЗ по струму. Наприклад, через зміну значення коефіцієнта підсилення для блоку Gain 1. Після моделювання кінцевим результатом такого функціонування системи буде сімейство ВАХ, наведене на рис. 4.

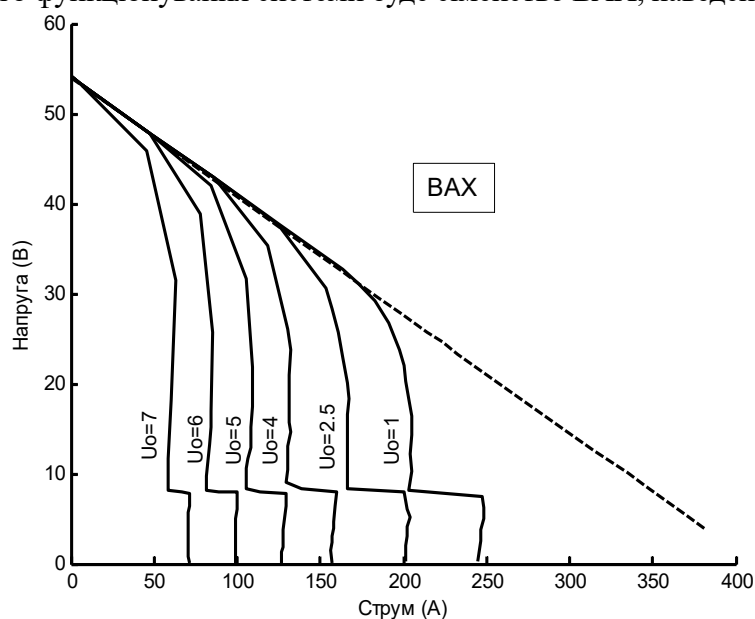


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики джерела дуги з урахуванням технології зварювання

Були розроблені системи із формуванням ВАХ, в областях напруг нижче рівня U_{kz} , шляхом поступового, а не ступінчатого збільшення струму дуги. При цьому технологічні процеси можуть носити більш м'який характер за рахунок плавного наростання струму навантаження, що може сприяти меншому розбризкуванню металу із зони зварювання. Різке ступінчате наростання струму приводить до підвищеного розбризкування та збільшує динамічне навантаження на обмотки силового трансформатора.

Формування бажаних ВАХ – це далеко не єдина проблема, перед якою постають при розробці та проектуванні систем регулювання дуговими випрямлячами. До цього можна віднести, наприклад, реалізацію модуляції струму дуги та регулювання параметрів модуляції, як в часі так і по амплітуді струму. Також необхідним є нечутливість схеми управління до порядку почерговості фаз мережі живлення.

Безумовно, що однією з основних задач при вирішенні задач керування є також реалізація датчиків енергетичних параметрів зварювальної дуги, організація їх взаємозв'язку з первинними джерелами струму дуги спрямоване поліпшення або дотримання багатьох параметрів та характеристик. До них можна віднести: електричну сумісність; заводостійкість; гальванічну роз'єднаність із силовими колами (клас ізоляції); належний статичний діапазон роботи; відповідний динамічний діапазон роботи. Але основною вимогою була допустимість формування за їх допомогою належних ВАХ відповідно до рис. 2, 3, 4.

Було розроблено датчик струму та напруги дуги, в якому реалізовувалися переваги оптичного зв'язку силових кіл із системою управління.

Основним компонентом використано підсилювач HCPL-7840 із диференціальними та оптично ізольованими входом та виходом. Це дозволило реалізувати датчик струму і датчики напруги із метою одержання можливостей регулювання форми вольт-амперних характеристик джерела струму дуги. Це дозволяє концептуально виконати більшість згаданих вимог до такого роду пристроїв.

У результаті вирішення цих задач була розроблена достатньо універсальна система управління дуговими випрямлячами серії ВДУ, один із типоміналів ВДУ-506п, яких наведено на рис. 5. Основні регулюючі функції системи реалізовані на базі мікроконтролера ATmega48P, що надає можливості її застосування також в установках для зварювання в середовищах інертних та активних газів.



Рис. 5. Установка для зварювання в середовищах інертних та активних газів

Джерело: <http://www.rvs-tehno-m.ru/vdu-506p.htm>.

Функціональні можливості системи апробовані не тільки на серійних зразках обладнання, а і в одиничних зразках джерел струму дуги зварювання під шаром флюсу номінальним струмом 1200 А.

Висновки. 1. Дугове зварювання посідає перші місця при виготовленні різноманітних конструкцій та виробів, тому актуальними є дослідження щодо поліпшення ефективності технологій зварювання та функціонування устаткування шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання.

2. Розглянута теоретична і апаратна реалізація зворотних зав'язків систем управління трифазними дуговими випрямлячами для належного формування їх вольт-амперних характеристик і модифікацій зворотних зав'язків систем, що дозволяє підвищити ефективність зварювальних процесів.

3. Розроблена методика може застосовуватись для створення універсальних систем управління дуговими випрямлячами для зварювання в середовищі інертних і активних газів на струм до 1200 А.

Список використаних джерел

1. Применение импульсных воздействий при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитных газов (Обзор) [Электронный ресурс] / В. А. Лебедев, С. В. Драган, Г. В. Жук, С. В. Новиков, И. В. Симутенков // Автоматичне зварювання. – 2019. – № 8. – С. 30-40. – Режим доступа: <https://doi.org/10.15407/as2019.08.04>.

2. Максимов С. Ю. Герметизация труб теплообменников «мокрой» сваркой на глубине 200 м / С. Ю. Максимов, В. А. Лебедев, И. В. Лендел // Вопросы материаловедения. – 2015. – № 1. – С. 199–204.

3. Максимов С. Ю. Разработка технологии герметизации труб теплообменника автоматической мокрой подводной сваркой [Электронный ресурс] / С. Ю. Максимов // Автоматическая сварка. – 2017. – № 5-6. – С. 68-71. – Режим доступа: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.11>.

4. Бої У. Процеси зварювання неплавким електродом з модуляцією зварювального струму (Огляд). Частина I. Особливості горіння нестационарних дуг з тугоплавким катодом [Електронний ресурс] / У. Бої, І. Кривцун // Автоматичне зварювання. – 2019. – № 11. – С. 29-39. – Режим доступа: <https://doi.org/10.15407/as2019.11.05>.

5. Lebedev V. Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wirefeed / V. Lebedev, U. Reisinger, I. Lendel // Welding in the World. – February 2016. – Pp. 9–14. DOI:10.1007/s40194-016-0321-0.

6. Бурлака В. В. Иверторный прямоходовый источник питания с повышенным коэффициентом мощности [Электронный ресурс] / В. В. Бурлака, С. В. Гулаков, С. К. Поднебенная // Автоматическая сварка. – 2017. – № 3. – С. 59-61. – Режим доступа: <https://doi.org/10.15407/as2017.03.08>.

7. Цыбулькин Г. А. Исследование импульсно-дуговых процессов при периодическом изменении вольт-амперных характеристик источника питания дуги [Электронный ресурс] / Г. А. Цыбулькин // Автоматическая сварка. – 2019. – № 7. – С. 3-8. – Режим доступа: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.01>.

8. Халіков В. А. Шляхи та засоби вдосконалення установок електродугового зварювання / В. А. Халіков, К. А. Липківський, О. Ф. Шатан // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 77-80.

References

1. Lebedev, V. A., Dragan, S. V., Zhuk, G. V., Novikov, S. V., & Simutenkov, I. V. (2019). Primenenie impulsnykh vozddeystvii pri dugovoi svarke plaviashchymisia elektrodom v srede zashchitnykh gazov (Obzor) [Application of pulsed impact in consumable electrode gas-shielded arc welding (Review)]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, (8), 30-40. <https://doi.org/10.15407/as2019.08.04>.

2. Maksimov, S. Yu., Lebedev, V. A., & Lendel, I. V. (2015). Germetyzatsiia trub teploobmennikov «mokroi» svarkoi na glubine 200 m [Sealing tubes of heat exchangers by “wet” welding at a depth of 200 m]. *Voprosy materialovedeniia – Questions of materials science*, (1), 199–204.

3. Maksimov, S. Yu. (2017). Razrabotka tekhnologii germetizatsii trub teploobmennika avtomaticheskoi mokroi podvodnoi svarkoi [Development of technology of sealing heat exchanger pipes by automatic wet underwater welding]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, (5-6), 68-71. <https://doi.org/10.15407/as2017.06.11>.

4. Boi, U., & Krivtsun, I. V. (2019). Protsesy zvariuvannia neplavkym elektrodom z moduliatsiieiu zvariivalnoho strumu (Ohliad). Chastyna I. Osoblyvosti horinnia nestatsionarnykh duh z tuhoplavkym katodom [Processes of nonconsumable electrode welding with welding current modulation (Review). Part 1. Peculiarities of burning of nonstationary arcs with refractory cathode]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, (11), 29-39. <https://doi.org/10.15407/as2019.11.05>.

5. Lebedev, V., Reisgen, U., & Lendel I. (February 2016). Study of technological opportunities of GMA welding and surfacing with pulse electrode wirefeed. *Welding in the World*, 9–14. DOI:10.1007/s40194-016-0321-0.

6. Burlaka, V. V., Gulakov, S. V., & Podnebennaiia, S. K. (2017). Ivertornyi priamokhodovyi istochnik pitania s povyshennym koefitsientom moshchnosti [Forward inverter source with increased power factor]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, (3), 59-61. <https://doi.org/10.15407/as2017.03.08>.

7. Tsybulkin, G. A. (2019). Issledovanie impulsno-duhovykh protsessov pri periodicheskom izmenenii volt-ampernykh kharakteristik istochnika pitania dugi [Study of pulsed arc processes at periodic switching of volt-ampere characteristics of arc power source]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, (7), 3-8. <https://doi.org/10.15407/as2019.07.01>.

8. Khalikov, V. A., Lipkovsky, K. O., Pakhanyan, V. M., & Shatan, A. F. (2004). Shliakhy ta zasoby vdoskonalennia ustanovok elektroduhovoho zvariuvannia [Study of energy efficiency of welding arc sources with modern software packages for modeling]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamic*, (3), 17-22.

9. VDU-506P (380 V) svarochnyi vypryamitel universalnyi [VDU-506P (380 V) universal welding rectifier]. <http://www.rvs-tehno-m.ru/vdu-506p.htm>.

Отримано 15.07.2021

UDC 621.311.6

Volodymyr Khalikov¹, Anatolii Zhernosekov², Alexander Shatan³, Andrii Mukha⁴

¹Doctor 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>

²Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Department of Impulse Processes and Arc Welding Technologies E.O. Paton Electric Welding Institute (PWI) (Kyiv, Ukraine)

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

³Scientific Researcher

E.O. Paton Electric Welding Institute (PWI) (Kyiv, Ukraine)

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

⁴Leading Engineer

Scientific and Technical Complex E. O. Paton Electric Welding Institute (Kyiv, Ukraine)

E-mail: a.mukha@ntk.in.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9810-4569>

FORMATION OF VOLT-AMPER CHARACTERISTICS OF WELDING ARC POWER SOURCES

Arc welding with a consumable and non-consumable electrode takes first place in the manufacture of various designs and products. Therefore, research on improving the efficiency of welding technology and the functioning of equipment is relevant. The aim of the work is to increase the efficiency of welding processes by developing rectifier control systems.

For electric arc welding installations, the shape and behavior of the current-voltage characteristics of their power source is important. The theoretical and hardware implementation of the feedbacks of the control system of three-phase arc rectifiers for the proper formation of their current-voltage characteristics and modifications of the feedback systems are considered.

One of the main tasks in solving control problems is the implementation of sensors of the energy parameters of the welding arc, the organization of their relationship with the primary sources of arc current, aimed at improving or observing a number of parameters and characteristics: electrical compatibility; noise immunity; galvanic isolation with power circuits (insulation class); proper static range of operation; corresponding dynamic range of work. An arc current and voltage sensor has been developed, which implements the advantages of optical communication between power circuits and a control system. A modern control system has been developed, the basis of which is a microcontroller and the widespread use of modern optoelectronic means for separating electrical signals. A universal and compact control system for arc rectifiers with the possibility of its use in installations for welding in an inert and active gas environment has been developed.

Studies in the field of creating rectifier control systems for arc welding can significantly improve their welding and technological parameters.

Keywords: welding arc; power sources; regulation; rectifiers; feedback; volt-ampere characteristic.

Fig.: 5. References: 9.