

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДУГИ

Г.А. Цыбулькин

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассматриваются импульсно-дуговые процессы, осуществляемые путем периодического переключения вольт-амперных характеристик источника питания дуги, имеющих различную крутизну. При этом сама коммутация указанных характеристик осуществляется не принудительно, а автоматически на основе информации о текущем состоянии системы «источник питания–дуга». Основная цель – выяснить насколько эффективен указанный способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа. В статье приводятся результаты теоретических исследований и компьютерного моделирования автоколебательных процессов, протекающих в рассматриваемой системе. Выведена формула для предварительной оценки частоты следования импульсов сварочного тока. Варьируя значением определенного параметра, фигурирующего в этой формуле, можно задавать желаемую частоту следования указанных импульсов. Библиогр. 9, рис. 7.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, плавящийся электрод, коммутация вольт-амперных характеристик, компьютерное моделирование, частота следования импульсов сварочного тока

Импульсный процесс дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа может быть осуществлен различными способами [1–7]. Наиболее эффективными в настоящее время считаются два способа:

- путем подачи на дугу дополнительного напряжения от специального генератора импульсов, подключенного параллельно основному источнику питания дуги;
- периодическим переключением вольт-амперных характеристик источника питания дуги, имеющих различную крутизну.

Второй способ представляется особенно привлекательным в том отношении, что содержит потенциальные возможности осуществления импульсного режима сварки не только за счет принудительной коммутации вольт-амперных характеристик источника питания дуги, как это реализовано в работе [5]. Можно, например, ввести в систему «источник питания–дуга» специальную обратную связь, обеспечивающую коммутацию указанных характеристик автоматически на основе информации о текущем состоянии данной системы.

Предполагается, что такое решение позволит получить новые полезные свойства, не присущие системе импульсно-дуговой сварки с принудительной коммутацией вольт-амперных характеристик.

Заметим, что системы, работа которых основана на принципе изменения ее параметров в зависимости от текущего состояния системы, в теории управления относятся к классу систем с переменной структурой [8].

© Г.А. Цыбулькин, 2019

В настоящей статье будут рассмотрены импульсно-дуговые процессы, устанавливающиеся в системе с автоматической коммутацией вольт-амперных характеристик. Цель — выяснить насколько эффективен указанный способ импульсно-дуговой сварки.

На рис. 1 схематически изображена система «источник питания – дуга», включающая источник питания дуги (*SP*) с двумя вольт-амперными характеристиками, крутизна которых S_1 и S_2 различна, и сварочный контур (*WC*) с плавящимся электродом. Кроме того, введено логическое переключающее устройство (*LSD*), которое, в зависимости от текущего состояния системы, характеризуемого выходным напряжением источника питания $u_s = u_s(t)$, подключает к сварочному контуру либо электрическую цепь с параметром S_1 , либо с параметром S_2 , т. е. изменяет структуру самой системы по определенному закону.

Математическое описание системы. На основе схемы, представленной на рис. 1, и известных свойств саморегулирования дуги [9] составим уравнения, описывающие динамические процессы, протекающие в рассматриваемой системе:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= u_s + Si, \\ u_s &= u_a + (LD + R)i, \\ u_a &= u_0 + El + S_a i, \\ l &= H - h_0 - \frac{1}{D}(v_e - v_m), \\ v_m &= Mi. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

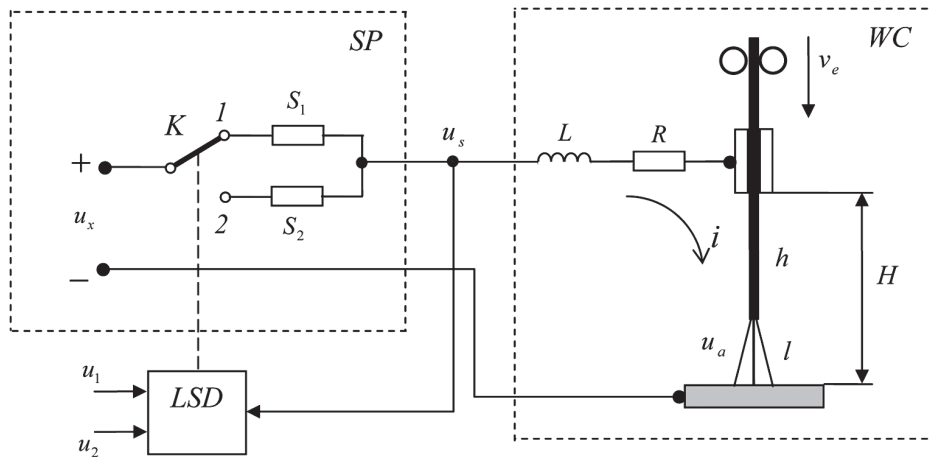


Рис. 1. Схема системы «источник питания–дуга» (обозначения см. в тексте)

где $u_x = \text{const}$ — напряжение холостого хода; $i = i(t)$ — сварочный ток; $S = |\partial u_s / \partial i|$ — абсолютное значение крутизны выходной вольт-амперной характеристики, равное S_1 или S_2 в зависимости от положения переключателя K ; $u_a = u_a(t)$ — напряжение на дуге; L — индуктивность сварочной цепи; R — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке горелки; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжений; $S_a = |\partial u_a / \partial i|$ — абсолютное значение крутизны вольт-амперной характеристики дуги; E — напряженность электрического поля

в столбе дуги; $l = l(t)$ — длина дуги; $H = \text{const}$ — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны; $h_0, h = h(t)$ — начальное и текущие значения вылета электрода; $v_e = \text{const}, v_m = v_m(t)$ — скорости подачи и плавления электрода, соответственно; $M = dv_m / di$ — крутизна токовой характеристики плавления электрода; $D = d/dt$ — оператор дифференцирования; t — текущее время.

При составлении уравнений (1) использована некоторая идеализация относительно реальных вольт-амперных характеристик источника сварочного тока, аппроксимировав их линейными функциями. Графическая интерпретация системы уравнений (1) в виде структурной схемы изображена на рис. 2. Сварочный контур WC , входящий в эту систему, с точки зрения теории автоматического управления представляет собой замкнутую систему с естественной отрицательной обратной связью по скорости плавления электрода v_m , которая обеспечивает самостабилизацию (саморегулирование) длины дуги $l(t)$ при заданной скорости v_e и заданном расстоянии H , а релейная обратная связь по напряжению $u_s(t)$ обеспечивает автоматическое переключение структуры системы.

Закон переключения запишем в виде:

$$S = \begin{cases} S_1, & (u_s \leq u_1, Du_s < 0), \\ S_2, & (u_s \geq u_2, Du_s > 0), \end{cases} \quad S_1 < S_2, \quad (2)$$

где u_1 и u_2 — пороговые значения $u_s(t)$.

Приведем систему уравнений (1) с учетом выражения (2) к одному дифференциальному уравнению

$$(T_L^2 D + TD + 1)u_s(t) = g, \quad (3)$$

в котором T_L, T — коэффициенты, определяемые соотношениями

$$T_L^2 = \frac{L}{EM}, \quad T = \begin{cases} T_1, & (S = S_1), \\ T_2, & (S = S_2), \end{cases} \quad (4)$$

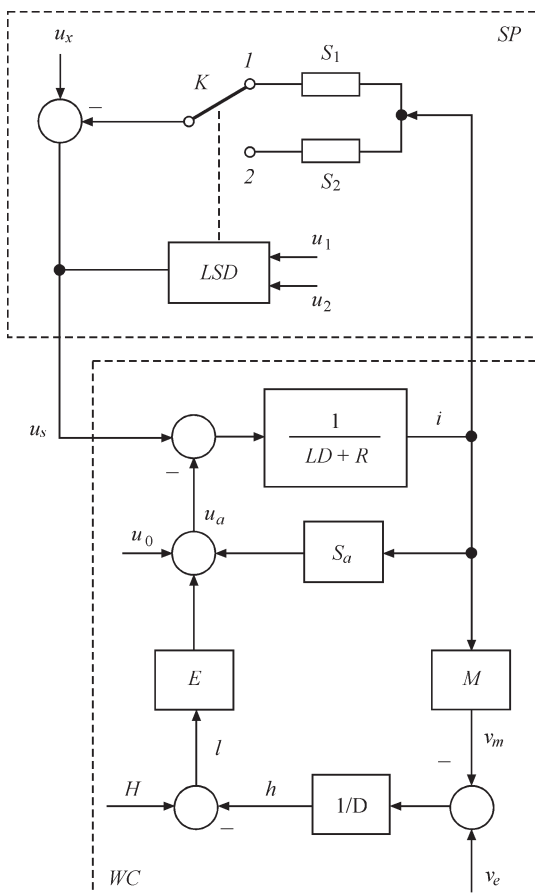


Рис. 2. Структурная схема системы «источник питания–дуга» с переменной структурой (описание см. в тексте)

где

$$T_1 = \frac{S_1 + S_a + R}{EM}, \quad T_2 = \frac{S_2 + S_a + R}{EM},$$

а правая часть имеет вид

$$g = \begin{cases} g_1, & (S = S_1), \\ g_2, & (S = S_2), \end{cases} \quad (5)$$

где

$$g_1 = u_x - S_1 \frac{v_e}{M}, \quad g_2 = u_x - S_2 \frac{v_e}{M}.$$

Из выражений (4), (5) видно, что коэффициент T , фигурирующий в уравнении (3), и правая часть этого уравнения g изменяются скачком при переключении системы с одной характеристики на другую, т. е. при переключении связей между элементами системы. Что касается величины T_L^2 , то она, согласно (4), постоянна и в большинстве практических случаев значительно меньше T , так как $L \ll (S + S_a + R)/EM$. Это позволяет вместо уравнения (3) в дальнейшем использовать редуцированное (укороченное) уравнение

$$(TD + 1)u_s(t) = g. \quad (6)$$

Пороговые значения u_1 и u_2 , входящие в выражение (2), выберем, исходя из следующих условий:

$$u_1 = g_2 + \xi, \quad u_2 = g_1 - \xi, \quad (7)$$

где $\xi > 0$ — некоторая величина, выбираемая из технологических соображений.

Для того чтобы проследить за ходом динамического процесса, описываемого уравнением (6), рассмотрим последовательно два процесса, подчиняющихся двум различным дифференциальным уравнениям $(T_1D + 1)u_s(t) = g_1$ и $(T_2D + 1)u_s(t) = g_2$.

Начнем с момента, когда переключающий элемент K установлен в положение 1, как показано на рис. 1. На этом этапе сварочный процесс протекает согласно дифференциальному уравнению $(T_1D + 1)u_s(t) = g_1$. С учетом начального условия $u_s(0) = u_{s0}$ решение этого уравнения примет следующий вид:

$$u_s(t) = (u_{s0} - g_1) \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + g_1 \quad (8)$$

(начальному условию $u_s(0) = u_{s0}$ на рис. 3 соответствует точка P).

Согласно (8) напряжение $u_s(t)$ с ростом t возрастает и стремится к своему установившемуся значению $g_1 = u_x - S_1 v_e M^{-1}$. Но в момент времени t_1 , когда $u_s(t)$ становится равным пороговому значению $u_2 = g_1 - \xi$, происходит согласно закону (2) переключение системы с характеристики 1 на характеристику 2 (переключатель K на рис. 1 устанавливается при этом в положение 2). Рабочая точка рассматриваемого динамического процес-

са (см. рис. 3) «скачком» переходит из точки a в точку b . При этом напряжение u_s , равное u_2 , остается неизменным, но происходит скачкообразное уменьшение сварочного тока $i = i(t)$. На этом первый этап заканчивается.

На втором этапе динамический процесс подчиняется дифференциальному уравнению

$$(T_2D + 1)u_s(t) = g_2.$$

Решение этого уравнения с учетом начального условия $u_s(t_1) = u_2$ принимает вид

$$u_s(t) = (u_2 - g_2) \exp\left(-\frac{(t-t_1)}{T_2}\right) + g_2. \quad (9)$$

Согласно (9) напряжение $u_s(t)$, начиная с момента времени t_1 , будет убывать, стремясь к установившемуся значению $g_2 = u_x - S_2 v_e M^{-1}$. Как только $u_s(t)$ становится равным $u_1 = g_2 + \xi$, происходит в соответствии с (2) переключение системы с характеристики 2 на характеристику 1. При этом рабочая точка «скачком» переходит из точки c в точку d . Соответственно, «скачком» увеличивается сварочный ток $i = i(t)$.

Теперь напряжение $u_s(t)$ снова начнет расти в соответствии с уравнением

$$u_s(t) = (u_1 - g_1) \exp\left(-\frac{(t-t_2)}{T_2}\right) + g_1, \quad (10)$$

где t_2 — момент времени, когда $u_s(t) = u_1$. Увеличение $u_s(t)$ будет продолжаться до тех пор, пока не достигнет порога u_2 в точке a . Далее процессы в системе будут в точности повторяться.

Таким образом, «медленные» движения рабочей точки на участках da и bc периодически чередуются с «быстрыми» (скачкообразными) движениями на участках ab и cd , порождая колебания $u_s(t)$ релаксационного типа. Следовательно, траектория движения $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$ является устойчивым циклом, свидетельствующим об установившемся автоколебательном режиме в рассматриваемой системе. Периодическое изменение $u_s(t)$ происходит в пределах от u_1 до u_2 , т. е. в пределах заранее задаваемой зоны (а она при необходимости может быть сделана достаточно узкой).

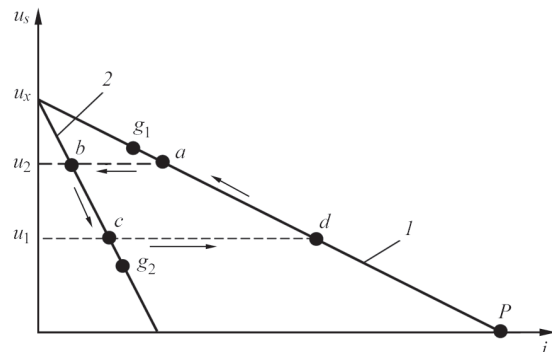


Рис. 3. Циклограмма установившегося автоколебательного режима: $1 - u_s = u_x - S_1 i$; $2 - u_s = u_x - S_2 i$ (обозначения см. в тексте)

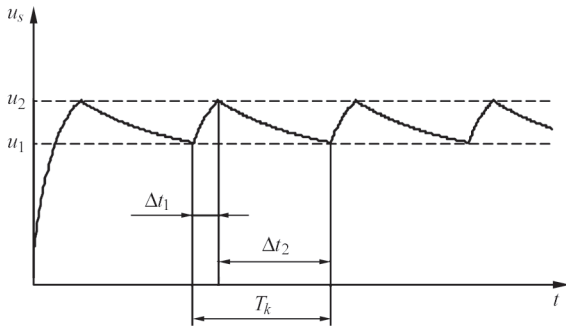


Рис. 4. График изменения напряжения $u_s(t)$ при заданных пороговых значениях u_1 и u_2 (описание см. в тексте)

Из рис. 4 видно, что «релаксационные» колебания напряжения $u_s(t)$ носят пилообразный характер. Период автоколебаний T_k определяется суммой двух интервалов времени Δt_1 и Δt_2 . Интервал Δt_1 , в течение которого напряжение $u_s(t)$ возрастает от u_1 до u_2 , определяется согласно уравнению (10) соотношением

$$\Delta t_1 = T_1 \ln \left(\frac{u_1 - g_1}{u_2 - g_1} \right). \quad (11)$$

Аналогично, интервал времени Δt_2 , в течение которого напряжение $u_s(t)$ убывает от u_2 до u_1 , определяется в соответствии с уравнением (9) выражением

$$\Delta t_2 = T_2 \ln \left(\frac{u_2 - g_2}{u_1 - g_2} \right). \quad (12)$$

Формулы (11) и (12) с учетом соотношений (7) приобретают следующий вид:

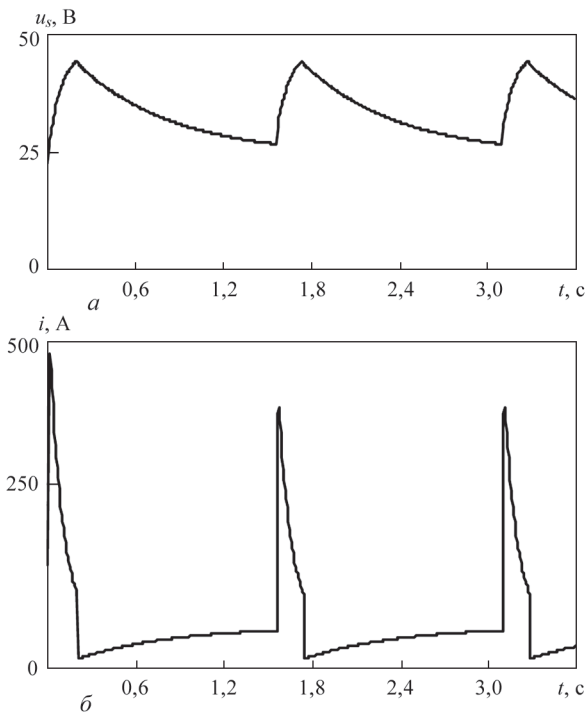


Рис. 5. Графики при $\xi = 2,5$ В: а – $u_s(t)$; б – $i(t)$

$$\Delta t_1 = T_1 \ln \left(\frac{\Delta g}{\xi} - 1 \right), \quad \Delta t_2 = T_2 \ln \left(\frac{\Delta g}{\xi} - 1 \right),$$

где $\Delta g = g_2 - g_1 = (S_2 - S_1)v_e M^{-1}$.

Следовательно,

$$T_k = (T_1 + T_2) \ln \left(\frac{\Delta g}{\xi} - 1 \right). \quad (13)$$

Период релаксации T_k (при заранее выбранных значениях S_1 и S_2) зависит лишь от значения параметра ξ , варьируя которым можно устанавливать желаемую частоту $f = 1/T_k$ автоколебательного процесса рассматриваемой системы.

Результаты компьютерного моделирования.

На рис. 5–7 представлены результаты моделирования автоколебательных процессов, устанавливающихся в рассматриваемой системе при следующих значениях параметров роботизированной дуговой сварки: $u_x = 50$ В; $u_0 = 18$ В; $S_1 = 0,05$ В/А; $S_2 = 0,4$ В/А; $S_a = 0,02$ В/А; $R = 0,01$ Ом; $L = 5 \cdot 10^{-4}$ Гн; $E = 2$ В/мм; $v_e = 20$ мм/с; $M = 0,31$ мм/(А·с); $H = 17$ мм.

Из рис. 5, в частности, видно, что напряжение на выходе источника питания дуги $u_s(t)$, как и следовало ожидать, имеет пилообразную форму,

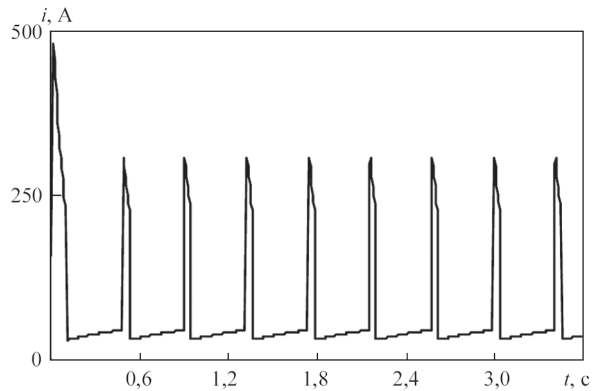


Рис. 6. График $i(t)$ при $\xi = 8$ В

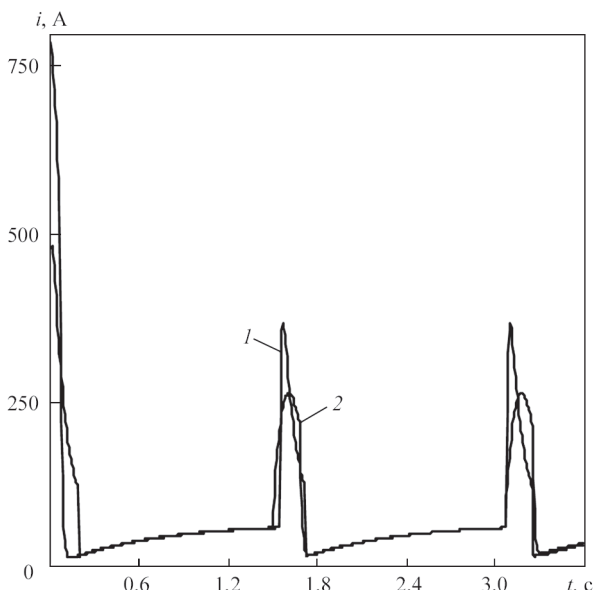


Рис. 7. Графики $i(t)$ при $\xi = 2,5$ В: 1 – $L = 5 \cdot 10^{-4}$ Гн; 2 – $L = 5 \cdot 10^{-3}$

а сварочный ток $i(t)$ носит импульсный характер. Импульсы тока возникают в моменты «мгновенного» перехода текущего состояния рассматриваемой системы из точки c в точку d (рис. 3).

График $i(t)$, изображенный на рис. 6, получен при $\xi = 8$ В. Сравнивая графики, представленные на рис. 5 и 6, видим, что при увеличении ξ увеличивается частота следования импульсов тока $f = 1/T_k$.

Вернемся к вопросу о том, насколько существенно влияние на автоколебательный процесс неучтенного нами в (6) малого параметра T_L , зависящего согласно (4) от индуктивности системы L . Для выяснения этого вопроса, вместо упрощенного уравнения (6), при компьютерном моделировании использовалось исходное уравнение (3).

На рис. 7 представлены результаты моделирования, полученные при двух различных значениях индуктивности: $L = 5 \cdot 10^{-4}$ Гн (кривая 1) и $L = 5 \cdot 10^{-3}$ Гн (кривая 2). Сравним сначала импульсы тока $i = i(t)$ на рис. 7 (кривая 1) с импульсами тока на рис. 5, полученными при $L = 0$. Они практически не отличаются друг от друга ни по форме, ни по высоте. Следовательно, малые индуктивности (т. е. когда $L < 5 \cdot 10^{-4}$ Гн) заметного влияния на динамику релаксационного процесса $i = i(t)$ не оказывают.

Сравним теперь кривые 1 и 2 на рис. 7. Высота импульсов уменьшилась лишь в 1,5 раза при существенном (в 10 раз) увеличении индуктивности L . При этом несколько изменилась форма импульсов (сгладилась «вершина» импульса), но характер релаксационных колебаний практически остался без заметных изменений.

Выводы

1. Результаты теоретического рассмотрения и компьютерного моделирования позволяют сделать вывод о том, что вполне удовлетворительный режим импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом может быть осуществлен, используя идеи теории систем с переменной структурой.

2. Особенность реализации рассматриваемого способа импульсно-дуговой сварки состоит в том, что коммутация вольт-амперных характеристик обеспечивается не принудительно, а автоматически на основе информации о текущем состоянии процесса дуговой сварки.

3. Основным достоинством рассмотренного способа является простота, надежность и низкая стоимость его реализации.

Список литературы

1. Воропай Н.М., Илюшенко В.М., Ланкин Ю.Н. (1999) Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов (Обзор). *Автоматическая сварка*, **6**, 26–32.
2. Жерносеков А.М., Андреев В.В. (2007) Импульсная дуговая сварка плавящимся электродом (обзор). *Там же*, **10**, 48–52.
3. Крампит Н.Ю., Буракова Е.М., Крампит М.А. (2014) Краткий обзор способов управления процессом дуговой сварки в среде защитных газов. *Современные проблемы науки и образования*, **1**. URL: <http://www.science-education.ru/115-12069>.
4. Дюргеров Н.Г., Ленивкин В.А. (2015) Технологическая стабильность импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. *Сварочное производство*, **4**, 14–18.
5. Шейко П.П., Павшук В.М. (1992) Источник питания для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом с плавным регулированием параметров. *Автоматическая сварка*, **6**, 44–46.
6. Jing Nie, Xiao-Feng Meng, Yu Shi. (2011) Study on Evaluation Method of Aluminum Alloy Pulse MIG Welding Stability Based on Arc Voltage Probability Density. *Signal and Information Processing*, **2**, 159–164.
7. Mathivanan A., Senthilkumar A., Devakumaran K. (2015) Pulsed current and dual pulse gas metal arc welding of grade AISI. *Defense Technology*, **11**(3), 269–274.
8. Волик Б.Г. (ред.) (1988) *Теория управления. Терминология. Вып. 107*. Москва, Наука.
9. Цыбульский Г.А. (2014) *Адаптивное управление в дуговой сварке*. Киев, Сталь.

References

1. Voropaj, N.M., Ilyushenko, V.M., Lankin, Yu.N. (1999) Peculiarities of pulsed-arc welding with synergic control of mode parameters (Review). *Avtomatich. Svarka*, **6**, 26-32 [in Russian].
2. Zhernosekov, A.M., Andreev, V.V. (2007) Pulsed metal arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 40-43.
3. Krampit, N.Yu., Burakova, E.M., Krampit, M.A. (2014) Short review of methods for control of shielded-gas arc welding process. In: *Modern problems of science and education*, **1**. URL: <http://www.science-education.ru/115-12069> [in Russian].
4. Dyurgerov, N.G., Lenivkin, V.A. (2015) Technological stability of consumable electrode pulsed-arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 14-18 [in Russian].
5. Shejko, P.P., Pavshuk, V.M. (1992) Power source for consumable electrode pulsed-arc welding with smooth control of parameters. *Avtomatich. Svarka*, **6**, 44-46 [in Russian].
6. Jing Nie, Xiao-Feng Meng, Yu Shi (2011) Study on evaluation method of aluminum alloy pulse MIG welding stability based on arc voltage probability density. *Signal and Information Processing*, **2**, 159-164.
7. Mathivanan, A., Senthilkumar, A., Devakumaran, K. (2015) Pulsed current and dual pulse gas metal arc welding of grade AISI. *Defense Technology*, **11**(3), 269-274.
8. (1988) *Control theory. Terminology. Issue 107*. Moscow, Nauka [in Russian].
9. Tsybulkin, G.A. (2014) *Adaptive control in arc welding*. Kiev, Stal [in Russian].

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПЕРІОДИЧНІЙ ЗМІНІ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДУГИ

Г.О. Цибулькін

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

Розглянуто імпульсно-дугові процеси, які здійснюються шляхом періодичного перемикання вольтамперних характеристик джерела живлення дуги, що мають різну кривизну. При цьому сама комутація зазначених характеристик здійснюється не примусово, а автоматично на основі інформації про поточний стан системи «джерело живлення–дуга». Основна мета – з’ясувати наскільки ефективний зазначений спосіб імпульсно-дугового зварювання плавким електродом в середовищі захисного газу. У статті наводяться результати теоретичних досліджень і комп’ютерного моделювання автоколивальних процесів, що протікають в даній системі. Виведено формулу для попередньої оцінки частоти проходження імпульсів зварювального струму. Варіюючи значенням визначеного параметра, що фігурує в цій формулі, можна задавати бажану частоту проходження вказаних імпульсів. Бібліогр. 9, рис. 7.

Ключові слова: імпульсно-дугове зварювання, плавкий електрод, комутація вольт-амперних характеристик, комп’ютерне моделювання, частота проходження імпульсів зварювального струму

STUDY OF PULSED ARC PROCESSES, GENERATED BY PERIODIC SWITCHING OF VOLT-AMPERE CHARACTERISTICS OF THE ARC POWER SOURCE

G.A. Tsybulkin

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The article discusses the pulsed arc processes carried out by periodic switching of the volt-ampere characteristics of the arc power source having different steepness. At the same time, the commutation of the mentioned characteristics itself is realized not forcibly, but automatically based on the information about the current state of the system “power source-arc”. The main aim is to find out how effective is this method of pulsed arc welding with consumable electrode in a shielding gas environment. The article presents the results of theoretical investigations and computer simulation of self-oscillatory processes, occurring in the system under consideration. A formula was derived for a preliminary evaluation of the pulse repetition rate of the welding current. By varying the value of a certain parameter appearing in this formula, it is possible to set the desired repetition rate of the indicated pulses. 9 Ref., 7 Fig.

Keywords: pulsed arc welding, melting electrode, switching of volt-ampere characteristics, computer simulation, pulse repetition rate of welding current

Поступила в редакцію 02.04.2019

Всеукраїнська конференція

ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Присвячується 60-річчю кафедри зварювального виробництва НУК

17–19 вересня 2019 р.

Миколаїв, Коблеве

Тематичні напрямки роботи конференції:

- Технології, матеріали та устаткування зварювання плавленням
- Зварювання у твердому стані
- Паяння та споріднені процеси
- Інженерія поверхні
- Нові конструкційні матеріали та покриття
- Міцність зварних та спаяних з’єднань
- Комп’ютерне моделювання та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану зварних і спаяних з’єднань

Оргкомітет:

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

Вчений секретар оргкомітету — Костін Олександр Михайлович

тел. +38(050) 982-97-67; E-mail: koctin.weld@gmail.com