

Aproksymacja charakterystyk statycznych i modelowanie łuku elektrycznego w procesie spawania metodą TIG

Approximation of static characteristics and modeling of an electric arc of the TIG welding device

Streszczenie

W artykule zaprezentowano funkcję aproksymującą charakterystyki statyczne łuku spawalniczego uwzględniającą wpływ wybranych warunków zewnętrznych. Na podstawie pomiarów zasilacza spawalniczego typu TIG wyznaczono stałe współczynniki aproksymacji i zaimplementowano ją w uniwersalnym modelu matematycznym łuku elektrycznego Pentegowa. Za pomocą programu MATLAB-Simulink wykonano symulacje procesów w obwodzie z makromodelem łuku elektrycznego i wymuszeniem prądowym impulsowym unipolarnym.

Słowa kluczowe: łuk elektryczny, model Pentegowa, charakterystyki statyczne, TIG

Abstract

New approximation function of static characteristics of welding arc which includes influence of various external conditions has been presented. Based on experimental measurements of TIG welding supply approximation coefficients have been estimated and its has been implemented into universal Pentegov arc model. Simulations of processes with macromodel of electric arc powered by unipolar pulsed source have been carried out using MATLAB-Simulink.

Keywords: electric arc, Pentegov arc model, static characteristics, TIG

Wstęp

Łuk elektryczny w osłonie gazów obojętnych lub aktywnych oraz o podwyższonym ciśnieniu wykorzystuje się w różnych działach techniki, m.in. w spawalnictwie. Do jego modelowania często stosowane są charakterystyki statyczne, stanowiące zależność między prądem i napięciem łuku, zakładające stałą jego długość i zerową wartość pochodnej prądu względem czasu ($di/dt \approx 0$). Dokładność odwzorowania przebiegu rzeczywistej wartości napięcia na kolumnie łukowej zasilanej z zadanego źródła zależy od prawidłowego wyboru funkcji aproksymującej. Taka funkcja może być wykorzystana do nadążnej kontroli procesu spawania, przez kompensację uchybów długości kolumny łukowej, czy innych zaburzeń pochodzących z zewnątrz układu.

Przegląd literatury naukowo-technicznej [1÷4] wskazuje na częste stosowanie aproksymacji rodziny charakterystyk statycznych łuku elektrycznego wyrażeniem zaproponowanym przez Nottinghama [5] w postaci

$$U_{stat}(I, L) = a + bL + \frac{c + dL}{I^n} \quad 1)$$

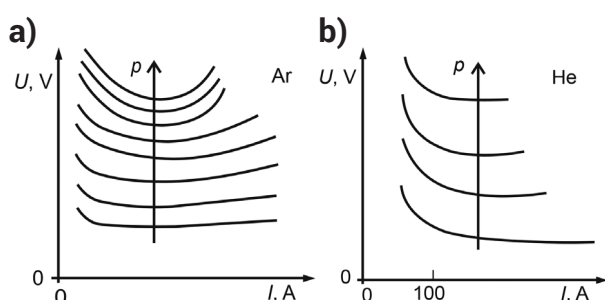
gdzie: U_{stat} – napięcie, V; I – natężenie prądu, A; L – długość łuku, m; a, V ; $b, V/m$; $c, V \cdot A^n$; $d, V \cdot A^n/m$; n – stałe współczynniki aproksymacji (a – suma przyanodowego i przykatodowego spadków napięcia). Wyrażenie to podobnie jak i inne proste aproksymacje nie odwzorowuje ściśle zjawisk cieplnych i gazodynamicznych zachodzących

w łuku elektrycznym. Podawany zakres jego użyteczności obejmuje długość łuku nie mniejszą niż 15 mm. Na kształt uzyskiwanych charakterystyk statycznych ma wpływ szereg zróżnicowanych czynników zewnętrznych, m.in. ciśnienie gazu działającego na kolumnę łukową, przepływ gazu omywającego łuk oraz skład chemiczny gazu, długość łuku, średnica i rodzaj elektrod [6] itd. Do innych klasycznych aproksymacji możemy zaliczyć zależności podane przez P. Steinmetza, H. Ayrtonę (będącą przypadkiem szczególnym wyrażenia podanego przez Nottighama) czy też empiryczne zależności podane m.in. przez Alluma [4], Stokesa i Oppenlandera czy Paukerta oraz wiele innych, stworzonych na potrzeby rozwiązania konkretnego problemu lub odniesione do ściśle określonych warunków zewnętrznych. Istnieją również inne aproksymacje charakterystyk statycznych, nie mające bezpośredniego inżynierskiego zastosowania, które wymagają dokładniejszego zbadania wpływu środowiska i właściwości plazmy łuku [2].

Do pełnej automatyzacji procesu spawania, poza określoną charakterystyką statyczną, potrzebny jest jednak model dynamiczny łuku, bądź jego odwzorowanie przez wyuczoną sieć neuronową. Wśród licznych modeli matematycznych łuku elektrycznego są takie, które jako swoją podstawę wykorzystują rodziny charakterystyk statycznych. Do nich należą, np. model Nowikowa-Shellhase i model Pentegowa. W niniejszym artykule przedstawiono propozycję wykorzystania uniwersalnego modelu łuku o predefiniowanej charakterystyce statycznej do symulowania procesów zachodzących w łuku spawalniczym podczas spawania metodą TIG.

Aproksymacja charakterystyk statycznych łuku elektrycznego urządzenia TIG

W łukach płonących w osłonie argonu lub mieszaniny z wodorem oraz gazach o wysokim ciśnieniu obserwowane jest narastanie gałęzi charakterystyki statycznej w zakresie silnych prądów (rys. 1). Dodatkowo może być on spotęgowany działaniem siły Lorentza, efektem pinchu, wykorzystaniem zaostzonych elektrod, czy konstruktora z uskokiem w plazmotronie [6]. Wyszczególnione we wstępie aproksymacje są nieprecyzyjne, gdyż nie uwzględniają tych wszystkich zjawisk. Do aproksymacji charakterystyk statycznych łuku elektrycznego nadają się wyrażenia zawierające funkcje wykładnicze, Gaussa, Lorentza, sech bądź eksponentyjalne [7]. Możliwa jest również ich kombinacja, mająca na celu uzyskanie najprecyzyjniejszego odwzorowania. Ich przydatność wykazano m.in. przez tworzenie funkcji aproksymujących charakterystyki statyczne, a następnie modelowanie łuków ziemnozwarciowych [8]. Stosowane są również do aproksymacji napięć plazmotronów z łukiem zewnętrznym [1].



Rys. 1. Charakterystyki statyczne łuku elektrycznego w gazach o różnym ciśnieniu: a) w argonie; b) w helu

Fig. 1. Static characteristics of an electric arc under various pressure: a) in argon; b) in helium

Cechą charakterystyk statycznych łuku elektrycznego jest narastanie wartości napięcia wraz ze zmniejszeniem natężenia prądu. W granicy $I \rightarrow 0$ A osiąga ono bardzo duże wartości bliskie napięciu przebicia gazu w przerwie międzyelektrodowej, które zależą od warunków wyładowania, np. stopnia zjonizowania gazu. W łuku prądu zmiennego to napięcie jest znacznie obniżone. Zależność (1) nie pozwala definiować zarówno napięcia zapłonu, jak i prądu zapłonu, stanowiących współrzędne lokalnego maksimum.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych [9] urządzeń spawalniczych TIG w osłonie argonu (rys. 2) i po przeprowadzeniu obliczeń numerycznych, można zaproponować nową funkcję aproksymującą charakterystyki statyczne w postaci

$$U_{stat}(I, L) = a + b_h \cdot L \cdot \left(\frac{I}{I_z}\right)^{\varepsilon(I)} \cdot \sec h\left(\frac{I}{I_z}\right)^{1-\varepsilon(I)} + c_h \cdot L \cdot \left(\frac{I}{I_z}\right)^{d_h} \quad (2)$$

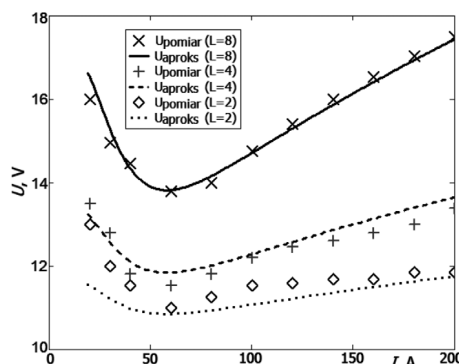
gdzie: b_h , V/m; c_h , V/m; d_h – stałe współczynniki aproksymacji, I_z - prąd zapłonu łuku, A. W aproksymacji wykorzystano następującą funkcję wagową

$$\varepsilon(I) = \frac{-|I|^k}{I_z^k} \quad (3)$$

gdzie k - wykładnik potęgowy aproksymacji. Charakterystyka statyczna w postaci (2) może odzwierciedlać zachowania łuku w różnych gazach (argonie, wodrze), gdzie obserwuje się narastanie prawej gałęzi wykresu, lub w helu, gdzie jest ona opadająca (rys. 1b). Oprócz tego może ona znaleźć zastosowanie do aproksymowania charakterystyk łuków o poziomym

kształcie, przez odpowiednią zmianę współczynników. Postać wyrażenia (2) nadaje się również do aproksymacji charakterystyk statycznych łuków w gazach o podwyższonym ciśnieniu. Dodatkowo, proponowana zależność uwzględnia zmiany długości kolumny łukowej, a także stwarza możliwość odpowiedniego doboru wariantu funkcji wagowej.

Na podstawie danych pomiarowych [9] wyznaczono przyelektrodowy spadek napięcia ($a = U_{AK} = 9,868$ V). Obliczono go metodą ekstrapolacji liniowej na podstawie zmian długości łuku (8 mm, 4 mm, 2 mm). Zbiór punktów pomiarowych z wykresami aproksymującymi przedstawiono na rysunku 2. Uzyskano następujące wartości współczynników: $b_h = 0,90347$ V/mm; $c_h = 0,17938$ V/mm; $d_h = 0,65450$; $k = 0,60339$; $I_z = 15,75095$ A.



Rys. 2. Punkty pomiarowe charakterystyk statycznych łuku rzeczywistego urządzenia TIG (elektroda wolframowa torowana (1%) o średnicy 2,4 mm) [9] oraz ich aproksymacje wyrażeniem (2)

Fig. 2. Real measurement data of the TIG device

Z wykresów zamieszczonych na rysunku 2 można zauważyć dużą dokładność odwzorowania danych za pomocą proponowanego wyrażenia (2), zwłaszcza w zakresie silnoprądowym oraz dużej przerwy międzyelektrodowej. Widoczne jest również mniej adekwatne odwzorowanie w zakresie prądów słabych. Jest ono spowodowane dużą rozpiętością przedstawionej aproksymacji przez zastosowanie stałych współczynników bez względu na długość łuku. Można tego uniknąć i uzyskać większą precyzję, wyznaczając stałe współczynniki aproksymacji charakterystyki łuku o konkretnej długości.

Uniwersalny model łuku elektrycznego z predefiniowaną charakterystyką statyczną

Ogólnie modele łuku elektrycznego możemy podzielić na proste (klasyczne), złożone, kombinowane oraz uniwersalne [10÷13]. Do uniwersalnych należy model Pentegowa [3,10], gdyż wykorzystuje wcześniej zdefiniowaną dowolną charakterystykę statyczną. Model ten, podobnie jak klasyczne modele łuku elektrycznego, spełnia równanie bilansu energetycznego. Jest on wyrażony w postaci liniowego równania różniczkowego

$$\theta \frac{di_0^2}{dt} + i_0^2 = i^2 \quad (4)$$

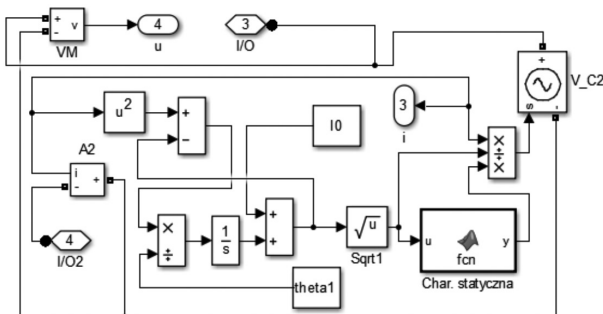
gdzie: θ - stała czasowa modelu, s; i_0 - prąd stanu łuku, A; i - przebieg prądu źródła, A. Model ten ma swoją specyfikę, polegającą na wprowadzeniu pojęcia prądu stanu łuku i_0 . Tak utworzony model łuku hipotetycznego, odwzorowuje z pewnym opóźnieniem rzeczywisty przebieg prądu w obwodzie. W wybranych przypadkach możliwe jest łatwe wyzna-

czenie parametrów modeli [3]. Przebieg napięcia na kolumnie łuku $u(t)$ oblicza się za pomocą wyrażenia

$$u(t) = \frac{U(i_0(t))}{i_0(t)} i(t) \quad (5)$$

gdzie $U(i_0(t))$ - charakterystyka statyczna kolumny łuku, V.

Na podstawie danych wejściowych: modelu (4), charakterystyki statycznej (2) i wyznaczonych jej stałych współczynników, zbudowano obwód zawierający makromodel łuku elektrycznego Pentegowa (rys. 3) zasilanego ze źródła prądowego.



Rys. 3. Blok funkcjonalny modelu łuku Pentegowa (fcn - charakterystyka statyczna (2) w postaci skryptu)

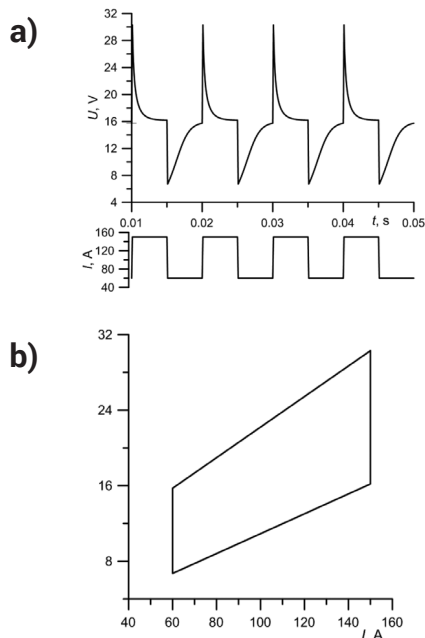
Fig. 3. Functional block of the Pentegov arc model (fcn - the static characteristic (2) defined as a script)

Przeprowadzono symulację procesów elektrycznych w obwodzie wtórnym urządzenia TIG zasilającego łuk prądem pulsującym unipolarnym (o wypełnieniu 50% i częstotliwości $f = 100$ Hz). Zadana stała czasowa modelu wynosiła $\theta = 9 \cdot 10^{-4}$ s. Przebiegi czasowe zadanego prądu oraz otrzymanego napięcia (5) z uwzględnieniem obliczonego przyelektrodowego spadku napięcia UAK przedstawiono na rysunku 4. Podstawą obliczeń była wybrana charakterystyka

napięciowo-prądowa statyczna odpowiadająca odległości międzyelektrodowej 8 mm.

Otrzymane przebiegi napięcia swoim kształtem są zbliżone do rzeczywistych w urządzeniach spawalniczych TIG z wymuszeniem prądowym unipolarnym. Są one zgodne z wynikami badań [14], które wykonano w szerokim zakresie zmian częstotliwości prądu wymuszającego.

Przedstawiony model matematyczny z zaproponowaną charakterystyką statyczną może być użyteczny w diagnostyce i nadajnym sterowaniu procesu spawania TIG.



Rys. 4. Charakterystyki dynamiczne łuku w symulowanym urządzeniu TIG: a) przebiegi czasowe prądu i napięcia; b) pętla histerezy

Fig. 4. Dynamic characteristics of an electric arc in the simulated TIG device: a) time series of current and voltage; b) hysteresis loop

Wnioski

Zaproponowana funkcja analityczna (2) umożliwia uzyskiwanie zadowalających aproksymacji charakterystyk statycznych łuku w wybranych gazach oraz łuku w gazach o podwyższonym ciśnieniu zasilanym ze źródła energii o szerokim zakresie quasi-statycznych zmian prądu.

Funkcja analityczna (2) może być przydatna do tworzenia uniwersalnego modelu Pentegowa odwzorowującego procesy dynamiczne w łuku zasilanym ze źródła energii o szerokim zakresie zmian wartości chwilowych prądu.

Opracowany makromodel łuku Pentegowa, zawierający proponowaną aproksymację charakterystyki statycznej, wykazał swoją przydatność do symulowania procesów w urządzeniach spawalniczych typu TIG, pracujących z wymuszeniem prądowym impulsowym unipolarnym.

Literatura

- [1] Sawicki A.: Aproksymacje charakterystyk napięciowo-prądowych łuku urządzeń elektrotechnologicznych, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2013, nr 6, s. 58-68.
- [2] Estes H. B.: Horizontal series fault comparison in AC & DC micro-grid architectures, MSc Thesis, The University of Texas at Austin, 2011.
- [3] Sawicki A., Haltof M.: Badanie wpływu zaburzeń długości kolumny na metodę wyznaczania parametrów modelu Pentegowa opisującego łuk elektryczny o charakterystyce statycznej typu Ayrton, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 2014, nr 6, s. 39-44.
- [4] Allum C.J.: The Characteristics and Structure of High Pressure (1"-42 bars) Gas Tungsten Arcs. Ph. D thesis. CP Cranfield Institute of Technology, 1982.
- [5] Nottingham W. B.: A New Equation for the Static Characteristic of the Normal Electric Arc, A.I.E.E Journal, 1923, vol. 42, pp. 12-19.
- [6] Sawicki A., Haltof M.: Metoda widmowa wyznaczania stałej czasowej modelu Cassiego łuku elektrycznego płonącego w różnych warunkach fizycznych. Konferencja naukowo-techniczna „Modelowanie i sterowanie procesów elektrotechnologicznych”, Kielce, 15-17 września 2014 r, Materiały konferencyjne, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2014, s. 83-92.
- [7] Schöttzau H., Kneubühl F. K.: A new approach to high-power arc dynamics, ETEP, vol. 4, no. 2, 1994, pp. 89-99.
- [8] Marciniak L., Modele dynamiczne łuku zwarciovego dla sieci z małym prądem zwarcia doziemnego, Archiwum Energetyki, Tom XXXVII (2007), 357-367.
- [9] Karafi M. R., Narimani R., Hojjat Y., Gheybi M.: Study on automatic control of arc gap in robotic TIG welding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, vol. 50, pp. 953-960.
- [10] Пентегов И.В.: Вопросы моделирования динамики сварочной дуги как элемента электрической цепи. Автоматическая сварка 1984, № 10, с. 18-23.
- [11] Tseng K.J., Wang Y., Vilathgamuwa D.M.: Development of a dynamic model of electric arc for power electronics simulations, IEEE Industrial Applications Conference, IAS'96, 1996, no 4, pp. 2173-2180.
- [12] Sawicki A., Światoń Ł., Sosiński R.: Zastosowanie modelu Cassiego do symulowania procesów w obwodzie z łukiem elektrycznym, Przegląd Spawalnictwa, 2009, nr 12, s. 62-65.
- [13] Sawicki A.: Modelowanie łuku spawalniczego o zmiennej długości kolumny plazmowej, Przegląd Spawalnictwa, 2012, nr 6, s. 8-11.
- [14] Kolasa A., Matsunawa A., Arata Y.: Dynamic characteristics of variable frequency pulsed TIG arc, Transactions of JWRI, Welding Research Institute of Osaka University, vol. 15 no. 2, 1986.