

Antoni SAWICKI

O WYKORZYSTANIU ZMODYFIKOWANYCH MODELI CASSIEGO I HYBRYDOWEGO TWV ŁUKU PROMIENIUJĄCEGO DO SYMULOWANIA PROCESÓW W URZĄDZENIACH SPAWALNICZYCH

STRESZCZENIE *W pracy wskazano na podstawowe przyczyny poszukiwań zmodyfikowanych modeli matematycznych łuku rozszerzających możliwości symulowania procesów energetycznych w urządzeniach spawalniczych. Opisano sposoby modyfikacji modeli Cassiego i hybrydowego Cassiego-Mayra przez uwzględnienie charakterystyk mocy rozpraszanej promieniowaniem cieplnym plazmy. Zaimplementowano te modele w programie MATLAB-Simulink. Wykonano symulacje procesów w obwodach z wymuszeniami impulsowymi i ze zmodyfikowanymi modelami łuku. Wykazano przydatność opracowanych modeli do obliczania stanów pracy urządzeń spawalniczych z łukiem o podwyższonej intensywności promieniowania.*

Słowa kluczowe: *łuk elektryczny spawalniczy, radiacja łuku, model Cassiego łuku, model hybrydowy łuku.*

1. WSTĘP

Stosunkowo niskie napięcia i stosunkowo słabe prądy łuku spawalniczego z elektrodą nietopliwą powodują, że jego właściwości znacznie różnią się od właściwości łuków elektrotermicznych w piecach łukowych, gdzie stosuje się wyższe

dr hab. inż. Antoni SAWICKI, prof. PCz
e-mail: sawicki.a7@gmail.com

Politechnika Częstochowska
Instytut Elektroenergetyki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 251, 2011

napięcia do 1,5 kV i silniejsze prądy do 120 kA [1]. Stosunkowo krótki łuk i stosunkowo zimne elektrody ze znaczną przewagą emisji autoelektronowej uwydatniają rolę procesów przyelektrodowych w bilansie energetycznym wyładowania. Stąd aby uzyskać odpowiednio wysoką dokładność modelowania numerycznego należy uwzględniać wartości przyelektrodowych spadków napięcia na bardzo cienkich warstwach przewodzących z plazmą nietermiczną. Ponadto stosunkowo niska temperatura plazmy termicznej kolumny łukowej i dobre warunki rozpraszania ciepła uwydatniają nieliniowości charakterystyk dynamicznych. Tak więc ze względu na procesy przy elektrodach i w kolumnie plazmowej, łuk spawalniczy jest silnie nieliniowym elementem układów zasilania i sterowania. Bardzo mała wartość współczynnika tłumienia (często nazywanego stała czasowa), związanego z czasami relaksacji procesów elektrycznych i cieplnych [2], utrudnia uzyskiwanie stabilizacji wyładowania w warunkach działania bardzo silnych zaburzeń wewnętrznych i zewnętrznych.

Stabilizacja wyładowania łukowego wymaga stosowania źródeł zasilania o odpowiednich charakterystykach zewnętrznych statycznych i dynamicznych. Opracowane współczesne źródła prądowe dzięki włączeniu w szereg elementów indukcyjnych i zastosowaniu pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego sygnału prądu pozwalają w pewnym zakresie na stabilizację wyładowania elektrycznego. Jednakże sygnały pochodzące z pomiarów prądu i napięcia coraz częściej nie wystarczają do sterowania i monitorowania procesów spawalniczych. Dodatkowo więc wykorzystuje się takie efekty działania łuku, jak: pole elektromagnetyczne, szum akustyczny i promieniowanie ciepłe (widzialne). Po zastosowaniu odpowiednich czujników można więc pozyskiwać informacje na temat niektórych parametrów łuku, jeziora spawalniczego i samego procesu spawalniczego, a nawet jakości uzyskiwanego szwu [3-5].

Szczególnie słabo wrażliwym sygnałem na zakłócenia jest promieniowanie łuku. Jego intensywność może być podwyższona w szczególnych procesach spawalniczych. Użycie wysokiego ciśnienia atmosfery gazowej (np. spawanie hiperbaryczne), zastosowanie mieszanek gazowych z dużą zawartością wodoru (np. spawanie atomowe (wodorowe) dwiema elektrodami wolframowymi), domieszkowanie gazu plazmotwórczego parami metali alkalicznych (np. cięcie metali w parach litu) znacznie podnosi intensywność promieniowania plazmy łukowej. To powoduje, że z jednej strony klasyczny model Cassiego nie zawsze jest w stanie odpowiednio precyzyjnie odwzorować podstawowe strumienie energii i charakterystyki łuku, a z drugiej zaś strony zachodzi potrzeba wykorzystywania modeli uwzględniających radiację plazmy do symulowania układów sterowania i monitorowania [6] procesów spawalniczych. Ze względu na ograniczony zakres widmowy czujników promieniowania i potrzebę eliminacji zakłóceń wykorzystywana jest część zakresu promieniowania plazmy (najczęściej część zakresu promieniowania widzialnego).

2. ZAGADNIENIA MODYFIKACJI MODELI CASSIEGO ŁUKU O PODWYŻSZONEJ EMISYJNOŚCI PLAZMY

Modele dynamiczne kolumny łuku elektrycznego tworzone są na podstawie równania bilansu mocy kolumny plazmowej

$$P_{kol} = u_{kol}i = P_{dys} + \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

gdzie:

- P_{kol} – moc elektryczna dostarczona;
- P_{dys} – moc cieplna rozproszona z kolumny;
- Q – entalpia plazmy;
- u_{kol}, i – napięcie i prąd kolumny łukowej.

Efekt silnej nieliniowości modeli wynika ze zmienności konduktancji kolumny, która jest funkcją złożoną o postaci $g(t) = F_g(Q(t))$.

Popularne modele łuku elektrycznego Cassiego i Mayra wykorzystują dwa różne założenia upraszczające [7]:

- model Mayra: $T(t,(x,y,z)) = \text{variab}$, moc łuku rozpraszana na drodze kondukcji, $S(i) = \text{const}$; $\sigma(i) = \text{var}$; $P_S(i) = \text{const}$; $g(i) = K_1 \cdot \exp\left(\frac{Q_V(\sigma(i))}{Q_0}\right)$
- model Cassiego: $T(t,(x,y,z)) = \text{const}$, moc łuku rozpraszana na drodze konwekcji, $S(i) = \text{var}$; $\sigma(i) = \text{const}$; $P_S(i) \sim Q(i) \sim g(i) = \text{var}$; $g(i) = K_2 \cdot \frac{Q_V(i)}{Q_0}$

gdzie:

- T – temperatura, K;
- x, y, z – współrzędne, m;
- s – pole przekroju, m²;
- σ – konduktywność, S/m;
- Q_V – gęstość objętościowa entalpii plazmy, J/m³;
- Q_0 – stały współczynnik odniesienia, J/m³;
- K_1 – stały współczynnik aproksymacji, S/m;
- K_2 – współczynnik aproksymacji liniowej.

Ponieważ model Mayra umożliwia uzyskiwanie najlepszej aproksymacji w zakresie słabych prądów, a model Cassiego w zakresie prądów silnych, to w sy-

mulowaniu procesów elektromagnetycznych w urządzeniach spawalniczych podstawowe znaczenie ma ten ostatni model.

Po przyjęciu odpowiednich założeń upraszczających i zastosowanych przekształceniach [7] uzyskuje się znane modele Cassiego:

- w postaci konduktancyjnej

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_C} \left(\frac{u_{kol}^2}{U_C^2} - 1 \right) \quad (2)$$

- w postaci rezystancyjnej

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{\theta_C} \left(1 - \frac{u_{kol}^2}{U_C^2} \right) \quad (3)$$

Jeśli dodatkowo uwzględnimy dyssypację energii promieniowaniem plazmy P_{rad} , to równanie (1) przyjmuje postać

$$P_{kol} = u_{kol} i = (P_{kon} + P_{rad}) + \frac{dQ}{dt} \quad (4)$$

Stąd otrzymujemy zmodyfikowane modele Cassiego [8, 9]:

- w postaci konduktancyjnej:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_C} \left(\frac{u_{kol}^2}{U_C^2} - 1 - \frac{P_{rad}}{gU_C^2} \right) \quad (5)$$

- w postaci rezystancyjnej:

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{\theta_C} \left(1 + \frac{rP_{rad}}{U_C^2} - \frac{u_{kol}^2}{U_C^2} \right) \quad (6)$$

Na podstawie danych eksperymentalnych [3, 10] można zastosować aproksymację funkcji mocy P_{rad} wielomianem drugiego stopnia prądu wyładowania. W najprostszym przypadku przyjmijmy zgrubnie wyrażenie:

$$P_{rad}(i) = K_R i^2 = K_R \cdot (u_{kol} g)^2 = K_R \cdot \left(\frac{u_{kol}}{r} \right)^2 \quad (7)$$

Wtedy równania różniczkowe (5) i (6) można zapisać w następujących postaciach [11]:

- konduktancyjnej:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_C} \left[\frac{u_{kol}^2}{U_C^2} (1 - K_R g) - 1 \right] \quad (8)$$

- rezystancyjnej:

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{\theta_C} \left[1 - \frac{u_{kol}^2}{U_C^2} \left(1 - K_R \frac{1}{r} \right) \right] \quad (9)$$

3. MODEL HYBRYDOWY TWV KOLUMNY ŁUKU O PODWYŻSZONEJ EMISYJNOŚCI PLAZMY

Wykorzystanie w spawalnictwie łuku elektrycznego o zmiennej polaryzacji napięcia lub prądu impulsowego o prawie zerowych wartościach minimalnych powoduje trudności w dokładnym odwzorowaniu charakterystyk dynamicznych wyładowania za pomocą klasycznych (2), (3) i zmodyfikowanych (8), (9) modeli Cassiego. Z kolei sam model Mayra, choć stosunkowo dobrze odwzorowuje procesy w zakresie słabych prądów, to niedokładnie opisuje charakterystyki w zakresie prądów silnych. Z tego powodu opracowano kilka wariantów modyfikacji znanych modeli tworząc połączenia szeregowo nieliniowych rezystancji (Habedanka) lub równoległe nieliniowych konduktancji (hybrydowe TWV) [12].

W modelu hybrydowym TWV łuku udziały prądów płynących przez konduktancje zależą od ich wypadkowej wartości. Można więc zapisać

$$i(t) = u g_{kol} = u \cdot g_M \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) + u \cdot g_C \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)\right) \quad (10)$$

Stąd otrzymujemy

$$g_{kol}(t) = g_M(t) \cdot \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) + g_C(t) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)\right) \quad (11)$$

Warunki wyboru modeli są następujące:

- model Mayra

$$g_{kol}(t) \approx g_M(t) = \frac{i_M^2}{P_M} - \theta_M \frac{dg_M}{dt}, \quad \text{jeśli } i < I_0 \quad (12)$$

- model Cassiego

$$g_{kol}(t) \approx g_C(t) = \frac{u_{kol} i_C}{U_C^2} - \theta_C \frac{dg_C}{dt}, \quad \text{jeśli } i > I_0 \quad (13)$$

W łukach spawalniczych [13, 14] i piecowych [4] wartość prądu granicznego I_0 wynosi około 5 A. Jeżeli używa się modelu TWV do aproksymacji charakterystyk lamp łukowych wysokoprężnych, to wartość I_0 jest ponad dziesięciokrotnie mniejsza.

Zintegrowany model hybrydowy kolumny łuku w postaci konduktancyjnej ma postać [12]

$$g_{kol}(t) = G_{\min} + \left[1 - \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{u_{kol} i}{U_C^2} + \left[\exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i^2}{P_M} - \theta \frac{dg_{kol}}{dt} \quad (14)$$

gdzie:

G_{\min} – stała konduktancja zależna od odległości między elektrodami, kształtu i rozmieszczenia elektrod, rodzaju gazu i temperatury środowiska w chwilach bezprądowych;

I_0 – prąd przejścia między modelami Cassie'go i Mayra.

W ogólnym przypadku funkcja tłumienia θ zależy od prądu i

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 \exp(-\alpha|i|) \quad (15)$$

Przy czym, jeśli prąd jest stosunkowo mały, to można przyjąć $\theta \approx \theta_1$, a jeśli duży, to można przyjąć $\theta \approx \theta_0$. Jeżeli $\theta \rightarrow 0$, to charakterystyka statyczna wynika z przyjętych założeń dotyczących udziału poszczególnych modeli składowych:

- jeśli $|i| < I_0$ i $dg/dt = 0$, to $u = P_M/i$
- jeśli $|i| > I_0$ i $dg/dt = 0$, to $u = U_C \text{sign}(i)$

Ze względu na zależność mocy promieniowania łuku od natężenia prądu [10] praktycznie uzasadniona jest modyfikacja tylko modelu Cassiego. Wtedy gałąź z odpowiednią składową konduktancji kolumny łuku opisuje równanie

$$g_{kol}(t) \approx g_C(t) = \frac{u_{kol} i_C}{U_C^2} - \frac{P_{rad}}{U_C^2} - \theta_C \frac{dg_C}{dt}, \text{ jeśli } i > I_0 \quad (16)$$

Model hybrydowy kolumny łuku uwzględniający podwyższoną radiację ma postać

$$g_{kol}(t) = G_{\min} + \left[1 - \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \right] \cdot \left(\frac{u_{kol} i}{U_C^2} - \frac{P_{rad}}{U_C^2} \right) + \left[\exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i^2}{P_M} - \theta \frac{dg_{kol}}{dt} \quad (17)$$

Jeśli przyjąć aproksymację funkcji mocy promieniowania (7), to otrzymamy

$$g_{kol}(t) = G_{\min} + \left[1 - \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \right] \cdot \frac{u_{kol} i - K_r i^2}{U_C^2} + \left[\exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i^2}{P_M} - \theta \frac{dg_{kol}}{dt} \quad (18)$$

4. IMPLEMENTACJA ZMODYFIKOWANEGO HYBRYDOWEGO MODELU TWV ŁUKU W PROGRAMIE MATLAB-SIMULINK

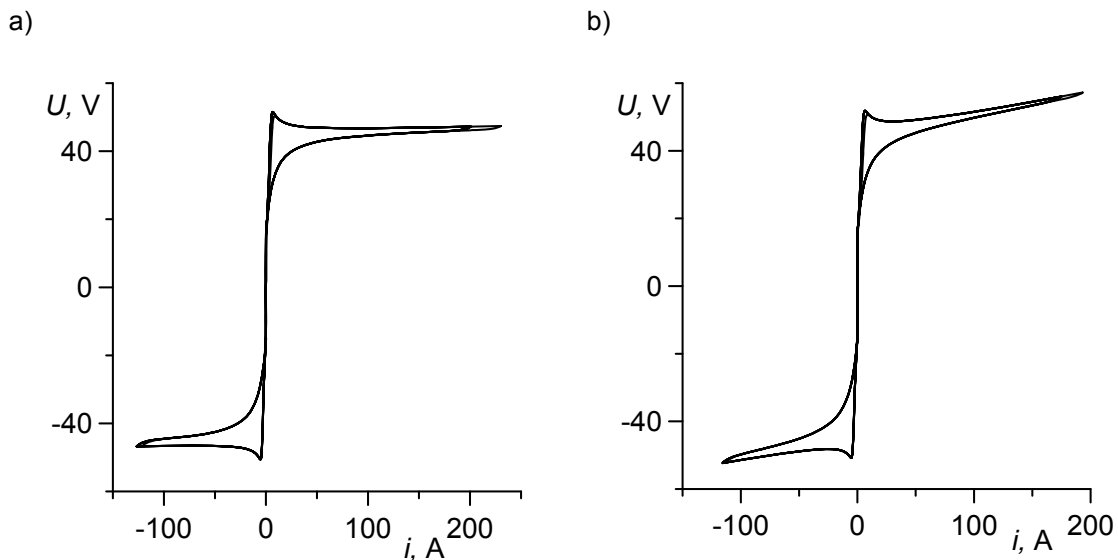
Pełny model łuku elektrycznego zawiera oprócz konduktancji kolumny także nieliniową konduktancję odwzorowującą przyelektrodowe spadki napięcia (przyanodowy U_A i przykatodowy U_K). Taką dodatkową konduktancję g_E określa zależność:

$$g_E = \frac{i}{U_K + U_A} = \frac{i}{U_E} \quad (19)$$

Jest ona połączona szeregowo z nieliniową konduktancją kolumny łukowej g_{kol} . Wtedy konduktancja wypadkowa wynosi

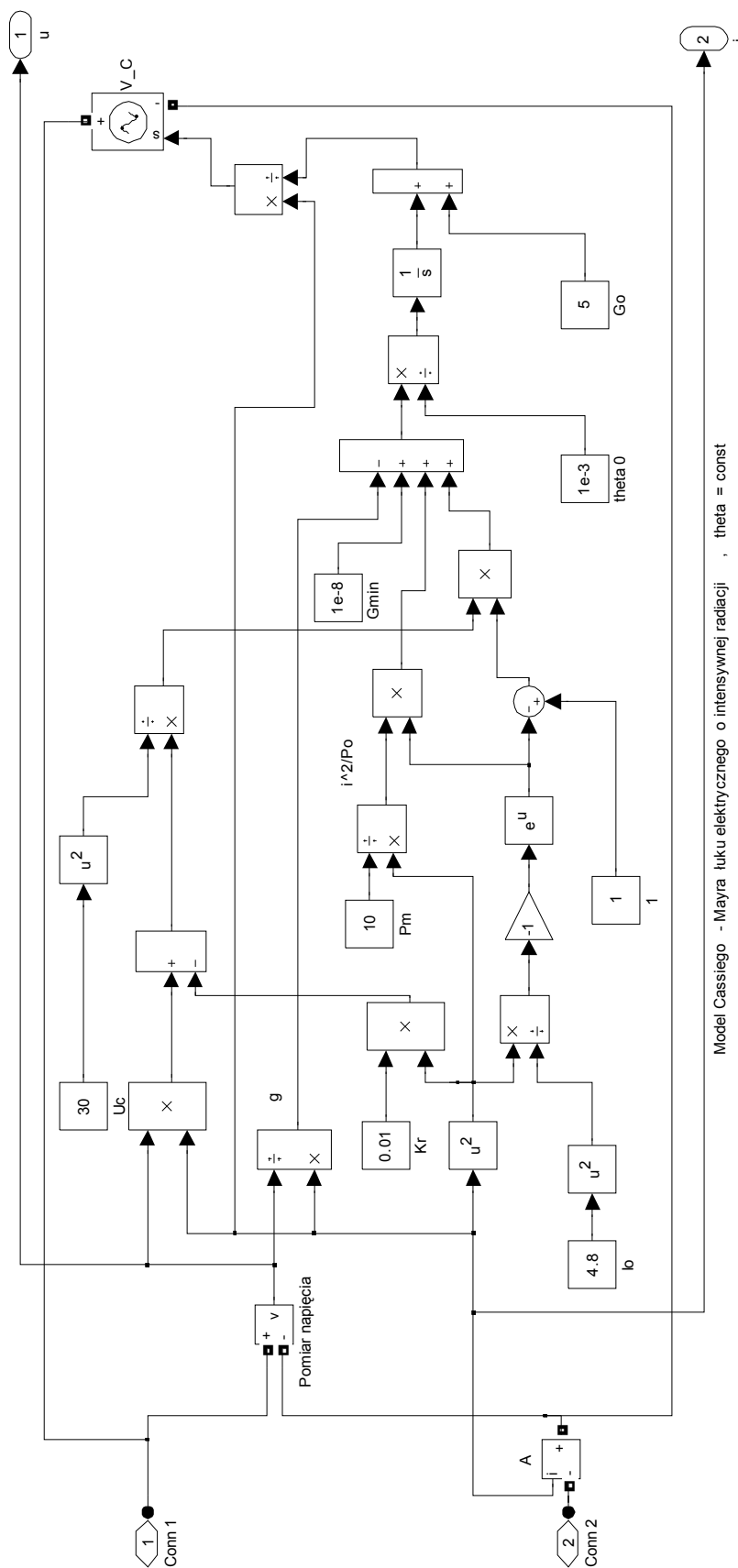
$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_E} + \frac{1}{g_{kol}} \quad (20)$$

Schematy odpowiednich makromodeli Cassiego łuku o podwyższonej emisyjności w programie MATLAB-Simulink zamieszczono w [11]. Natomiast tutaj na rysunku 1 pokazano efekty symulacji łuku w obwodzie z wymuszeniem impulsowym. W modelu uwzględniono sumę przyelektrodowych spadków napięcia $U_{AK} = 14 \text{ V}$ oraz parametry prostego obwodu szeregowego zasilającego łuk: $E_{\min} = -70 \text{ V}$, $E_{\max} = 80 \text{ V}$, wypełnienie 50%; $R = 0,02 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$, $f = 66,6 \text{ Hz}$. Założone parametry modelu były następujące: $U_C = 30 \text{ V}$; $\theta_C = 1e-4 \text{ s}$.

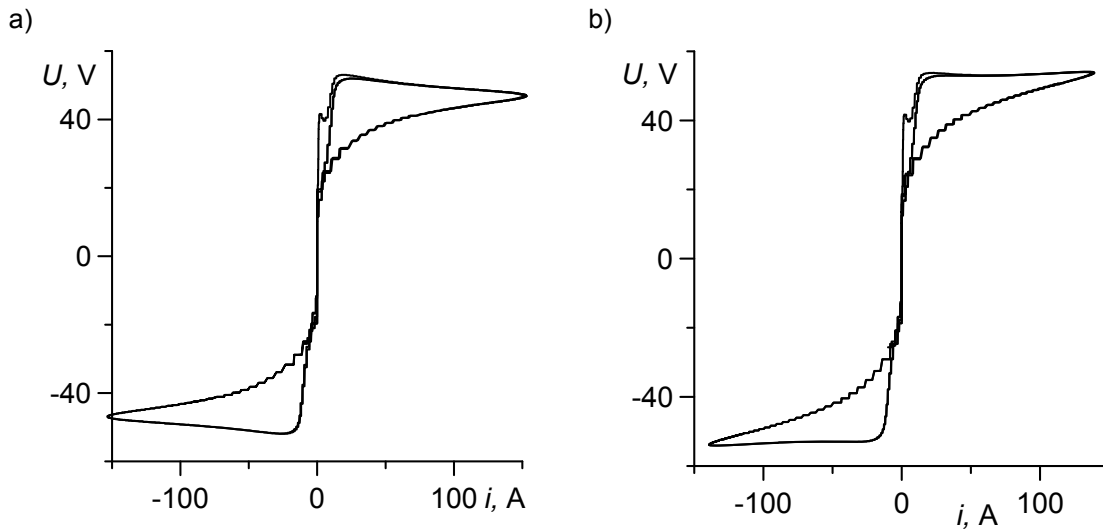


Rys. 1. Wyniki symulacji charakterystyk dynamicznych w obwodzie ze zmodyfikowanymi makromodelami Cassiego łuku promieniującego i wymuszeniem impulsowym asymetrycznym: a) $K_r = 0,01 \text{ V/A}$; b) $K_r = 0,1 \text{ V/A}$

Na podstawie równania (18) opracowano makromodel hybrydowy TWV łuku o podwyższonej emisyjności, który pokazano na rysunku 2. Wyniki symulacji łuku w obwodach z wymuszeniami sinusoidalnymi zamieszczono na rysunku 3. W modelu uwzględniono sumę przyelektrodowych spadków napięcia $U_{AK} = 14 \text{ V}$ oraz parametry prostego obwodu szeregowego zasilającego łuk: $E = 75 \text{ V}$, $R = 0,2 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Założone parametry modelu były następujące: $U_C = 30 \text{ V}$; $P_M = 20 \text{ W}$; $I_0 = 4,8 \text{ A}$; $\theta_C = 2e-4 \text{ s}$; $G_{\min} = 1e-8 \text{ S}$.

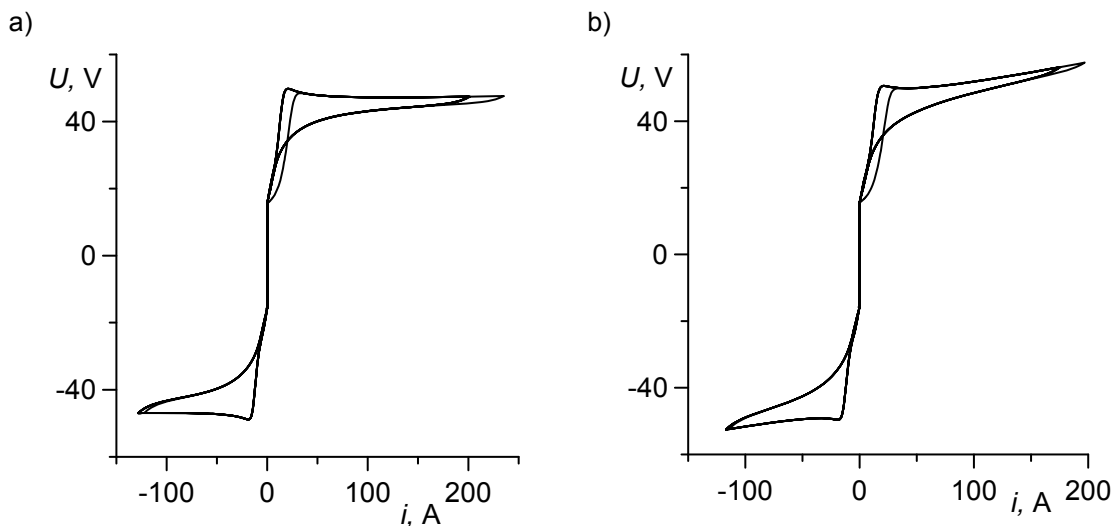


Rys. 2. Schemat zmodyfikowanego makromodelu TWV łuku promieniującego



Rys. 3. Wyniki symulacji charakterystyk dynamicznych w obwodzie ze zmodyfikowanym makromodelem TWV łuku promieniującego i wymuszeniem sinusoidalnym:
a) $K_r = 0,01$ V/A; b) $K_r = 0,1$ V/A

Ten sam zmodyfikowany makromodel hybrydowy TWV został włączony w obwód zasilania impulsowego, jak dla rysunku 1. Wyniki symulacji pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Wyniki symulacji charakterystyk dynamicznych w obwodzie ze zmodyfikowanym makromodelem TWV łuku promieniującego i wymuszeniem impulsowym asymetrycznym: a) $K_r = 0,01$ V/A; b) $K_r = 0,1$ V/A

Zgodnie z oczekiwaniami uwzględnienie dodatkowej radiacji termicznej powoduje wzrost rezystancji statycznej i dynamicznej łuku. W większości urządzeń

spawalniczych przebiegi eksperymentalne napięcia w otoczeniach ekstremalnych wartości prądu wykazują plateau, a nawet spadek. Z tego powodu wartości współczynnika K_R należy dobierać bardzo małe. Potwierdza to hipotezę o ograniczonej roli emisji promieniowania plazmy z powierzchni kolumny łukowej w bilansie energetycznym łuku [15]. Ze wzrostem temperatury plazma z optycznie cienkiej przekształca się w plazmę coraz bardziej optycznie grubą. Dzięki temu duża część (ponad 99%) promieniowania emitowanego przez plazmę łukową jest ponownie przez nią przechwytywana zanim dotrze ona do warstwy brzegowej. Dlatego w obliczeniach dodatkowo powiększa się współczynnik przewodnictwa cieplnego plazmy [1]. Łuk kieruje więc strumień tej energii bardzo intensywnie w kierunku powierzchni płam elektrodowych. Nawet łuk swobodny jest bardzo skutecznym instrumentem konwersji energii elektrycznej w ciepło i jego dostarczycielem do jeziora spawalniczego.

5. WNIOSKI

1. Wprowadzenie modyfikacji modeli Cassiego i hybrydowego Cassiego-Mayra przez uwzględnienie charakterystyk promieniowania cieplnego plazmy termicznej umożliwia dokładniejsze odwzorowanie procesów w urządzeniach spawalniczych z łukiem elektrycznym.
2. Wprowadzenie modyfikacji modelu Cassiego-Mayra rozszerza jego przydatność do symulowania stanów pracy urządzeń spawalniczych z łukiem o podwyższonej emisyjności, a więc łukiem wysokiego ciśnienia lub z plazmą domieszkowaną.
3. Opracowane modele matematyczne i makromodele hybrydowe Cassiego-Mayra w programie MATLAB-Simulink mogą być wykorzystywane do obliczania złożonych układów zasilania i sterowania urządzeń spawalniczych z łukiem o podwyższonej emisyjności cieplnej.

Praca naukowa finansowana ze środków MNiSzW na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy Nr N N511 305038.

LITERATURA

1. Krouchinin A.M., Sawicki A.: A theory of electrical arc heating. The Publishing Office of Technical University of Częstochowa, Częstochowa 2003.
2. Kruczynin A.M., Sawicki A.: Podstawy projektowania układów dynamicznych z łukiem elektrycznym. Seria Monografie, nr 96, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.

3. Li P. J., Zhang Y. M.: Analysis of an arc light mechanism and its application in sensing of the GTAW process. *Welding Research Supplement* 2000, September, pp. 252s-260s.
4. Węglowski M.S.: Measurement of arc light spectrum in the MAG welding method. *Metrol. Meas. Syst.* vol. XVI, no. 1, pp. 143–159, (2009).
5. Węglowski M.S.: Investigation on the arc light spectrum in GTA welding. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 20, issues 1-2, pp. 519-522, January-February, 2007.
6. Węglowski M.S.: Promieniowanie widzialne użytecznym sygnałem w monitorowaniu procesu spawania. *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, nr 10, s. 14-19, 2006.
7. Ciok Z.: *Modele matematyczne łuku łączeniowego*. Politechnika Warszawska, Warszawa 1995.
8. Ziani A., Moulai H.: Extinction properties of electric arcs in high voltage circuit breakers. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 42, pp. 1-6, (2009).
9. Ziani A., Moulai H.: Thermal Radiation Effect on the Extinction Properties of Electric Arcs in HV Circuit Breakers. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 105-117, May 2009.
10. Iwao T., Miyazaki H., Hayashi T., Hirano T., Inaba T.: Radiation power emitted from Ar torch short plasma as a function of input power in several kW. *Vacuum* 59, pp. 88-97, (2000).
11. Sawicki A.: Symulowanie procesów w obwodzie z łukiem o podwyższonej radiacji termicznej z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu Cassiego. *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, nr 3, s. 27-31, 2011.
12. King-Jet Tseng, Yaoming Wang D.: Mahinda Vilathgamuwa: An Experimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 429-436, 1997.
13. Sawicki A., Świtoń Ł.: Badania eksperymentalne i symulacje procesów w obwodzie prądu przemiennego z modelami łuku Cassiego i Mayra. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, nr 5, s. 59-61, 2009.
14. Sawicki A., Świtoń Ł., Sosiński R.: Process Simulation in the AC Welding Arc Circuit Using a Cassie-Mayr Hybrid Model. *Supplement to the Welding Journal*, pp. 41-44, March 2011.
15. Jones R.T., Reynolds Q.G., Curr T.R., Sager D.: Some myths about DC arc furnaces. *Southern African Pyrometallurgy* 2011, Edited by R.T. Jones & P. den Hoed, Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, 6–9 March 2011.

Rękopis dostarczono 04.07.2011

ABOUT USING OF MODIFIED CASSIE AND HYBRID TWV MODELS OF RADIATING ARC TO SIMULATE PROCESSES IN WELDING DEVICES

ABSTRACT *The study identified root causes of searching for modified mathematical arc models that enhance abilities to simulate energy processes in welding devices. Ways of modifying Cassie and*

hybrid models have been described that consider power dissipation characteristics of plasma heat radiation. Implementation of these models have been done in MATLAB-Simulink. Simulation of processes in circuits with impulse coercion and modified arc models have been done. Usefulness of developed models for computing working states of welding devices with arc of increased radiation intensity have been proven.

