

MODEL HYBRYDOWY ŁUKU DO BADANIA ODDZIAŁYWANIA ODBIORNIKA PLAZMOWEGO GLIDING ARC NA SIEĆ ZASILAJĄCĄ

Antoni SAWICKI¹, Sławomir GRYŚ²

1. Stowarzyszenie Elektryków Polskich (NOT), Częstochowa
tel.: +48 343244654 e-mail: sawicki.a7@gmail.com
2. Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej
tel.: +48 343250883 e-mail: grys@el.pcz.czest.pl

Streszczenie: Na podstawie analizy warunków pracy plazmotronu gliding arc zaproponowano zastosowanie zmodyfikowanego modelu Woronina łuku elektrycznego do symulacji procesów w układzie zasilania łuku. Postać hybrydowa modelu umożliwi jego wykorzystanie w szerokim zakresie prądu roboczego. Ponadto model ten uwzględni dynamikę zmian długości kolumny plazmowej. Przeprowadzone symulacje wykazały efektywność stosowania opracowanego makromodelu oraz umożliwiły zbadanie wpływu plazmotronu na sieć zasilającą w warunkach braku i stosowania różnego rzędu filtrów biernych.

Słowa kluczowe: łuk elektryczny, model Woronina, model hybrydowy.

1. WSTĘP

W zależności od budowy i działania urządzenia elektrotechnologicznego łuk elektryczny może mieć parametry quasi stałe lub zmienne. W pierwszym przypadku podejmowanych jest wiele działań stabilizujących wyładowanie, które powinny zapewniać stałą długość i stały przekrój kolumny, stałą zdolność emisyjną katody, stałe warunki przekazywania ciepła z łuku do otoczenia itd. Efektywność takich działań zależy także od stabilizacji parametrów źródeł zasilających w energię elektryczną i w gazy technologiczne. Jeśli parametry kolumny ulegają zmianom, to może się to odbywać losowo lub w sposób zadany. Losowy przypadek zmiany długości kolumny zwykle odpowiada łukom swobodnym [1, 2]. Zmiany parametrów łuku mogą wynikać ze zmiennych oddziaływań zewnętrznych na kolumnę łukową, na elektrody lub na źródła zasilania.

Podstawową cechą łuku elektrycznego jest występowanie zjawisk kolektywnych w plazmie równowagowej. Jeśli wprowadzane zaburzenia mają wysoką częstotliwość, to zwykle plazma traci cechy równowagowej. Możliwym wyładowaniem elektrycznym dużej mocy generującym plazmę nierównowagową jest iskra elektryczna. W plazmo-tronach gliding arc odbywa się nie tylko nagrzewanie gazu przez wydłużający się łuk elektryczny, ale także oddziaływanie chemiczne szybko zanikającej plazmy z przepływającym gazem. Dlatego takie urządzenia plazmowe dużej mocy znalazły zastosowanie w przemyśle chemicznym i w ochronie środowiska. Z punktu widzenia oddziaływania zewnętrznego na gaz i na sieć elektryczną kojarzą więc efekty urządzenia łukowego

i iskrowego. W zależności od mocy znamionowej budowane są one jako odbiorniki jednofazowe, trójfazowe lub nawet sześciofazowe [3]. Zasilenie odbiornika gliding arc może się odbywać ze źródła napięcia stałego [4].

Modele matematyczne łuku, przeznaczone do symulacji procesów elektromagnetycznych w sieciach zasilających plazmotrony gliding arc, powinny uwzględniać zarówno powolne, jak i szybkie zmiany długości kolumny plazmowej. Najczęściej są to proste modyfikacje znanych modeli Mayra lub Cassiego [5, 6].

2. WARUNKI ZASILANIA PLAZMOTRONÓW GLIDING ARC

W stanach pracy normalnej plazmotronów gliding arc odbywają się okresowe procesy powstawania, rozwoju i zaniku wyładowania. Przy czym każdy z nich zachodzi w innej części kanału wyładowczego reaktora. Po zapłonie wyładowania w części początkowej następuje przemieszczanie się kolumny zgodnie ze ślizgającymi się plamami łukowymi po powierzchniach (krawędziach) elektrod roboczych. Rozwojowi wyładowania odpowiada wydłużanie kolumny aż do osiągnięcia obszaru gaszenia. Praca okresowa reaktora wymaga niemal natychmiastowego powtórnego zapłonu wyładowania [7]. Ponieważ do zasilania takich plazmotronów stosowane jest stosunkowo niskie napięcie (nie przewyższające 1,5 kV), to nie jest możliwy powrotny samozapłon łuku. Dlatego ze względu na procesy rozpadu kolumny i dejonizacji plazmy czas martwy między wyładowaniami powinien być jak najkrótszy. W tym celu stosuje się dodatkowe układy zapłonowe. Ich najprostszym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest dodatkowa elektroda umieszczona w części początkowej kanału i zasilana z generatora wysokiego napięcia (powyżej 10 kV), połączonego z punktem neutralnym transformatora trójfazowego. Jednak takie rozwiązanie wprowadza silne zakłócenia do obwodów przekształtnika elektronicznego i do sieci zasilającej. Dlatego w pracy [7] zaproponowano wprowadzenie dodatkowego układu zawierającego parę elektrod zapłonowych podłączonych do izolowanego źródła zasilania wysokiego napięcia i wysokiej częstotliwości.

Skład chemiczny mieszaniny gazowej wpływa na pracę urządzenia. Minimalna wartość napięcia, które spowoduje zapłon oraz napięcie, które podtrzymuje wyładowanie łukowe między elektrodami roboczymi reaktora plazmo-

wego, są różne w przypadkach stosowania różnych gazów roboczych. Wtedy ulegają zmianie: wygląd wyładowania (barwa, jasność, rozmycie), kształty przebiegów napięcia i zawartość harmonicznych oraz stabilność. Na wyładowanie wpływa również prędkość przepływu czynnika gazowego. Większej prędkości gazu odpowiada wyższe napięcie zapłonu, szybsze przemieszczanie się kolumny łuku, i ze względu na pogorszoną stabilność - łatwiejszy rozpad kolumny łukowej. W przypadkach niewystarczającej skuteczności obróbki chemicznej gazów przez pojedynczy plazmotron, stosowane są szeregowo lub równoległe połączenia reaktorów w odpowiednich rurociągach sieci gazowej. Jeśli plazmotrony są zasilane ze źródeł napięcia stałego, to można zintensyfikować przemieszczanie i wydłużanie kolumny łuku przez zastosowanie dodatkowych układów magnetycznych [8]. Pomimo symetrycznej konstrukcji trójfazowego reaktora plazmowego, stanowi on obciążenie nieliniowe i asymetryczne. Ze względu na wysoki poziom i szerokie widmo generowanych zakłóceń elektromagnetycznych klasyczne układy filtrujące są mało skuteczne w ochronie sieci zasilających [9, 10].

3. MODELE MATEMATYCZNE ŁUKU ROZCIĄGANEGO

Ze względu na wymaganą stabilność wyładowania [11] zasilanie łuków elektrycznych odbywa się zwykle ze źródeł prądowych lub quasi prądowych. Dlatego wydłużenie kolumny łukowej wpływa na wzrost napięcia na zaciskach reaktora plazmowego. Odbywa się to zarówno w stanach pracy statycznej, jak i dynamicznej. Zależność na charakterystykę napięciowo-prądową statyczną wyładowania łukowego podała Herta Ayrton

$$U = A + B \cdot I + \frac{C + D \cdot l}{I} \quad (1)$$

gdzie: A , B , C i D - stałe wyznaczone eksperymentalnie, I - prąd łuku, l - długość kolumny plazmowej. Zmiana czasowa długości kolumny prowadzi do zmian czasowych napięcia. Jeśli te zmiany odbywają się ze stosunkowo niską częstotliwością, a źródło zasilania charakteryzuje się dobrą stabilizacją prądu, to zależność (1) może mieć postać

$$u(t) = A + B I(t) + \frac{C + D I(t)}{I} \quad (2)$$

Jednak zwykle stosuje się źródła prądowe nieidealne lub nawet prądu zmiennego. Wtedy zależność (2) przekształca się do postaci

$$u(t) = A + B I(t) + \frac{C + D I(t)}{i(t)} \quad (3)$$

Zmiana długości kolumny łuku zależy od kąta rozchylenia elektrod β plazmotronu, prędkości przepływu gazu v_g i czasu t trwania wyładowania [6]

$$l = l_0 + \beta v_g t \quad (4)$$

gdzie: l_0 - początkowa odległość elektrod w miejscu zapłonu wyładowania. Zwykle zakłada się, że prędkość przesuwania się kolumny plazmy jest równa prędkości gazu, a kolumna ma kształt części okręgu opartego na kącie β rozchylenia

elektrod. Ze względu na duże wartości napięcia łuku, składowe napięcie przyelektrodowych są zwykle pomijane.

Do opisu stanów dynamicznych łuku zasilanego prądem zmiennym stosuje się modele w postaci równań różniczkowych. Najczęściej są to równania o postaciach Mayra, Cassiego lub ich modyfikacje, a nawet skojarzenia w modele hybrydowe. Jednak modyfikacje gotowych równań różniczkowych mogą niekiedy prowadzić do błędów w równaniach wejściowych, opisujących bilans mocy. Zwykle do celów modelowania łuku plazmotronów gliding arc stosuje się uzmiennianie parametrów, przez wprowadzenia ich związków z długością kolumny [5-7]. Istnieją jednak modele, które już w założeniach wejściowych uwzględniają dynamikę zmian długości i przekroju kolumny. Do nich należy model Woronina [12-15].

W modelu Woronina przyjmuje się następujące założenia upraszczające: kolumna łuku ma kształt cylindryczny o jednakowym przekroju względem całej osi, plazma jest jednorodna względem powierzchni przekroju i osi łuku, rozpraszanie ciepła odbywa się tylko z powierzchni bocznej łuku, w czasie mogą zmieniać się długość i przekrój kolumny łuku. Jako podstawę tworzonego modelu wprowadza się uproszczone równanie bilansu cieplnego kolumny łuku

$$\frac{dQ}{dt} = P_{el} - P_{dis} = u_{col} i - P_{dis} \quad (5)$$

gdzie: Q - entalpia plazmy, J; P_{el} - moc elektryczna dostarczona do kolumny, W; P_{dis} - moc cieplna rozpraszana z kolumny łuku, W; u_{col} - napięcie na kolumnie, V. Ponadto wprowadza się następujące oznaczenia:

$$Q = q_v V = q_v l S \quad (6)$$

$$g = \frac{\sigma S}{l} \quad (7)$$

$$P_{dis} = P_s(l, S) = p_s S_s = p_s l \sqrt{4\pi S} \quad (8)$$

gdzie: q_v - gęstość objętościowa entalpii, J/m³; σ - konduktywność właściwa kolumny łukowej, S/m; l - długość kolumny łuku, m; p_s - gęstość powierzchniowa mocy rozpraszanej przez powierzchnię boczną kolumny, W/m²; S - pole powierzchni przekroju poprzecznego łuku, m²; S_s - pole powierzchni bocznej łuku, m²; $S_s = l \sqrt{4\pi S}$. Konduktancja łuku jest funkcją entalpii plazmy $g = F(Q)$. Jeśli przyjąć założenie Mayra

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{q_v}{q_0}\right) \quad (9)$$

gdzie: σ_0 i q_0 - współczynniki aproksymacji, to równanie modelu dynamicznego łuku ze zmieniającymi się rozmiarami geometrycznymi $S(t)$ i $l(t)$ ma postać

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_s(S)} \left(\frac{u_{col} i}{P_s(l, S)} - 1 \right) - \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} \left(1 + \ln \frac{gl}{\sigma_0 S} \right) + \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} \left(1 - \ln \frac{gl}{\sigma_0 S} \right) \quad (10)$$

gdzie $\theta_s(S) = \frac{q_0}{p_s} \sqrt{\frac{S}{4\pi}}$.

W szczególnych przypadkach rozmiary geometryczne kolumny mogą być stałe ($dl/dt = 0$, $dS/dt = 0$). Wtedy to równanie można sprowadzić do modelu Mayra (moc Mayra

$P_M = P_S = \text{const}$) lub modelu Cassiego ($P_S = U_C^2 g$, napięcie Cassiego $U_C = \text{const}$) z odpowiednimi stałymi czasowymi $\theta_M = 2\theta_C = \text{const}$ [16].

Zakładamy, że w zależności od wartości natężenia prądu moc dyssypacji może odpowiadać zmodyfikowanym modelom Mayra lub Cassiego. Wtedy otrzymamy model hybrydowy [16] analogiczny do opisanego w [17]

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_S(i)} \left[\frac{u_{col} i}{g U_C^2(l, S)} (1 - \varepsilon(i)) + \left(\frac{u_{col} i}{P_M(l, S)} + \frac{G_{min}}{g} \right) \varepsilon(i) - 1 \right] + \left(1 + \ln \frac{gl}{\sigma_0 S} \right) + \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} \left(1 - \ln \frac{gl}{\sigma_0 S} \right) \quad (11)$$

gdzie: g – konduktancja modelu kolumny łuku, S ; $G_{min} > 0$ S – minimalna wartość konduktancji podczas chwilowego zaniku prądu, S; $\varepsilon(0) = 1$ i $\varepsilon(\infty) = 0$. W zależności od rodzaju łuku elektrycznego i wymaganej dokładności aproksymacji funkcja wagowa ε może mieć różną postać analityczną [16]. Jeśli w łuku następuje zwiększenie mocy dyssypacji na skutek wzmożonych efektów radiacji i konwekcji, to wprowadza się dodatkowy składnik P_{ri} do podmodelu Cassiego wchodzącego w skład modelu hybrydowego

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_S(i)} \left[\frac{u_{col} i}{g U_C^2(l, S) + P_{ri}(i)} (1 - \varepsilon(i)) + \left(\frac{u_{col} i}{P_M(l, S)} + \frac{G_{min}}{g} \right) \varepsilon(i) - 1 \right] + \left(1 + \ln \frac{gl}{\sigma_0 S} \right) + \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} \left(1 - \ln \frac{gl}{\sigma_0 S} \right) \quad (12)$$

Model ten ujmuje składową resztkową konduktancji. Funkcja tłumienia łuku jest silnie nieliniowa i może być aproksymowana zależnością [17]

$$\theta(i) = \theta_{i0} + \theta_{i1} \exp(-\alpha_i |i|) \approx \begin{cases} \theta_{i1}, & \text{jeśli } |i| \text{ jest mała} \\ \theta_{i0}, & \text{jeśli } |i| \text{ jest duże} \end{cases} \quad (13)$$

gdzie: $\alpha_i > 0$, $\theta_{i1} \gg \theta_{i0} > 0$ s - stałe współczynniki aproksymacji.

W pracy [17] założono także funkcję wagową wyrażoną za pomocą krzywej Gaussa

$$\varepsilon(i) = \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \quad (14)$$

gdzie I_0 – prąd przełączania między podmodelami. Charakterystyka mocy rozpraszanej może być aproksymowana zależnością

$$P_{ri}(i) = a_{i1} |i| + a_{i2} i^2 \quad (15)$$

gdzie stałe współczynniki są wyrażone: a_{i1} w V; a_{i2} w Ω .

Napięcie na kolumnie w zakresie silnoprądowym zależy od jej długości $U_C \approx El$ ($E = \text{const}$ – gradient napięcia na kolumnie), stąd

$$P_{disC} = g U_C^2 = \frac{\sigma S}{l} (El)^2 = (\sigma S E^2) \cdot l = a_l(S) l \quad (16)$$

W zakresie słaboprądowym będzie

$$P_{disM} = p_S \sqrt{4\pi S} l = b_l(S) l \quad (17)$$

gdzie: $a_l(S) = \sigma S E^2$, $b_l(S) = p_S \sqrt{4\pi S}$. Ponieważ w punkcie przełączania między podmodelami zachodzi równość mocy dyssypacji

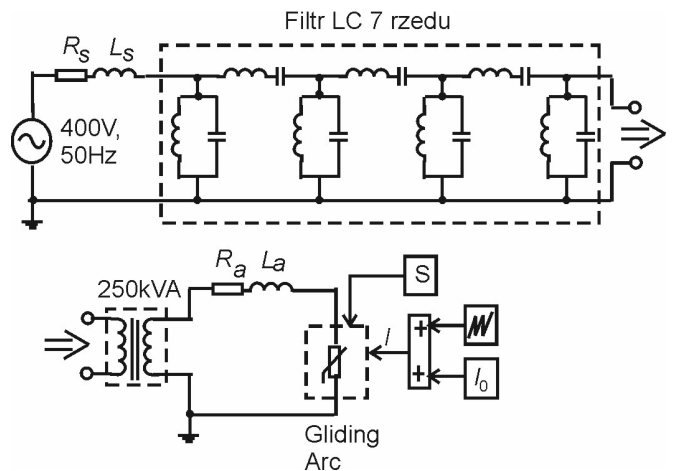
$$P_{disC}(I_0) = U_C I_0 = P_{disM}(I_0) \quad (18)$$

to w modelach (11) i (12) można wykorzystać zależność na określenie prądu granicznego

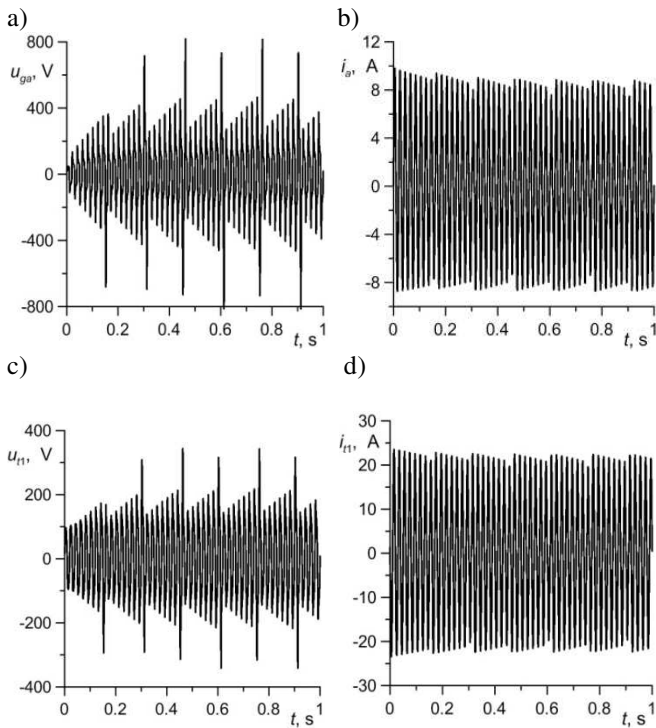
$$I_0 = \frac{P_{disM}}{U_C} = \frac{b_l(S)}{E} \quad (19)$$

4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH PRACY PLAZMOTRONU GLIDING ARC W SIECI ZASILAJĄCEJ

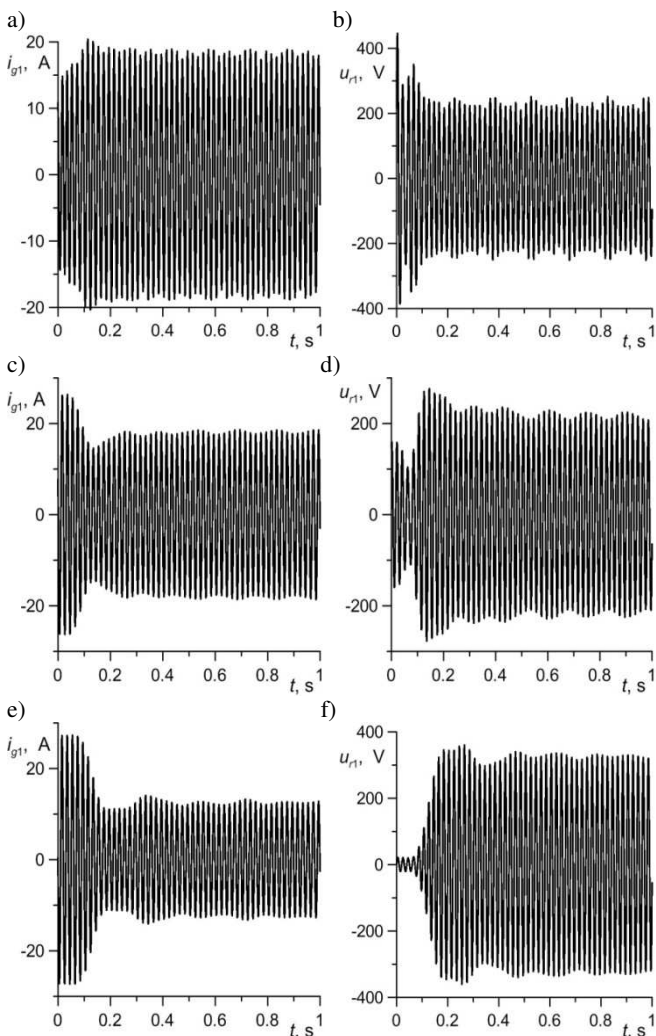
W modelowaniu plazmotronu gliding arc założono, że zawiera on układ zapłonowy składający się z pary dodatkowych elektrod i własnego źródła zasilania wysokim napięciem o podwyższonej częstotliwości. Ułatwia to zapłon łuku i polepsza bezpieczeństwo obsługi. Reaktor jest zasilany z sieci o napięciu 400 V i częstotliwości 50 Hz poprzez gałąź składającą się z szeregowo połączonych elementów RL ($R_s = 20 \Omega$ i $L_s = 1 \cdot 10^{-3}$ H) modelujących parametry sieci przesyłowej (rys. 1). W celu dopasowania napięciowego zastosowano transformator jednofazowy o mocy $S = 250$ kVA i przekładni napięciowej 400/1000 V. Parametry względne transformatora miały wartości ($R_1 = R_2 = 0,002$, $L_1 = L_2 = 0,08$, $R_m = 500$, $L_m = 500$). Zmiany długości kolumny odbywały się okresowo. W tym celu zastosowano generator przebiegu piłokształtnego o amplitudzie 0,1 m i czasie trwania pojedynczego impulsu 0,15 s. Z tego wynika przyjmowana wartość $\beta v = 0,6(6)$ m/s. Minimalna długość łuku wynosiła $l_0 = 0,006$ m. W modelu łuku zadano następujące parametry: $U_{AK} = 18$ V, $\sigma_0 = 150 \cdot 10^3$ S/m, $\theta_{i0} = 2 \cdot 10^{-4}$ s, $\theta_{i1} = 1 \cdot 10^{-3}$ s, $\alpha_i = 0,0625$ A⁻¹, $I_0 = 16$ A, $G_{min} = 2 \cdot 10^{-3}$ S, $a_l = 3,5 \cdot 10^5$ W/m, $b_l = 4 \cdot 10^4$ W/m, $a_{i1} = 0,1$ V; $a_{i2} = 0,02$ W/A², $S = 3 \cdot 10^{-3}$ m².



Rys. 1. Schemat ideowy układu zasilania plazmotronu gliding arc



Rys. 2. Wyniki symulacji procesów w układzie zasilania plazmotronu gliding arc: a) przebieg napięcia na łuku; b) przebieg prądu łuku; c) przebieg napięcia po stronie pierwotnej transformatora; d) przebieg prądu po stronie pierwotnej transformatora



Rys. 3. Przebiegi prądów i napięć na wejściu filtrów biernych LC: a) filtru 3-go rzędu; b) filtru 5-go rzędu; c) filtru 7-go rzędu

Na rysunku 2 pokazano wyniki symulacji procesów w układzie zasilania plazmotronu. Widać tutaj, że zarówno po stronie wtórnej, jak i pierwotnej występuje wysoki poziom zakłóceń. Badania powtórzono umieszczając przed transformatorem filtr bierny typu LC. Rozpatrzono trzy przypadki filtrów pasmowo-przepustowych 3, 5 i 7 rzędu, wszystkie o częstotliwościach odcięcia 45 Hz i 60 Hz. Wyniki symulacji w postaci przebiegów prądów i napięć na wejściach filtrów pokazano na rysunku 3. Z analizy rysunków 2 i 3 wynika, że:

- wyższy rząd filtru zwiększa prąd załączenia urządzenia i jednocześnie zmniejsza napięcie startowe na filtry;
- im wyższy jest rząd filtru, tym większe jest tłumienie zmian napięcia w sieci (przebieg ma łagodniejszy kształt).

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Proponowane wykorzystanie modelu Woronina i jego modyfikacji do odwzorowania właściwości plazmotronu gliding arc umożliwia wszechstronne zbadanie oddziaływania tego urządzenia na sieć zasilającą. Ponadto istnieje możliwość zbadania efektywności stosowania filtrów sieciowych biernych typu LC ograniczających wpływ tego odbiornika na sieć. Zastosowany model pozwala na uwzględnienie procesów dynamicznych zachodzących podczas zmian prądu zasilającego i podczas zmian długości łuku. Dotychczas stosowane modele matematyczne łuku do symulacji procesów w obwodach z plazmotronami gliding arc były początkowo dedykowane do wyładowań w wybranych zakresach zmian wartości prądu.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Marciniak L.: Modele dynamiczne łuku zwarciovego dla sieci z małym prądem zwarcia doziemnego. *Archiwum Energetyki*, 37 (2007), 357-367.
2. Marciniak L.: Modelowanie zwarć doziemnych łukowych w sieciach średniego napięcia. *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3, 2009, str. 188-191.
3. Baba T., Takeuchi Y., Stryczewska H.D., Aouki S.: Study of 6 electrodes gliding arc discharge configuration. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 Nr 6/2012, p. 86-88.
4. Fridman A., Nester S., Kennedy L.A., Saveliev A., Mutaf-Yardimci O.: Gliding arc gas discharge. *Progress in Energy and Combustion Science* 25 (1999), p. 211-231
5. Jaroszyński L., Stryczewska H.D.: Analiza numeryczna urządzeń wyładowczych na przykładzie reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. *Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Konferencje Vol. 37, nr 12, 2000, s. 331-335*
6. Diatczyk J., Jaroszyński L., Komarzyniec G., Stryczewska H.D.: Modelowanie reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym. *Chapter - January 2009, s. 207-239.*
7. Komarzyniec G., Diatczyk J.: Redukcja zakłóceń zapłonowych w reaktorach Gliding Arc. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 10b/2012, s. 145-148.
8. Li Hui, Xie Mingfeng: Plasma Parameters of a Gliding Arc Jet at Atmospheric Pressure Obtained by a Line-Ratio Method. *Plasma Science and Technology*,

- Vol.15, No.8, Aug. 2013, p. 776-779.
9. Mazurek P.A.: Identyfikacja zaburzeń elektromagnetycznych w torze zasilania reaktora plazmowego przy różnych mieszaninach gazowych. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 90, Nr 7/2014, s. 203-206. doi:10.12915/pe.2014.07.44
 10. Mazurek P.A.: Selected methods to improve the electromagnetic compatibility of the plasma reactor. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88, Nr 7a/2012, s. 158-160.
 11. Kručini A.M.: Rasčet dinamičeskich sistem s èlektričeskoj dugoj. Učebnoe posobie. MÈI, Moskva 1988.
 12. Voronin A.A.: Povyšenie èffektivnosti kontaktno-dugogasil'nyh sistem sil'notočnyh kommutacionnyh apparatov s udlinâjšejšâ dugoj. Avtoreferat dis. k.t.n. Samara 2009.
 13. Sawicki A.: Modyfikacje modelu Woronina kolumny łukowej o sterowanej długości do symulowania procesów w silnoprądowych urządzeniach elektrycznych. *Śląskie Wiadomości Elektryczne* 2012, nr 1, s. 18-23.
 14. Sawicki A.: O wykorzystaniu modelu Woronina kolumny łukowej do symulowania procesów w aparatach i urządzeniach elektrycznych. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 2012, nr 7a, s. 196-200.
 15. Sawicki A., Haltof M.: Applying a modified Voronin arc model for simulating processes in gliding arc plasma generators. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)* 2015, R. 92, nr 3, s. 144-147. (doi: doi:10.15199/48.2016.03.35)
 16. Sawicki A.: Improvements of Hybrid Models of the Electric Arc of Variable Geometrical Parameters. 2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS) (IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.1109/EPMCCS.2018.8596459)
 17. 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.

HYBRID ARC MODEL FOR TESTING THE INTERACTION OF THE GLIDING ARC PLASMA RECEIVER ON THE POWER SUPPLY NETWORK

Based on the analysis of the operating conditions of the gliding arc plasmotron, a modified Voronin model of the electric arc was proposed to simulate processes in the arc power supply system. The hybrid form of the model allows its use in a wide range of supply current. In addition, this model takes into account the dynamics of length changes of the arc column. The simulations showed the effectiveness of using the developed macromodel and allowed the study of the impact of the plasmotron on the power supply network under the conditions of using different passive LC filters inserted before transformer. The main conclusions are as follows: higher filter rank increases the device's on-off current and at the same time reduces the start voltage on the filter; the higher the filter rank, the greater the attenuation of voltage changes - the waveform has a milder shape by reducing fighter frequencies. The possible future work can be quantitative analysis of energy quality for results of simulations and real measurements with experimental stand including filter, transformer and gliding plasmotron.

Keywords: electric arc, Voronin model, hybrid model.