

Wpływ zaburzeń łuku na oddziaływanie odbiornika plazmowego gliding arc na sieć zasilającą

Streszczenie. Przeanalizowano źródła zaburzeń zjawisk fizycznych powstające podczas pracy plazmotronu gliding arc. Podano uzasadnienie stosowania zmodyfikowanego modelu Woronina łuku elektrycznego do symulacji procesów elektrycznych w obwodzie z plazmotronem. Ze względu na wprowadzoną postać hybrydową modelu możliwe było odwzorowywanie charakterystyk dynamicznych kolumny plazmowej w warunkach szerokiego zakresu zmian prądu zasilającego. W symulacjach uwzględniono dynamikę zmian długości kolumny i działające na nią zaburzenia losowe. Na podstawie przeprowadzonych symulacji wykazano efektywność stosowania opracowanych makromodeli łuku z wykorzystaniem postaci różniczkowej i całkowitej. Zbadano wpływ plazmotronu na sieć zasilającą w warunkach stosowania różnego rzędu filtrów biernych LC.

Abstract. The sources of disturbances of physical phenomena arising during the operation of the gliding arc plasmotron were analyzed. The rationale for using a modified Voronin model of an electric arc to simulate electrical processes in a circuit with a plasmotron is given. Due to the introduced hybrid form of the model, it was possible to consider the dynamic characteristics of the plasma column in conditions of a wide range of supply current changes. The simulations took into account the dynamics of column length changes and random disturbances acting on it. Based on the simulations carried out, the effectiveness of using the developed macromodels of the arc with the use of differential and integral forms was demonstrated. The effect of the plasmotron on the power supply network was tested under the conditions of using a different order of passive LC filters (The effect of arc disturbances on the interaction of the plasma gliding arc receiver on the power supply network).

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

Keywords: electric arc, Voronin model, hybrid model, interference filtering.

Wstęp

W praktyce przemysłowej występuje wiele czynników wpływających na intensywność zaburzeń łuku elektrycznego. Należą do nich: zmienne strumienie masy przepływającego gazu, zmiany ciśnienia gazu, zmiany składu chemicznego gazu, ruchy elektrod i zmiany ich stanów pracy (np. różne udziały termoemisji i autoemisji elektronów). Również spotykane są takie czynniki zaburzające jak: zmiany przekrojów kanałów i dysz plazmotronów, zmienne oddziaływania zewnętrznych pól magnetycznych i wiązek promieniowania laserowego. Skutki zaburzeń to zmiany długości i pola przekroju poprzecznego kolumny łuku, zmiany udziałów części stożkowej i quasi cylindrycznej w strukturze geometrycznej kolumny, zmiany rozkładu prędkości i temperatury plazmy w przekroju kolumny i gazu w jej otoczeniu. Ze względu na bardzo małe wartości funkcji tłumienia procesów w plazmie, łuk jest bardzo wrażliwy na działające zaburzenia. To wpływa na trudności w zapewnieniu stabilności wyładowań łukowych. W celu uzyskania wysokiej niezawodności pracy urządzeń przemysłowych, do zasilania obwodów z łukami elektrycznymi zwykle stosowane są źródła prądowe lub quasi prądowe zapewniające odpowiednią amplitudę, kształt fali i częstotliwość. Pomimo tych wysiłków zakresy zmian amplitud zaburzeń nie powinny przewyższać zadanych dopuszczalnych wartości. Wysoka częstotliwość zmian natężenia pola elektrycznego zwykle ułatwia jonizację i przebicie przerwy międzyelektrodowej, dlatego jest wykorzystywana w układach ułatwiających zapłon i stabilizujących wyładowanie łukowe. Niestety, podobnie jak podczas gaszenia łuku, może to wywoływać szkodliwe oddziaływanie plazmotronu na sieć zasilającą (tab. 1).

Tabela 1. Porównanie oddziaływania łuku i iskry na sieć zasilającą

Łuk stabilizowany w plazmotronie strugowym	Iskra i łuk niestabilizowany w plazmotronie gliding arc
wynika z nieliniowości charakterystyk	wynika z nieliniowości i niestabilności
wynika z jednorazowej inicjacji i zgaszenia	wynika z działania układu zapłonowego w sposób stały lub okresowy
duża moc obciążenia, niski poziom zakłóceń	mała moc obciążenia, wysoki poziom zakłóceń

W plazmotronach ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym (gliding arc) występują różne zaburzenia, zarówno deterministyczne, jak i losowe. Zaburzenia deterministyczne długości łuku są spowodowane zmianą odległości między płamami łukowymi. Natomiast zaburzenia losowe długości kolumny lub jej średnicy wynikają z turbulencji przepływów gazowych otaczających poruszającą się kolumnę łuku. W większości użytkowanych plazmotronów podejmowane są różne działania [1] zapobiegające zgaszeniu łuku. Wprowadza się nawet kryteria ich zdolności technologicznej na podstawie nieprzerwanej pracy z ciągle płonącym łukiem (także w przypadku łuku prądu przemiennego). Natomiast w plazmotronach gliding arc zgaszenie łuku uznawane jest za normalne zjawisko, choć ponowy i w innym miejscu zapłon wyładowania powinien następować w możliwie najkrótszym interwale czasowym [2]. W tych plazmotronach odbywa się nie tylko nagrzewanie gazu przez wydłużający się łuk elektryczny, ale także oddziaływanie chemiczne szybko zanikającej plazmy z omywającym go gazem. Dlatego takie urządzenia plazmowe o stosunkowo dużej mocy znalazły zastosowanie w przemyśle chemicznym i w ochronie środowiska. Z punktu widzenia oddziaływania zewnętrznego na gaz i na sieć elektryczną kojarzą one efekty działania urządzenia łukowego i iskrowego (tab.2). W zależności od mocy znamionowej budowane są jako odbiorniki jedno-, trój- lub nawet sześciofazowe [3]. Zasilanie odbiornika gliding arc może się odbywać także ze źródła napięcia stałego [4].

Tabela 2. Porównanie łuku i iskry w plazmotronach

Łuk elektryczny	Iskra elektryczna
plazma równowagowa	plazma nierównowagowa
niska częstotliwość zmian	wysoka częstotliwość zmian
wysoka temperatura	niska lub nieokreślona temperatura
termiczna aktywność chemiczna plazmy	termiczna i nietermiczna aktywność chemiczna plazmy
niekiedy wymaga wyładowania pomocniczego	często wymaga wyładowania pomocniczego

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, Cassiego lub Schwartza zapisane w postaci całkowej (tabela 3) [5]. Takiemu sposobowi odwzorowania łuku odpowiadają makromodele ze sterowanymi źródłami prądowymi. Korzystniejszym rozwiązaniem jest wykorzystanie modeli przydatnych do modelowania procesów w wyłącznikach, gdzie jednym z czynników wywołujących gaszenie łuku jest jego rozciąganie [6].

Tabela 3. Modele matematyczne łuku w plazmotronie gliding arc

Modele klasyczne i zmodyfikowane	Modele dedykowane
Mayra	Woronina
Cassiego	hybrydowy Woronina
Schwartza	Pentegova
hybrydowy Mayra-Cassiego	Mayra-Pentegova

Model matematyczny łuku rozciąganego z działającymi zaburzeniami

W plazmotronie gliding arc zmiana długości kolumny łuku zależy od kąta rozchylenia elektrod β plazmotronu, prędkości przepływu gazu v_g i czasu t trwania pojedynczego cyklu [2]

$$(1) \quad l_a(t) = l_0 + \beta v_g t$$

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 α rozchylenia elektrod. Na skutek wydłużenia kolumny łukowej następuje wzrost napięcia na zaciskach reaktora plazmowego. Odbywa się to zarówno w stanach pracy statycznej, jak i dynamicznej. Ze względu na duże długości kolumny, a przez to duże wartości napięcia łuku, składowe napięć przyelektrodowych są zwykle pomijane. Dużym prędkościom przepływu gazu towarzyszą silne turbulencje. Dlatego w dalszych rozważaniach uwzględniono losowe zaburzenia długości kolumny $\Gamma_l(t)$. Prowadzi to do wzoru

$$(2) \quad l(t) = (1 + \Gamma_l(t)) \cdot l_a = (1 + \Gamma_l(t)) \cdot (l_0 + \beta v_g t)$$

Do opisu stanów dynamicznych łuku zasilanego prądem zmiennym stosuje się modyfikacje gotowych równań różniczkowych, co może 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 w założeniu uwzględniają dynamikę zmian długości i przekroju kolumny. Najczęściej są one wykorzystywane do opisu procesów w aparatach elektrycznych. Należy do nich model Woronina [8]. Przyjmuje się tu 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 energetycznego kolumny łuku.

$$(3) \quad \frac{dQ}{dt} = P_{el} - P_{dis} = u_{col} i - P_{dis}$$

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. Przyjmuje się założenie Mayra

$$(4) \quad \sigma = \sigma_0 \cdot \exp\left(\frac{q_V}{q_0}\right)$$

gdzie: σ_0 i q_0 - współczynniki aproksymacji. Stąd otrzymuje się równanie modelu dynamicznego łuku ze zmieniającymi się rozmiarami geometrycznymi $S(t)$ i $l(t)$

(5)

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

Funkcję tłumienia określa zależność

$$(6) \quad \theta_S(S) = \frac{q_0}{p_S} \sqrt{\frac{S}{4\pi}}$$

Ponadto, wprowadza się następujące oznaczenia:

$$(7) \quad Q = q_V V = q_V l S \quad (8) \quad g = \frac{\sigma S}{l}$$

$$(9) \quad P_{dis} = P_S(l, S) = p_S S_s = p_S l \sqrt{4\pi S}$$

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 $g = F(Q)$. W szczególnych przypadkach rozmiary kolumny mogą być stałe ($dl/dt = 0$, $dS/dt = 0$). Wtedy równanie można sprowadzić do modelu Mayra (moc Mayra $P_M = P_S = \text{const}$) ze stałą czasową [8]. Zakładamy, że w zależności od wartości natężenia prądu moc dyssypacji może odpowiadać zmodyfikowanym pod-modelom Mayra lub Cassiego. Wtedy otrzymamy model hybrydowy [9]

(10)

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

gdzie: g - konduktancja modelu kolumny łuku, S; $G_{min} > 0$, S - minimalna wartość konduktancji podczas chwilowego zaniku prądu, ε - funkcja wagowa. W zależności od rodzaju łuku elektrycznego i wymaganej dokładności aproksymacji funkcja ta może mieć różną postać analityczną [9]. W pracy [10] założono funkcję wagową w postaci krzywej Gaussa

$$(11) \quad \varepsilon(i) = \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)$$

gdzie I_0 - prąd przełączania między podmodelami.

Funkcję tłumienia łuku jest silnie nieliniowa i może być aproksymowana zależnością [10]

$$(12) \quad \theta(i) = \theta_{i0} + \theta_{i1} \exp(-\alpha_i |i|) \approx \begin{cases} \theta_{i1}, & \text{dla } |i| \text{ małe} \\ \theta_{i0}, & \text{dla } |i| \text{ duże} \end{cases}$$

gdzie: $\alpha_i > 0$, $\theta_1 \gg \theta_0 > 0$ s - stałe współczynniki aproksymacji. W symulacjach wykorzystano postać całkową modelu łuku

(13)

$$g = g_0 \exp \left\{ \int \left[\frac{1}{\theta_S(i)} \left[\frac{u_{col} i}{g U_C^2(l, S)} (1 - \varepsilon(i)) + \left(\frac{u_{col} i}{P_M(l, S)} + \frac{G_{min}}{g} \right) \varepsilon(i) - 1 \right] + l_0 = 0,008 \text{ m. W modelu łuku zadano następujące parametry: } \sigma_0 = 150 \cdot 10^3 \text{ S/m, } \theta_0 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ s, } \theta_1 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s, } \alpha_i = 0,0625 \text{ A}^{-1}, I_0 = 16 \text{ A, } G_{min} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ S, } a_l = 3,5 \cdot 10^5 \text{ W/m, } b_l = 4 \cdot 10^4 \text{ W/m, } S = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2. \text{ Jednocześnie z zaburzeniami deterministycznymi działały także zaburzenia losowe długości łuku o wariancji } 0,01 \text{ m nakładane na sygnał co } 5 \cdot 10^{-4} \text{ s. W celu zbadania możliwości ograniczenia wprowadzania zakłóceń do sieci zasilającej przez plazmotron zastosowano biernie filtry różnych rzędów (rys. 1). \right. \left. - \frac{1}{l} \frac{dl}{dt} \left(1 + \ln \frac{g l}{\sigma_0 S} \right) + \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} \left(1 - \ln \frac{g l}{\sigma_0 S} \right) \right] dt \right\}$$

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

$$(14) \quad P_{disc} = g U_C^2 = \frac{\sigma S}{l} (El)^2 = (\sigma S E^2) \cdot l = a_l(S) l$$

W zakresie słaboprądowym będzie

$$(15) \quad P_{disM} = p_S \sqrt{4\pi S l} = b_l(S) l$$

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

$$(16) \quad P_{disc}(I_0) = U_C I_0 = P_{disM}(I_0)$$

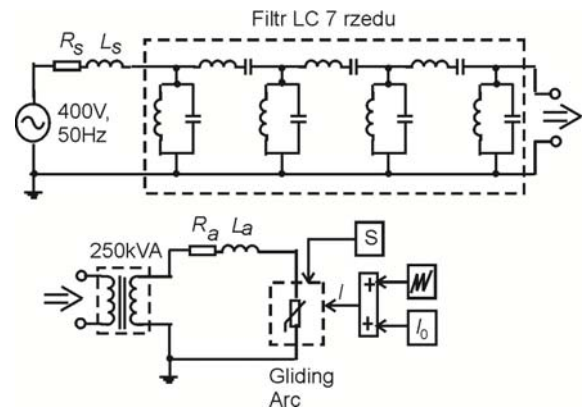
to w modelu (13) można wykorzystać zależność na określenie prądu granicznego

$$(17) \quad I_0 = \frac{P_{disM}}{U_C} = \frac{b_l(S)}{E}$$

Wyniki badań oddziaływania plazmotronu gliding arc na sieć zasilającą

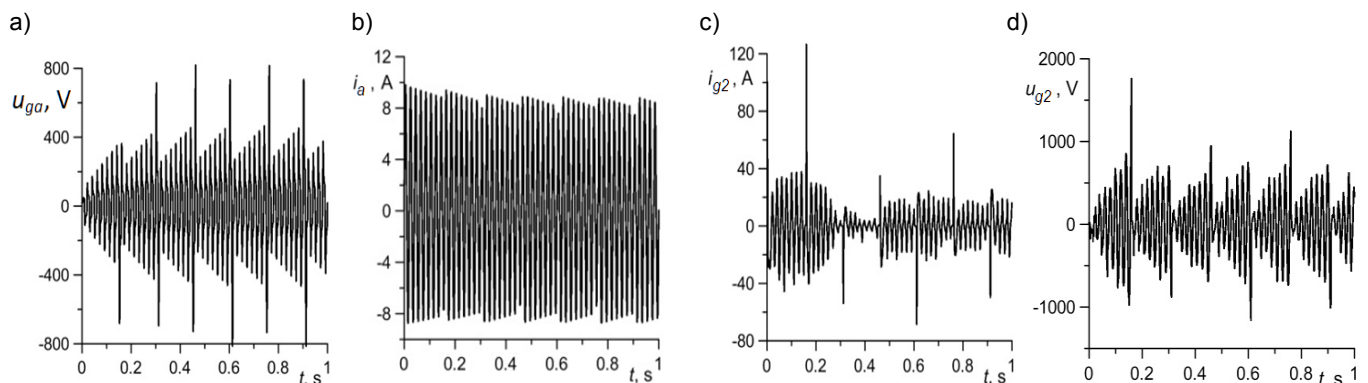
W badaniach symulacyjnych plazmotronu wykorzystano makromodel utworzony z wykorzystaniem postaci całkowej modelu łuku (13). Dodatkowo przyjęto, że zawiera on układ zapłonowy. Układ ten składa się z pary dodatkowych elektrod i własnego źródła zasilania wysokim napięciem o znacznie podwyższonej częstotliwości. Reaktor jest zasilany z sieci przemysłowej o napięciu 400 V i częstotliwości 50 Hz. W obwodzie z reaktorem znajduje się gałąź składająca się z szeregowo połączonych elementów RL ($R = 10 \Omega$ i $L = 2 \cdot 10^{-3}$ H). Aby dopasować napięcia sieci i plazmotronu zastosowano transformator jednofazowy o mocy $S = 300$ 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). Sieć, oprócz napięcia źródłowego, posiadała gałąź szeregową RL o parametrach $R = 5 \Omega$ i $L = 1 \cdot 10^{-3}$ H. 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 ($\beta v = 0,6(6)$ m/s). Minimalna długość łuku wynosiła $l_0 = 0,008$ m. W modelu łuku zadano następujące parametry: $\sigma_0 = 150 \cdot 10^3$ S/m, $\theta_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ s, $\theta_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ s, $\alpha_i = 0,0625$ A⁻¹, $I_0 = 16$ A, $G_{min} = 3 \cdot 10^{-3}$ S, $a_l = 3,5 \cdot 10^5$ W/m, $b_l = 4 \cdot 10^4$ W/m, $S = 3 \cdot 10^{-3}$ m². Jednocześnie z zaburzeniami deterministycznymi działały także zaburzenia losowe długości łuku o wariancji 0,01 m nakładane na sygnał co $5 \cdot 10^{-4}$ s. W celu zbadania możliwości ograniczenia wprowadzania zakłóceń do sieci zasilającej przez plazmotron zastosowano biernie filtry różnych rzędów (rys. 1).

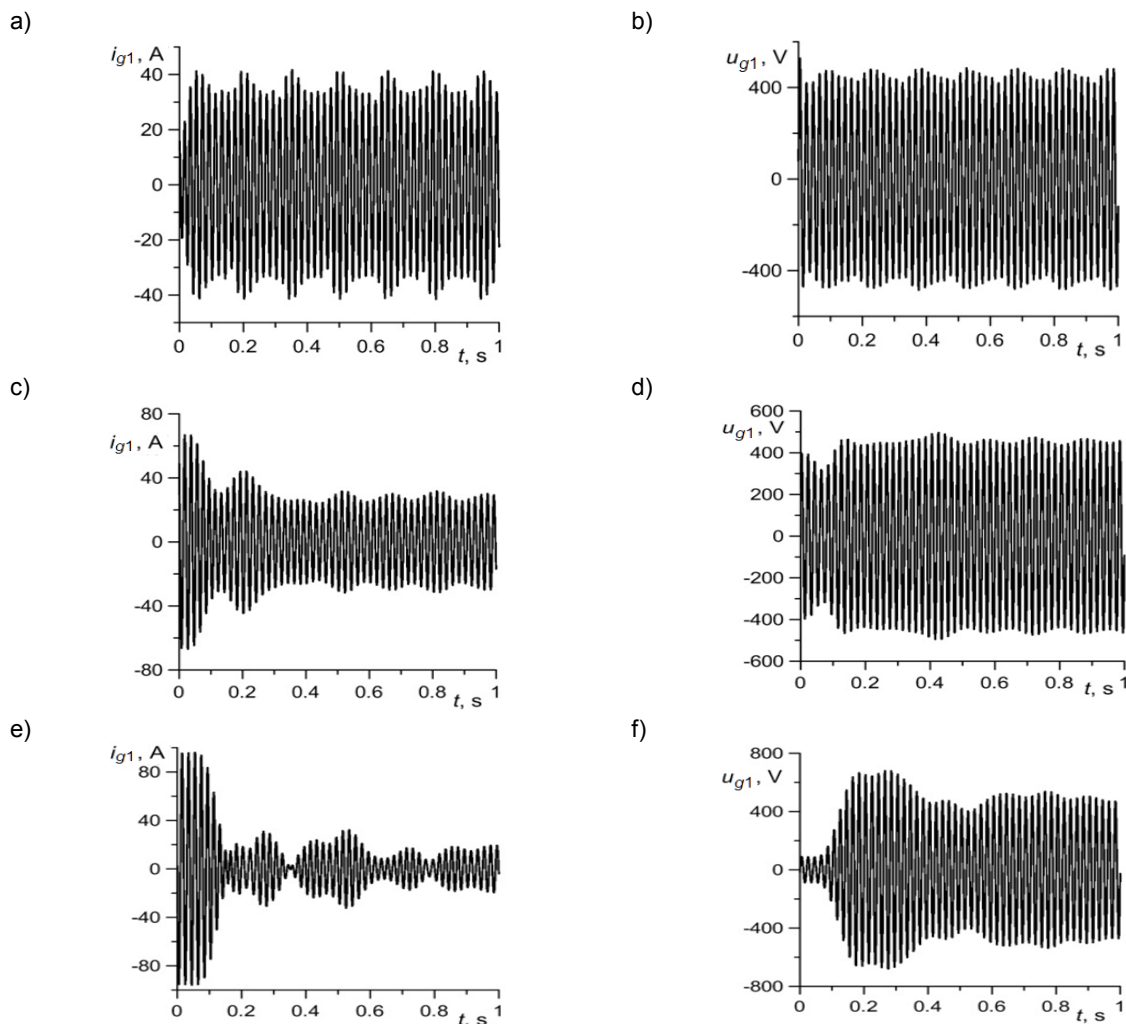


Rys. 1. Schemat ideowy układu zasilania plazmotronu gliding arc

Na rysunku 2 pokazano wyniki symulacji procesów w układzie zasilania plazmotronu. Można zauważyć, że zarówno po stronie wtórnej, jak i pierwotnej transformatora występuje wysoki poziom zakłóceń. Badania powtórzone umieszczając przed transformatorem filtr bierny LC. Rozpatrzono trzy przypadki filtrów pasmowo-przepustowych 3, 5 i 7 rzędu, wszystkie o częstotliwościach granicznych 45 Hz i 60 Hz. Wyniki symulacji w postaci przebiegów prądów i napięć na wejściach filtrów pokazano na rysunku 3. Wyższy rząd filtru powoduje znaczne zwiększenie prądu załączenia urządzenia i jednocześnie zmniejszenie napięcia startowego na filtrze. Wprowadzone zaburzenia losowe długości łuku w niewielkim stopniu wpływały na odkształcenia przebiegów zasilających filtry biernie [11]. Świadczy to o celowości stosowania takich filtrów.



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



Rys. 3. Przebiegi prądów i napięć na wejściu filtrów biernych LC zasilających plazmotron z zaburzoną długością łuku: a-b) filtru trzeciego rzędu; c-d) filtru piątego rzędu; e-f) filtru siódmego rzędu

Wnioski

Na podstawie analizy wyników modelowania można wyciągnąć następujące wnioski:

- model Woronina i jego modyfikacje umożliwiają uwzględnienie procesów dynamicznych zachodzących podczas zmian prądu zasilającego i podczas zmian długości łuku z uwzględnieniem działających zaburzeń losowych;
- do analizy warunków oddziaływania plazmotronów gliding arc na sieci zasilające można wykorzystywać model Woronina i jego modyfikacje;
- zastosowanie modelu hybrydowego umożliwia zbadanie wpływu plazmotronu gliding arc z filtrami sieciowymi biernymi typu LC na sieci zasilające;
- po zastosowaniu filtrów biernych LC wpływ zaburzeń losowych długości łuku na sieć zasilającą nie jest duży.

Autorzy: dr hab. inż. Antoni Sawicki, Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział Częstochowski, E-mail: sawicki.a7@gmail.com; dr hab. inż. Sławomir Gryś, prof. uczelni, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: slawomir.grys@pcz.pl.

LITERATURA

- [1] Kruczynin A.M., Sawicki A., Piece i urządzenia plazmowe. Cz.1. Piece i urządzenia plazmowe ciśnienia atmosferycznego. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001
- [2] Diatczyk J., Jaroszyński L., Komarzyniec G., Stryczewska H.D., Modelowanie reaktorów ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym, rozdział w Technologia nadprzewodnikowe i plazmowe w energetyce, *Lubelskie Tow. Nauk.*, 2009, 207-239
- [3] Baba T., Takeuchi Y., Stryczewska H.D., Aouqi S., Study of 6 electrodes gliding arc discharge configuration, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 6, 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), 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 Politech. Wrocławskiej*. Konferencje, 37 (2000), nr 12, 331-335
- [6] Sawicki A., Arc models for simulating processes in circuits with a SF6 circuit breaker, *Archives of Electrical Engineering*, (68) 2019, no 1, 147-159, doi: 10.24425/aee.2019.125986
- [7] Komarzyniec G., Diatczyk J., Redukcja zakłóceń zapłonowych w reaktorach Gliding Arc, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 10b, 145-148
- [8] Voronin A.A., Povyšenie effektivnosti kontaktno-dugogasil'nyh sistem sil'notochnykh kommutatsionnykh apparatov s udli-niāšejsjā dugoj. Avtoreferat dis. k.t.n. Samara 2009
- [9] Sawicki A., Improvements of Hybrid Models of the Electric Arc of Variable Geometrical Parameters. 2018 Conf. on Electro-technology: Processes, Models, Control and Computer Science, IEEE Xplore, doi: 10.1109/EPMCCS.2018.8596459
- [10] King-Jet Tseng, Yaoming Wang D., Mahinda Vilathgamuwa, An Experimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 12 (1997), n. 3, 429-436
- [11] Sawicki A., Gryś S.: Model hybrydowy łuku do badania oddziaływanie odbiornika plazmowego gliding arc na sieć zasilającą, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, (67) 2019, 123-127