

Tadeusz RODACKI
Andrzej KANDYBA

MODELOWANIE CHARAKTERYSTYK DYNAMICZNYCH ŁUKU ELEKTRYCZNEGO PLAZMOWEGO

Streszczenie. W artykule opisano metodę wyznaczania współczynników równania dynamicznego dowolnego plazmotronu w oparciu o jego statyczną charakterystykę. Współczynniki te można wyznaczyć za pomocą takich programów, jak MATCAD i ISSPICE na drodze kolejnych przybliżeń. Weryfikację otrzymanych wyników można przeprowadzić poprzez analizę stałoprądową w oparciu o opracowany model plazmotronu w programie ISSPICE. Dokładność wyników otrzymanych tą drogą zależna jest od dokładności aproksymacji termofizycznych charakterystyk łuku elektrycznego i od dokładności otrzymanej na drodze pomiarowej charakterystyki statycznej plazmotronu.

MODELING OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PLASMA ELECTRIC ARC

Summary. The paper outlines the method of finding dynamic equation coefficients of any plasmatron on the basis of its static characteristic. It is possible to determine dynamic equation coefficients, very useful for further analysis and synthesis of power supply device with plasma torch co-operation. The coefficients are possible to be determined, by means of MATH-CAD and ISSPICE software using the successive approximations method. Verification of the obtained results can be done by DC analysis on the basis of the worked out plasma model in ISSPICE PC software. Accuracy of the results obtained in this way depends on the accuracy of approximation of electrical thermophysical arc characteristic and accuracy of plasmatron static characteristics obtained from measurements.

1. WPROWADZENIE

Badania charakterystyk łuku elektrycznego budzą wiele kontrowersji, związanych głównie z trudnością interpretacji otrzymanych wyników. O ile otrzymywanie charakterystyk statycznych palników plazmowych jest stosunkowo proste na drodze pomiarowej i analitycznej, to charakterystyki dynamiczne ze względu na bardzo burzliwy charakter łuku są często niejednoznaczne i wymagają dodatkowo wielu skomplikowanych analitycznych

obliczeń. Przy czym dokładność otrzymanych wyników silnie zależy od wprowadzonych założeń upraszczających, co często prowadzi do wniosków, że do analizy współpracy palnika plazmowego z układem zasilania wystarczająca jest charakterystyka statyczna. Takie stwierdzenie jest słuszne, w przypadku gdy układ zasilania pracuje z częstotliwością sieciową i wpływ parametrów dynamicznych łuku jest znikomo mały. W przypadku stosowania nowoczesnych układów zasilania z pośrednim obwodem podwyższonej częstotliwości wpływ parametrów dynamicznych łuku ma coraz większe znaczenie i wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości obwodu pośredniczącego. Wobec takiego stanu rzeczy istnieje potrzeba opracowania prostej metody otrzymywania charakterystyki dynamicznej łuku. Poniżej prezentowana metoda jest próbą połączenia metod pomiarowych i analitycznych w celu uzyskiwania współczynników równania dynamicznego łuku. Proponowana metoda oparta jest głównie na wynikach badań, które doprowadziły do opracowania dwuwarstwowego gazodynamicznego modelu łuku.

2. MODEL ŁUKU ELEKTRYCZNEGO

Zewnętrzne charakterystyki łuku niestacjonarnego można uzyskać z równania bilansu energii [1], [2]. Jeżeli nie uwzględnia się zakłócenia, to równanie przyjmuje postać:

$$\frac{dH(\tau)}{d\tau} + P_p(\tau) - \frac{i^2}{g} = 0 \quad , \quad (1)$$

gdzie: $H(\tau)$ - entalpia słupa plazmy, $P_p(\tau)$ - ciepło tracone przez łuk do otoczenia,
 g - przewodność łuku, τ - czas.

Zarówno entalpia, jak i moc strat mogą być wyrażone jako funkcje przewodności łuku $H(g)$ i $P_p(g)$. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych i zastosowania kryteriów podobieństwa funkcje te można aproksymować wyrażeniami [1], [3]:

$$\begin{aligned} H(g) &= a_1 g^n + a_0 \\ P_p(g) &= b_1 g^m + b_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Stosunkowo prostym zadaniem jest uzyskanie charakterystyki statycznej plazmotronu w formie funkcji $U_1 = f(I_1)$. Jeżeli na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej zostanie

wyznaczona charakterystyka statyczna strat mocy na jednostkę długości łuku plazmotronu typu:

$$\frac{U_1 \cdot I}{l} = f\left(\frac{I \cdot l}{U_1}\right), \quad (3)$$

to taka funkcja jest równoważna funkcji strat mocy odprowadzonej wskutek przewodzenia i promieniowania przy pominięciu znikomo małych strat mocy w wyniku konwekcyjnego odprowadzenia ciepła z łuku w okolicach przykatodowego zwężenia łuku. Funkcję taką dla jednostki długości łuku można zapisać w postaci:

$$\frac{U_\mu \cdot I}{l} = f\left(\frac{I \cdot l}{U_\mu}\right) \equiv P_p(g) = P_\lambda(g) + P_\varepsilon(g) = b_1 g^m + b_0, \quad (4)$$

gdzie: $P_\lambda(g)$ - straty mocy wynikające z przewodności cieplnej,

$P_\varepsilon(g)$ - straty mocy na promieniowanie ciepłe.

Taki opis funkcji strat energii jest zgodny z granicznymi założeniami dwuwarstwowego gazodynamicznego modelu łuku elektrycznego [1]. Założenia podobieństwa łuków w urządzeniach elektrotermicznych odnoszą się tylko do pierwszej składowej strat mocy $P_\lambda(g)$, ogólnej funkcji strat mocy $P_p(g)$. Dlatego też, aby spełnić warunki podobieństwa, termofizycznych i elektrycznych charakterystyk łuku należy wyodrębnić tylko składową $P_\lambda(g)$ z ogólnej funkcji strat mocy $P_p(g)$ i w celu znalezienia brakującej funkcji entalpii $H(g)$ konieczne jest wyznaczenie termofizycznych charakterystyk łuku wzorcowego $P_{pw}(g)$ i $H_w(g)$, charakterystyki te dla argonu, wodoru i azotu znane są w literaturze [1], [3]. Aby wyznaczyć te charakterystyki dla innych gazów plazmotwórczych lub mieszanin tych gazów, należy rozwiązać odpowiednie równania energii przy uwzględnieniu charakterystyk przewodności i współczynnika wymiany ciepła w funkcji temperatury dla tych gazów. Współczynniki występujące w równaniu $P_{pw}(g)$ i $H_w(g)$ łuku wzorcowego dla najczęściej stosowanych gazów plazmotwórczych przedstawione zostały w pracy [1].

2.1. Wyznaczanie funkcji entalpii na podstawie strat niepromieniującego łuku wzorcowego

1. Dla dowolnie wybranych punktów P_{pi} i g_i ogólnej funkcji strat $P_p(g)$ przyjmuje się dowolne $P_{\lambda i}$ takie jednak, aby był spełniony warunek: $P_{\lambda i} < P_{pi}$, jest to pierwsze

przybliżenie składowej $P_{\lambda i}$ w punkcie i . Na podstawie funkcji strat łuku wzorcowego, gdzie $P_{\lambda i} = P_{pw}$, określa się przewodność łuku wzorcowego w punkcie i według zależności:

$$g_{wi} = \left(\frac{P_{\lambda i} - b_{aw}}{b_{lw}} \right)^{\frac{1}{m_w}} \quad (5)$$

2. Na podstawie założeń podobieństwa określa się promień łuku badanego urządzenia w punkcie (P_{pi}, g_i) według zależności:

$$r_{di} = r_e \sqrt{\frac{g_i l}{g_w l_w}} \quad (6)$$

3. Dla obliczonego promienia łuku w punkcie i określa się średnią przewodność elektryczną w i -tym punkcie według zależności:

$$G_{sri} = \frac{g_i}{\pi r_{di}^2} \quad (7)$$

4. Z odpowiedniej charakterystyki przewodności właściwej plazmy $G(T)$ określa się średnią temperaturę dla średniej przewodności właściwej G_{sri} . Dla wyznaczonej temperatury z charakterystyki promieniowania jednostkowej objętości plazmy $\sigma_{zr}(T)$ określa się σ_{zr} i całkowitą wielkość strat promieniującego słupa łuku dla punktu i według zależności:

$$P_{wi} = \sigma_{zr} \pi r_{di}^2 \quad (8)$$

5. Dla danego punktu P_{pi} funkcji strat $P_p(g)$ rzeczywisty łuk określa się drugim przybliżeniem:

$$P_{\lambda i+1} = P_{pi} - P_{wi} \quad (9)$$

6. Sprawdza się czy błąd jest mniejszy niż 5%, jeśli tak oznacza to koniec obliczeń i przejście do punktu 7.

7. Po obliczeniach z zadaną dokładnością przewodności cieplnej $P_{\lambda i}$ w punkcie i na podstawie założeń podobieństwa określa się wartość entalpii rzeczywistego łuku w badanym urządzeniu według zależności:

$$H_i = H_{wi} \pi r_{di}^2 \quad (10)$$

gdzie:

$$H_{wi} = a_{1w} g_{wi}^{m_w} + a_{0w} \quad (11)$$

Dalsze obliczenia wykonuje się dla innych punktów charakterystyki strat energii $P_p(g)$.

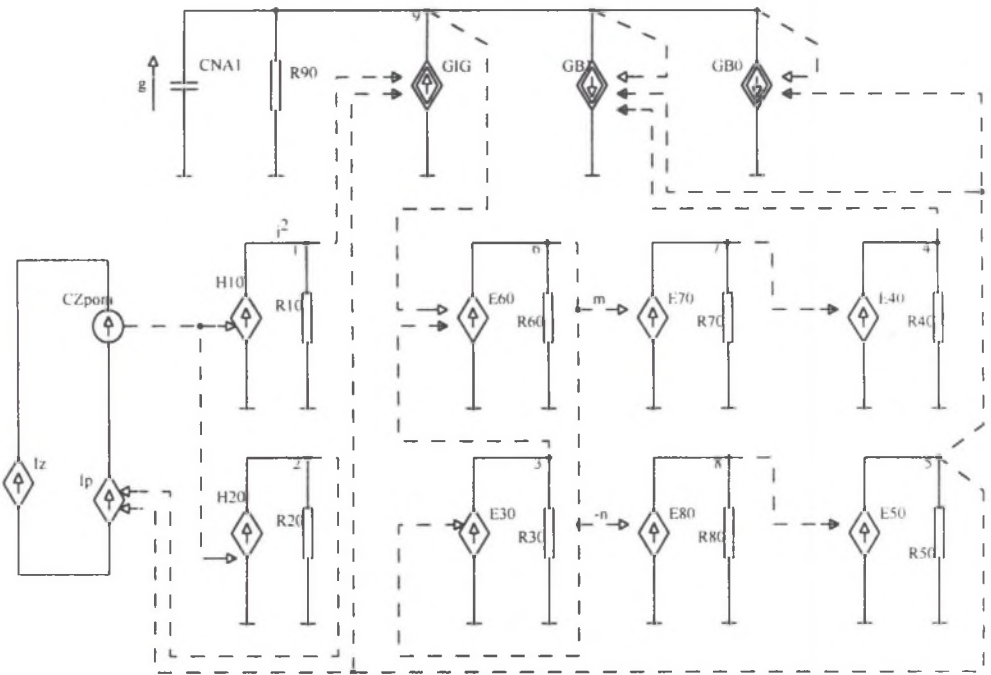
Przyjęte przybliżenie modelu kanałowego w niektórych przypadkach jest zbyt mało dokładne, dlatego też przybliżenie rzeczywistych warunków zależy w znacznym stopniu od dokładności charakterystyk przewodności właściwej $G(T)$ i $\sigma_{zi}(T)$. W takich warunkach błąd w obliczaniu charakterystyk rzeczywistych nie przekracza 5%, co jest wynikiem dostatecznie dokładnym, aby w realny sposób odzwierciedlić warunki panujące w kolumnie łuku rzeczywistego. Obliczając funkcje $P_p(g)$ i $H(g)$ można zapisać równanie bilansu energii łuku zależnością:

$$\frac{dH(g)}{dg} \cdot \frac{dg}{d\tau} - P_p(g) - \frac{i^2}{g} = 0 \quad (11)$$

Aproksymując $P_p(g)$ i $H(g)$ funkcjami typu (3) i znajdując współczynniki aproksymacji można w oparciu o te funkcje zapisać równanie przewodności łuku w postaci równania różniczkowego:

$$a_1 n g'' \frac{dg}{d\tau} + b_1 g^{m+1} + b_0 g - i^2 = 0 \quad (12)$$

Rozwiązaniem równania (12) jest niewiadoma funkcja chwilowej przewodności łuku, która w najbardziej ogólnej formie opisuje własności dynamiczne łuku plazmowego. Model równania chwilowej przewodności łuku plazmowego dla dowolnych współczynników m i n przedstawiony został na rys.1. Makromodel ten jest uzupełniony elektrycznym obwodem zasilającym w postaci idealnego źródła prądu. Obwód elektryczny symulujący pracę palnika plazmowego z układem zasilania składa się ze sterowanego źródła napięcia symulującego palnik plazmowy, niesterowanego źródła prądu, które symuluje układ zasilania plazmotronu i z sondy pomiarowej, która mierzy prąd w obwodzie palnik źródło zasilania. Jonizator, który w układzie rzeczywistym powoduje inicjację i zapłon łuku, w obwodzie modelowym realizowany jest przez zadanie ładunku początkowego na kondensatorze, proporcjonalnego do minimalnej przewodności łuku potrzebnej do zapłonu palnika. Plik tekstowy makromodelu łuku plazmowego wraz z obwodem zasilającym, który można dołączyć do biblioteki, przedstawiono w [3].



Rys.1. Makromodel łuku plazmowego dla dowolnych współczynników m i n
 Fig. 1. Macromodel of plasma arc for optional coefficients m and n

3. WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW RÓWNIANIA ŁUKU

Jak wspomniano, istnieje możliwość wyznaczenia równania dynamicznego łuku plazmowego w oparciu o teorię dwuwarstwowego modelu łuku i charakterystyki statyczne palnika plazmowego. Dokładność modelu w takim przypadku zależy od dokładności aproksymacji poszczególnych termofizycznych charakterystyk gazów plazmatwórczych i dokładności metody uzyskiwania charakterystyki statycznej palnika. Elementem determinującym dokładność takiego modelu dynamicznego jest jednak długość łuku niezbędna w fazie obliczeń. Dla plazmotronów z łukiem zewnętrznym, gdzie długość łuku jest ustalona i można przyjąć, że jest to odległość między elektrodami, problem jest stosunkowo prosty. W przypadku palników z łukiem wewnętrznym, a takimi palnikami są palniki do napyłania i napawania powłok, przyjęcie jako długości łuku odległości międzyelektrodowej jest założeniem błędnym, gdyż długość łuku może być w przypadku takich palników znacznie większa niż odległość międzyelektrodowa. Uzyskanie długości łuku

na drodze pomiarowej jest niemożliwe, a inne metody analityczno - doświadczalne prowadzą raczej do oszacowania długości łuku niż do jej wyznaczenia, co prowadzi do błędu nawet pięćdziesięcioprocentowego lub większego. Błąd w oszacowaniu długości łuku jest więc błędem, którym obarcza się wyznaczoną charakterystykę dynamiczną. Stosując program do rozwiązywania problemów matematycznych MCAD, ISSPICE do analizy obwodów elektrycznych i TURBO PASCAL, można wyznaczyć model dynamiczny łuku plazmowego drogą kolejnych przybliżeń długości łuku. Metoda ta pozwala wyznaczyć współczynniki równania dynamicznego z błędem określonym przez prowadzącego obliczenia. Istotą tej metody jest wyznaczenie współczynników równania za pomocą MCADA i TURBO PASCALA, a następnie określenie dokładności na podstawie porównania charakterystyki statycznej otrzymanej drogą pomiarową z charakterystyką statyczną otrzymaną poprzez stałoprądową analizę modelu dynamicznego w programie ISSPICE.

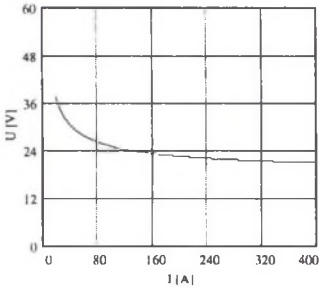
Poniżej przedstawiona zostanie metoda i wyniki obliczeń dla kilku plazmotronów z łukiem wewnętrznym. W pierwszym etapie obliczeń należy aproksymować charakterystykę $U=f(I)$ plazmotronu dowolną zależnością matematyczną, w omawianym przypadku aproksymacji dokonano zgodnie z metodą proponowaną w pracy [3]. Ten sposób opisu charakterystyki wprowadza błąd nie większy niż 4%. Następnym krokiem tego etapu jest wyznaczenie na podstawie otrzymanej charakterystyki statycznej funkcji strat z jednostki długości łuku dla dowolnie przyjętej długości łuku (jest to pierwsze przybliżenie długości łuku). Funkcje strat opisuje zależność (4). W tym etapie wyznacza się również pierwsze przybliżenie współczynników b_0 , b_1 i m . Przykładowy plik do wykonywania powyższych obliczeń w programie MCAD przedstawiony jest na rys. 2. Kolejnym etapem jest wyznaczenie nieznannej funkcji entalpii dla łuku niepromieniującego. W tym celu należy wykonać obliczenia według algorytmu przedstawionego w p 2.1. Obliczenia te wykonywane są według własnych procedur opracowanych w programie TURBO PASCAL. Wynikiem obliczeń są wyznaczone punkty charakterystyki nieznannej funkcji entalpii w postaci tabeli dostosowanej do wymogów programu MCAD. Trzecim etapem jest wyznaczenie na podstawie otrzymanego pliku za pomocą MCADA współczynników funkcji aproksymacyjnej dla entalpii. Sposób wyznaczania tych współczynników jest analogiczny jak wyznaczanie współczynników funkcji strat energii przedstawiony na rys. 2. Wyznaczone w wyżej opisany sposób współczynniki równania dynamicznego są pierwszym przybliżeniem modelu dla założonej

Obliczanie współczynników równania

$$a = 13.33 \quad c := 124.33 \quad \text{alfa} := 0.67 \quad i_{\min} := 20 \quad i_{\max} := 400$$

$$b := 5.29 \quad d := 19.29 \quad g := 0.96 \quad i := i_{\min} \cdot i_{\max}$$

$$u_i := a + b \cdot g + \frac{c + d \cdot g}{(i^{\text{alfa}})}$$



$$I_0 := 0.006 \quad P_{p_i} := u_i \cdot \frac{i}{I_0} \quad g_i := \frac{i}{u_i} \cdot I_0$$

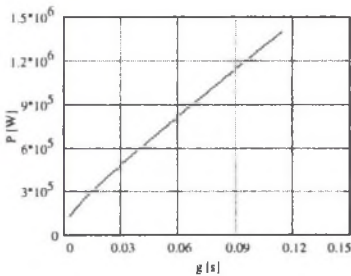
$$g_3 := \sqrt{(g_{i_{\min}} \cdot g_{i_{\max}})} \quad g_3 = 0.019$$

$$g_{\text{pom}_i} := \text{if}(g_3 > g_i, P_{p_i}, 0)$$

$$P_{p3} := \max(g_{\text{pom}}) \quad \max(g_{\text{pom}}) = 3.535 \cdot 10^5$$

$$b_0 := \frac{(P_{p_{i_{\min}}} \cdot P_{p_{i_{\max}}}) - P_{p3}^2}{(P_{p_{i_{\min}}} + P_{p_{i_{\max}}}) - 2 \cdot P_{p3}}$$

$$m := \frac{\ln(P_{p_{i_{\min}}} - b_0) - \ln(P_{p_{i_{\max}}} - b_0)}{(\ln(g_{i_{\min}}) - \ln(g_{i_{\max}}))}$$



$$v := \frac{\ln(P_{p_{i_{\min}}} - b_0) \cdot \ln(g_{i_{\max}}) - \ln(P_{p_{i_{\max}}} - b_0) \cdot \ln(g_{i_{\min}})}{\ln(g_{i_{\max}}) - \ln(g_{i_{\min}})}$$

$$v = 15.951$$

$$b_1 := e^v \quad b_1 = 8.462 \cdot 10^6 \quad b_0 = 6.167 \cdot 10^4 \quad m = 0.851$$

Rys.2. Przykładowy plik do obliczania współczynników równania aproksymującego funkcję strat energii b_0 , b_1 i m

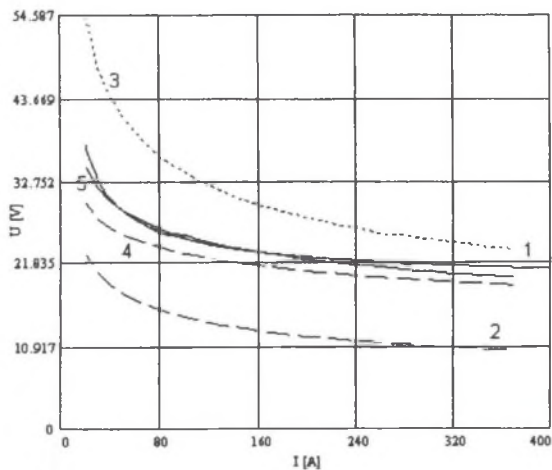
Fig. 2. Exemplary file for calculation of coefficients of equation approximating energy losses function b_0 , b_1 i m

długości łuku, które należy wstawić do uniwersalnego makromodelu łuku plazmowego z rysunku 1 i dokonać stałoprądowej analizy obwodu za pomocą programu ISSPICE.

Otrzymane wyniki stanowią charakterystykę styczną badanego obiektu. Ostatnim etapem wyznaczania charakterystyk dynamicznych jest porównanie rzeczywistej charakterystyki statycznej palnika z charakterystyką otrzymaną drogą symulacji numerycznej. Czynność tę

najdogodniej jest wykonać w programie MCAD poprzez graficzne wykreślenie obu charakterystyk i porównanie wyników. Jeżeli wyniki są zadowalające, kończymy obliczenia, gdyż założona długość łuku jest wielkością poprawną, jeżeli wyniki są zbyt rozbieżne, trzeba wykonać powyższe obliczenia dla innej długości łuku. Obliczenia należy kontynuować do momentu uzyskania wystarczającej zbieżności statycznej charakterystyki rzeczywistej z charakterystyką otrzymaną drogą symulacji komputerowej.

Poniżej przedstawiony jest graficzny obraz poszukiwania współczynników dynamicznego równania łuku w oparciu o przedstawioną metodę.



Rys. 3. Wyniki kolejnych aproksymacji współczynników równania dynamicznego dla różnych długości łuku

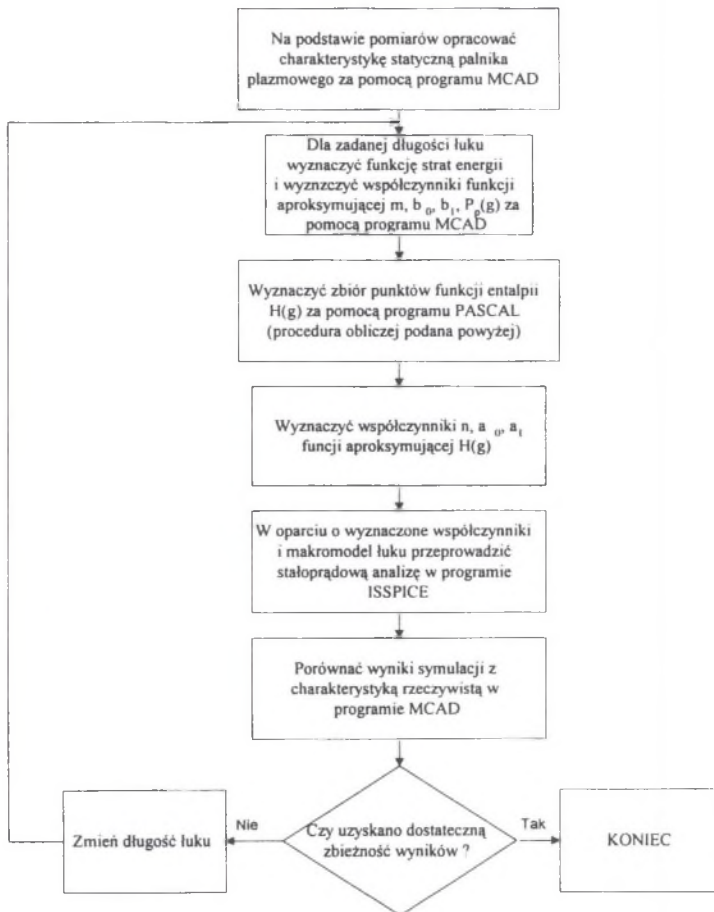
Fig. 3. Results of successive approximations of dynamic equation coefficients for different arc length

- Krzywa 1 przedstawia statyczną charakterystykę plazmotronu otrzymaną na drodze pomiarowej.
- Krzywa 2 jest to pierwsze przybliżenie dla zadanej długości łuku, w tym przypadku przyjęta długość łuku była za duża, w rzeczywistym układzie straty mocy cieplnej odprowadzonej z jednostki długości kolumny łuku są za małe w stosunku do łuku rzeczywistego.
- Krzywa 3 reprezentuje charakterystykę statyczną dla przypadku, gdy łuk jest krótszy niż łuk rzeczywisty, w związku z tym straty mocy cieplnej z jednostki długości kolumny łukowej są za duże w stosunku do łuku rzeczywistego.
- Krzywa 4 jest to kolejne przybliżenie dla pośredniej długości łuku.

- Krzywa 5 reprezentuje statyczną charakterystykę plazmotronu otrzymaną poprzez analizę numeryczną równania dynamicznego dla poprawnie określonej długości łuku.

Metodą tą można wyznaczać współczynniki równania dynamicznego dla dowolnego urządzenia plazmowego. Dokładność obliczeń jest związana z dokładnością aproksymacji termofizycznych charakterystyk gazów plazmotwórczych i obowiązuje przy założeniu, że chwilowe zmiany długości łuku są pomijalnie małe w stosunku do całkowitej długości łuku.

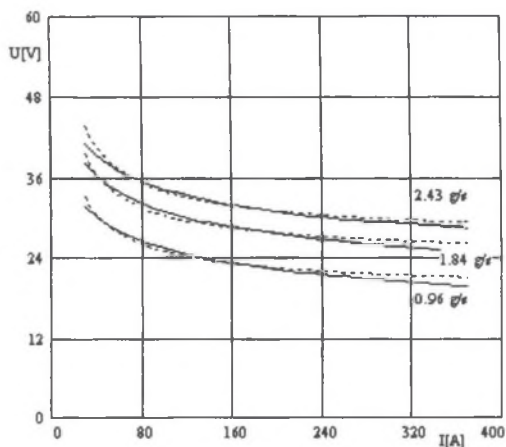
Metodę tę można przedstawić za pomocą następującego schematu blokowego:



Rys. 4. Schemat blokowy algorytmu obliczania współczynników dynamicznego równania łuku plazmowego dla dowolnego palnika

Fig. 4. Block diagram of algorithm for calculation of plasma arc dynamic equation coefficients for optional plasmatron

Stosując powyższą metodę, wyznaczono współczynniki równania dynamicznego łuku dla przykładowych palników w oparciu o ich rzeczywiste charakterystyki statyczne. Wyniki obliczeń dla palnika typu PLK-1/125 prezentowane są poniżej na rys.5.



Rys. 5. Wyniki aproksymacji dla palnika PLK 1/125 dla podanych wydajności argonu jako gazu plazmatwórczego. Linia przerywana - charakterystyka uzyskana na drodze pomiarowej, linia ciągła - charakterystyka uzyskana poprzez symulację cyfrową

Fig. 5. Approximation results for plasmatron PLK-3/20 for given outputs of argon as plasma gas. Broken line - characteristic obtained from measurements. Full line - characteristic obtained by digital simulation

4. WNIOSKI

Analizując otrzymane wyniki, można wywnioskować, że proponowana metoda pozwala uzyskać współczynniki równania dynamicznego łuku z dosyć dobrą dokładnością i jest przydatna do analizy układów z łukiem w stanach dynamicznych. Zaletą metody jest to, że nie wymaga znajomości długości łuku elektrycznego, parametru trudnego do określenia na drodze zarówno pomiarowej, jak i analitycznej. Ze względu na charakter zastosowanych funkcji aproksymacyjnych ograniczeniem jest posiadanie przez funkcje jednego ekstremum. W przypadku gdy funkcje posiadają więcej niż jedno ekstremum lub przegięcie, należy aproksymować funkcje przedziałami, co jest dość kłopotliwe, gdyż analizę należy prowadzić przedziałami, zwiększając liczbę kompletów współczynników.

Wyniki symulacji pozwalają stwierdzić, że prędkość przepływu gazu nie wpływa w sposób istotny na długość łuku, ale bardzo silnie wpływa na współczynnik wymiany ciepła

między kolumną łuku a jego otoczeniem, a co za tym idzie bardzo silnie wpływa na promień kolumny łukowej (promień łuku zmniejsza się wraz ze wzrostem wydajności gazu plazmotwórczego). Przeprowadzone obliczenia dotyczyły plazmotronów, w których gazem plazmotwórczym był argon. Możliwe jest też stosowanie opracowanej metodyki i algorytmów dla palników plazmowych, w których wykorzystywane są inne gazy plazmotwórcze, których funkcje termofizyczne znane są z literatury.

LITERATURA

1. Kruczynin A. M.: Rascziot dinamiczeskich sistem s elektriczeskoj dugoj. Moskwa 1988.
2. Rodacki T. Kandyba A. Machniweski J.: *Modelowanie charakterystyk dynamicznych łuku elektrycznego w palnikach plazmowych*. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, tom 3, zeszyt 2, 1997.
3. Rodacki T. Kandyba A.: *Energoelektroniczne układy zasilania plazmotronów prądu stałego*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr. 8T10B00516 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1999 – 2000.

Recenzent: Dr hab. inż. Krzysztof Kurek

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 kwietnia 2000 r.

Abstract

Investigations of electric arc characteristics arouse many controversies connected with the difficulty of preservation and interpretation of the obtained results. Whereas it is comparatively simple to obtain the static characteristics of plasmatrons from measurements and analysis the dynamic characteristics owing to the very turbulent character of the arc are often ambiguous and they additionally require many complicated analytical calculations. The accuracy of the obtained results is strongly dependent on the being made simplifying assumptions, which often results in the conclusion that the static characteristic is sufficient for analysis of the co-operation of the plasmatron and supply system. This statement is correct if the supply system operates at the mains frequency and the influence of the arc dynamic parameters is negligible. In case of applying the up-to-date supply systems with the intermediate circuit of

increased frequency the influence of the arc dynamic parameters is of greater importance and it increases together with the rise in the indirect circuit frequency. That is why it is necessary to work out a simple method for obtaining the arc dynamic characteristic. The method presented below is the attempt of joining the measuring and analytical methods in order to determine the coefficients of the arc dynamic equation. The external characteristics of the non-stationary arc can be obtained from the energy balance equation (1) and brought to the form (4) by the appropriate transformations. Such a description of the energy loss function is compatible to the boundary assumptions of the two-layer gasdynamic model of the electric arc. The assumptions of the similarity of arcs in electrothermal devices refer only to the first component of the energy losses $P_\lambda(g)$ of the energy loss general function $P_p(g)$. Therefore only the component $P_\lambda(g)$ should be separated from the energy loss general function $P_p(g)$ in order to satisfy the conditions of the similarity between the thermophysical and electrical characteristics of the arc. It also enables to find the enthalpy function $H(g)$ by means of the algorithm presented in Section 2.1 while assuming the knowledge of the standard arc characteristics for the given plasma-forming gas. After determining the enthalpy functions and making the appropriate substitutions it is possible to describe the arc dynamic model by Eq. (12). This model has unknown coefficients strongly dependent on the arc length. The arc length is very difficult to be analytically calculated and practically impossible to be measured. In order to determine the coefficients of the arc dynamic equation one should use the algorithm shown in Fig.4. This algorithm allows to calculate the coefficients of the electric arc dynamic equation basing on the arc static characteristics. The way of approximation of the arc energy equation is presented in Fig.2. Fig.3 shows the results of the successive approximations of the arc dynamic equation coefficients for different arc length. The coefficients of the arc dynamic equation for exemplary plasmotrons were calculated by means of the above method basing on the real static characteristics of the plasmotrons. The calculation results for the PLK-1/125 plasmatron are given in Fig.5. The carried out calculations dealt with the plasmotrons with argon as a plasma-forming gas. But it is possible to use the worked out procedure and algorithms for plasmotrons in which other plasma-forming gases are used and the thermophysical functions of these gases are available in literature.