

Wyznaczanie parametrów modeli matematycznych łuku elektrycznego w wybranych stanach pracy urządzeń TIG

Streszczenie. Przedstawiono metodę pomiarową wyznaczania parametrów wybranych modeli matematycznych łuku elektrycznego zasilanego ze źródła prądowego o fali prostokątnej. Uzyskano przybliżone wyrażenia analityczne na parametry charakterystyk statycznych i na stałe czasowe modeli łuku. Metodą symulacyjną zbadano wpływ zaburzeń długości łuku na dokładność wyznaczania stałych czasowych.

Abstract. Measurement method of parameters determination of selected electrical arc mathematical models powered by current source with a square wave has been shown. Approximate analytical expressions for parameters of static characteristics and time constants of arc models have been obtained. Impact of arc length disturbances on the accuracy of time constants determination has been researched using numerical simulations. (Parameters determination of mathematical models of electrical arc in selected working states of TIG devices).

Słowa kluczowe: łuk elektryczny, model Mayra, model Cassiego, model Pentegowa.

Keywords: electrical arc, Mayr model, Cassie model, Pentegov model.

Wstęp

We współczesnej literaturze naukowo-technicznej spotykane są różne metody eksperymentalnego badania łuku elektrycznego [1-3]. Ogólnie można je podzielić na dwa rodzaje:

- 1) metody służące wyznaczeniu parametrów i charakterystyk modeli fizycznych łuku elektrycznego;
- 2) metody służące wyznaczeniu parametrów i charakterystyk modeli matematycznych łuku elektrycznego.

W pierwszym przypadku wyznaczane są najczęściej nieskorelowane lub słabo skorelowane dane dotyczące wielu lub tylko wybranych parametrów fizycznych. Zwykle obejmują one charakterystyki napięciowo-prądowe statyczne lub dynamiczne, funkcję współczynnika tłumienia łuku, rozmiary geometryczne kolumny i plam elektrodowych, rozkłady temperatury, ciśnienia, prędkości przepływu plazmy itd.

W drugim przypadku wyznaczany jest cały komplet wybranych skorelowanych danych określonych przez model matematyczny. Powinny być one uzyskane w jednakowych warunkach fizycznych i z takim samym wymuszeniem prądowym.

Stosunkowo najłatwiej dostępne i dokładnie mierzalne są charakterystyki elektryczne łuku. Takie cechy łuku, jak np. moc, ruchliwość plamy katodowej, stabilność wyładowania, wymagają zastosowania odpowiedniego źródła zasilającego energią elektryczną. Ze względu na opadający kształt charakterystyk łuku, jest nim najczęściej idealne lub rzeczywiste źródło prądowe. Tylko w niektórych przypadkach [3] możliwe są odcinki wznoszących się charakterystyk łuku, co umożliwia zastosowanie źródeł napięciowych. Szczególnie duże trudności sprawia wyznaczanie charakterystyk łuku prądu zmiennego. W spawalnictwie stosuje się prądy przemienne o kształcie sinusoidalnym, prostokątnym, trapezowym, a także prądy impulsowe bipolarne i unipolarne. W niniejszym artykule zostaną opisane metody wyznaczania parametrów modeli matematycznych łuku zasilanego ze źródeł prądowych o wymuszeniach bipolarnych i prostokątnym kształcie fali.

Ze względu na dużą intensywność zaburzeń generowanych w łuku elektrycznym i jego wielką wrażliwość na oddziaływania zewnętrzne, uzyskiwanie wysokiej dokładności pomiarów charakterystyk statycznych i dynamicznych łuku jest bardzo trudne. W dużym stopniu zależy to od: warunków płonienia łuku elektrycznego w konkretnym urządzeniu elektrotechnologicznym, użytej aparatury pomiarowej i zastosowanej metody badawczej

oraz czasu i zakresu prowadzonych badań. W naszych rozważaniach zakładamy płonienie łuku elektrycznego w obszarze o stałej odległości między elektrodami i występowanie bardzo słabych zaburzeń kolumny plazmowej ograniczonych przez specjalne działania i układy stabilizujące wyładowanie.

Stopniowa rezygnacja ze stosowania źródeł prądowych sinusoidalnie zmiennych w spawalnictwie wynika z następujących przyczyn:

- 1) niewystarczającej stabilności płonienia łuku elektrycznego, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości i słabych prądów;
- 2) zwiększonych trudności w realizacji operacji spawania łukiem krótkim;
- 3) braku uzasadnienia technologicznego wysiłków nad formowaniem sinusoidalnego kształtu prądu;
- 4) ograniczonej wartości mocy cieplnej łuku, pomimo stosunkowo wysokich amplitud napięć;
- 5) zwiększonych trudności w sterowaniu charakterystykami elektrycznymi źródeł;
- 6) wysokich kosztów budowy źródeł prądu sinusoidalnego o sterowanej częstotliwości.

Współczesne operacje spawalnicze TIG najczęściej realizowane są z użyciem prądów pulsujących. W celach realizacji diagnostyki łuku zastąpienie ich źródłami prądu sinusoidalnego może prowadzić do:

- 1) zaburzeń procesu technologicznego;
- 2) podwyższenia kosztów budowy stanowiska badawczego;
- 3) zniekształcenia informacji na skutek dużych rozbieżności między charakterystykami łuków o różnej długości, mocy itd.

Modele matematyczne łuku elektrycznego w obwodzie z wymuszeniem prądowym

W strukturze przestrzennej łuku elektrycznego można wyróżnić trzy podstawowe obszary: przykatodowy, kolumny łukowej i przyanodowy. Zakładamy, że jedną z metod [2] wyznaczono spadki napięć w obszarach przyelektrodowych. Praktycznie słabo zależą one od wartości prądu i zwykle przyjmuje się je jako wielkości stałe. Na ich wartości mają wpływ m.in. kształty, rozmiary i rodzaje materiałów elektrod oraz rodzaj zastosowanego gazu. Ze względu na budowę i zastosowania technologiczne urządzeń do spawania metodą TIG często występuje asymetria napięć przyelektrodowych. Zakładamy, że jest ona bardzo mała lub została skompensowana za

pomocą dodatkowego zewnętrznego źródła napięciowego. Przypadek pełnej kompensacji napięć przyelektrodowych rozpatrzono w [4].

W tabeli 1 zamieszczono podstawowe wzory określające wybrane modele matematyczne łuków elektrycznych w stanach statycznych i dynamicznych. Wszystkie te modele spełniają równanie bilansu energii w kolumnie łukowej. Modele Mayra i Cassiego stanowią szczególne przypadki modelu Pentegowa [5].

Tabela 1. Modele matematyczne łuku elektrycznego

Nr	Mo- del	Równania modelu	Charakterystyka statyczna
(1)	Mayra	$\theta_M \frac{dg}{dt} + g = \frac{i^2}{P_M}$	$U_{kol} = \frac{P_M}{I}$
(2)	Cassiego	$\theta_C \frac{dg^2}{dt} + g^2 = \frac{i^2}{U_C^2}$	$U_{kol} = U_C \operatorname{sgn}(I)$
(3)	Pentegowa 1	$\theta_P \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i^2$; $u(i_\theta) = R_{st}(i_\theta)i =$	$U_{kol}(I) =$ $U_{CP} \operatorname{sgn}(I) + \frac{P_{MP}}{I}$
(4)	Pentegowa 2	$= \frac{U_{st}(i_\theta)}{i_\theta} i$	$U_{kol}(I) = R_P I + \frac{P_{MR}}{I}$

W przypadku modelu Mayra łuku elektrycznego zakłada się ściśle hiperboliczny kształt charakterystyki napięciowo-prądowej statycznej. W tym modelu wprowadzono oznaczenia: U_{kol} – napięcie statyczne na kolumnie łukowej; I – prąd stały wymuszający; i – prąd chwilowy; g – konduktancja elektryczna, P_M – stała wartość mocy modelu Mayra, θ_M – stała czasowa modelu Mayra.

W przypadku modelu Cassiego łuku elektrycznego zakłada się ściśle poziomy kształt charakterystyki napięciowo-prądowej statycznej. W tym modelu wprowadzono oznaczenia: U_C – stała wartość napięcia modelu Cassiego; θ_C – stała czasowa modelu Cassiego.

W przypadku modeli Pentegowa łuku elektrycznego rezystancję określa się nie z wykorzystaniem prądu rzeczywistego, ale pewnego wirtualnego prądu opóźniającego się $i_\theta(t)$, zmieniającego się z określoną stałą czasową θ_P i będącego swojego rodzaju odwzorowaniem rzeczywistego prądu $i(t)$. W przypadku wysokiej częstotliwości $f \gg 1/\theta_P$, źródła prądu przemiennego, stan cieplny łuku określa się wartością skuteczną prądu. W stanie ustalonym prąd stanu $i_\theta(t)$ powinien pokrywać się z prądem rzeczywistym $i(t)$. Wszystkie stany, które są izoenergetyczne, są scharakteryzowane przez jedną zmienną – prąd stanu łuku $i_\theta(t)$. Podobnie za pomocą tej zmiennej można określić także parametry i charakterystyki dynamiczne modeli łuku (tab. 1).

W dalszych rozważaniach przyjęto, że łuk znajduje się w obwodzie z wymuszeniem prądowym prostokątnym o pulsacji $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$, gdzie f – częstotliwość fali, a T jej okres. Jest to stan często występujący w urządzeniach do spawania metodą typu TIG [1].

Zagadnienia wyznaczania parametrów modeli łuku elektrycznego

Rozważmy obwód z łukiem elektrycznym zasilanym ze źródła prądowego bipolarnego o zadanej częstotliwości f i sterowanym współczynnikiem wypełnienia impulsów $k_w = \tau/T$.

Zmiana k_w umożliwia zmianę w szerokim zakresie wartości średniej prądu spawania. Niech amplituda przebiegu symetrycznego prostokątnego prądu wynosi I_1 . Okresowe nagłe zmiany kierunku przepływu prądu nie wpływają na stan energetyczny łuku, który zachowuje się tak, jak podczas zasilania prądem stałym. To umożliwia łatwe wyznaczanie charakterystyk i parametrów statycznych, pomimo użycia prądu przemiennego.

Najpierw rozważmy łuk elektryczny słaboprądowy, w którym procesy energetyczne opisuje model Mayra (1). Za pomocą watomierza można zmierzyć wartość średnią P_w funkcji mocy, która umożliwia określenie mocy Mayra

$$(5) \quad P_M = P_w - U_{AK} I$$

gdzie U_{AK} – suma przyelektrodowych spadków napięcia.

W przypadku łuku silnoprądowego bardziej odpowiednim jest model Cassiego (2). Za pomocą woltomierza wartości skutecznej można zmierzyć wartość napięcia łuku U_V i następnie obliczyć napięcie Cassiego

$$(6) \quad U_C = U_V - U_{AK}$$

Jeśli $k_w = 0,5$, to w ten sam sposób można wyznaczyć parametry modeli P_M i U_C , w obecności dowolnej wartości składowej stałej wymuszenia I_0 .

Model Pentegowa łuku o charakterystyce statycznej hiperboliczno-płaskiej (3) umożliwia stosunkowo dokładne odwzorowanie stanów dynamicznych w plazmie termicznej wywołanych słabymi i silnymi prądami w odpowiednich warunkach płonienia łuku (rodzaju i ciśnienia gazu, kształtu i rozmiarów elektrod [2]). Zastosowanie wymuszenia prądowego prostokątnego bipolarnego symetrycznego umożliwia także szybkie wyznaczenie parametrów funkcji aproksymującej charakterystykę statyczną. W tym celu można wykonać pomiary napięcia dwukrotnie z dwiema różnymi wartościami maksymalnymi prądu I_1 i I_2 . Podobnie, jak w przypadku prądu stałego, rejestruje się wtedy współrzędne dwóch punktów na charakterystykach statycznych (I_1, U_1) i (I_2, U_2) . Parametry aproksymacji charakterystyki statycznej można obliczyć ze wzorów

$$(7) \quad P_{MP} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} I_1 I_2$$

$$(8) \quad U_{CP} = \frac{U_1 I_1 - U_2 I_2}{I_1 - I_2} - |U_{AK}|$$

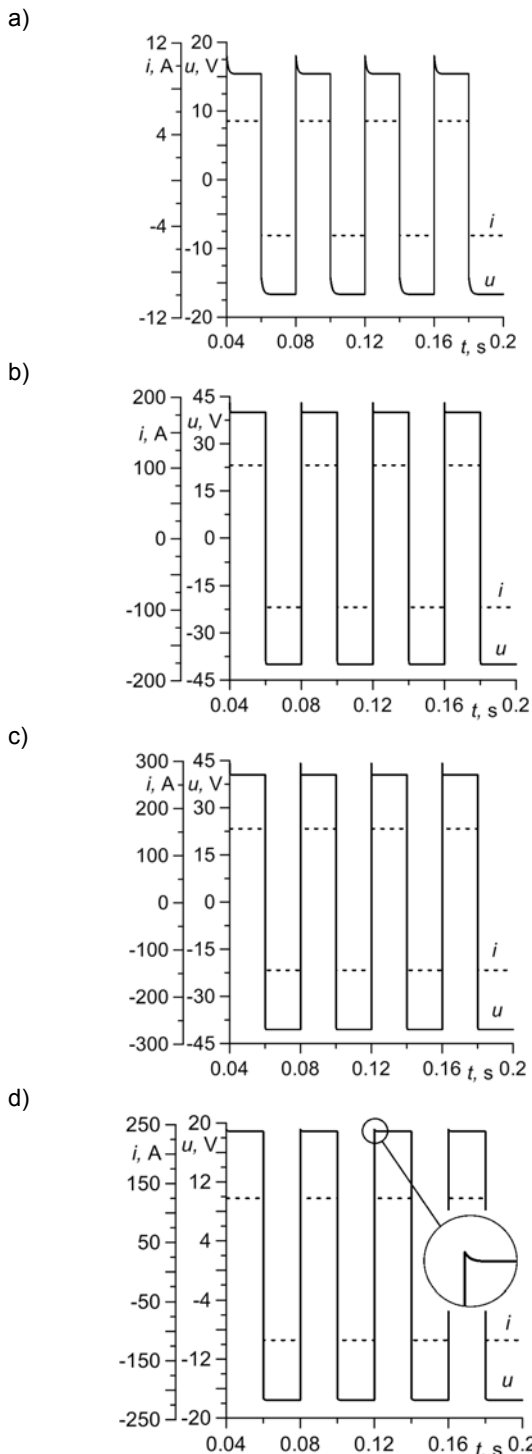
gdzie: I_1, I_2, U_1, U_2 – wartości skuteczne prądów i napięć.

Model Pentegowa łuku o charakterystyce statycznej hiperboliczno-liniowej (4) umożliwia względnie dokładne odwzorowanie stanów dynamicznych w plazmie termicznej wywołanych słabymi i silnymi prądami w odpowiednich warunkach fizycznych [2]. Na podstawie pomiarów w dwóch punktach na charakterystykach statycznych o współrzędnych (I_1, U_1) i (I_2, U_2) można obliczyć parametry modelu z następujących wzorów

$$(9) \quad P_{MR} = \left(\frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{I_1^2 - I_2^2} - \frac{|U_{AK}|}{I_1 + I_2} \right) I_1 I_2$$

$$(10) \quad R_P = \frac{U_1 I_1 - U_2 I_2}{I_1^2 - I_2^2} - \frac{|U_{AK}|}{I_1 + I_2}$$

W warunkach fizycznych działających zakłóceń zmierzone wartości napięć i prądów łuku mogą być wykorzystane we wzorach (5)-(10) po uprzednim zastosowaniu uśrednienia, co umożliwi uzyskanie większej dokładności.

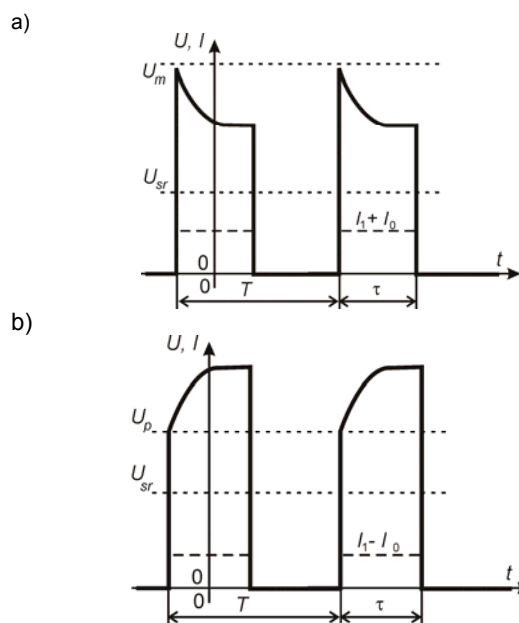


Rys. 1. Przebiegi prądów i napięć na kolumnie plazmowej (bez U_{AK}) w obwodach z modelami: a) Mayra ($P_M = 80$ W, $\theta_M = 1 \cdot 10^{-3}$ s, $I_1 = 5$ A, $I_0 = 0,2$ A); b) Cassiego ($U_C = 40$ V, $\theta_C = 1 \cdot 10^{-4}$ s, $I_1 = 100$ A, $I_0 = 4$ A); c) Pentegowa (1) ($P_{MP} = 80$ W, $U_{CP} = 40$ V, $\theta_{p1} = 1 \cdot 10^{-4}$ s, $I_1 = 150$ A, $I_0 = 7$ A); d) Pentegowa (2) ($P_{MR} = 170$ W, $R_p = 0,14$ Ω , $\theta_{p2} = 4 \cdot 10^{-4}$ s, $I_1 = 120$ A, $I_0 = 5$ A) (linia ciągła – napięcie, linia kreskowa – prąd)

W stanie zasilania prądem impulsowym bipolarnym nie ujawnia się inercja łuku, co uniemożliwia wyznaczenie stałych czasowych modeli. W tej sytuacji autorzy proponują wprowadzenie niewielkiego zaburzenia w postaci składowej stałej $|I_0| \ll I_1$ do dotychczasowych źródeł prądowych bipolarnych o amplitudzie I_1 . Efektem tego są okresowe zmiany stanów energetycznych łuku, które odbywają się zgodnie z wartością funkcji współczynnika tłumienia. To zaburzenie może być wprowadzane krótkotrwale tak, aby

nie miało znaczącego wpływu na przebieg procesu technologicznego.

Na rysunku 1 pokazano przebiegi prądów i napięć łuków o właściwościach odpowiadających modelom Mayra, Cassiego i Pentegowa. Częstotliwość wymuszenia wynosiła $f = 25$ Hz, a współczynnik wypełnienia impulsów $k_w = 0,5$. Składowa stała prądu powoduje zniekształcenia przebiegów napięcia, które odbiegają od prostokątnych. Są one najbardziej wyraźne w przypadku modelu Mayra. W dalszych rozważaniach uwzględnimy uśredniania aproksymowanych przebiegów napięcia łuku oddzielnie wywołanych sumą prądów ($I_1 + I_0$) i różnicą ($I_1 - I_0$) (rys. 2). Sumie prądów odpowiada podskok modułu napięcia do wartości maksymalnej U_m , które następnie maleje quasi-wykładniczo do mniejszej wartości quasi-ustalonej, a różnicy prądów odpowiada quasi-wykładnicze narastanie modułu napięcia do większej wartości quasi-ustalonej.



Rys. 2. Graficzna interpretacja metody uśredniania aproksymowanych przebiegów napięć łuku: a) w zakresie sumy prądów ($I_1 + I_0$); b) w zakresie różnicy prądów ($I_1 - I_0$)

Ponieważ model Mayra (1) łuku słaboprądowego jest liniowy ze względu na konduktancję g , to można go scharakteryzować za pomocą pojedynczej stałej czasowej θ_M . W tym celu można rozpatrzeć albo impulsy napięciowe odpowiadające sumie prądów, albo impulsy napięciowe odpowiadające różnicy prądów łuku. Jeśli uwzględni się impulsy odpowiadające sumie prądów (rys. 2a), to zmierzone wartości napięć średniego U_{sr} i maksymalnego U_m spełniają przybliżone równanie nieliniowe

$$(11) \quad U_{sr} - k_w \left(U_{AK} + \frac{P_M}{I_0 + I_1} \right) + \left[U_m - \left(U_{AK} + \frac{P_M}{I_0 + I_1} \right) \right] \frac{\theta_M}{T} \left(1 - e^{-\frac{k_w T}{\theta_M}} \right) \approx 0$$

Uzyskanie wyższych dokładności pomiarów wymaga, aby wartość funkcji wykładniczej była jak najmniejsza. Jeśli $k_w T \gg \theta_M$, to przybliżoną wartość stałej czasowej można wyrazić w sposób jawny

$$(12) \quad \theta_M \approx \frac{U_{sr} - k_w \left(U_{AK} + \frac{P_M}{I_0 + I_1} \right)}{U_m - \left(U_{AK} + \frac{P_M}{I_0 + I_1} \right)} T$$

Jeśli uwzględnimy impulsy odpowiadające różnicy prądów (rys. 2b), to zmierzone wartości napięć średniego U_{sr} i zgięcia U_p przebiegu spełniają przybliżone równanie nieliniowe

$$(13) \quad U_{sr} - k_w \left(U_{AK} + \frac{P_M}{I_1 - I_0} \right) + \left[U_p - \left(U_{AK} + \frac{P_M}{I_1 - I_0} \right) \right] \frac{\theta_M}{T} \left(1 - e^{-\frac{k_w T}{\theta_M}} \right) \approx 0$$

Tutaj też wartość funkcji eksponentialnej powinna być jak najmniejsza. Jeśli $k_w T \gg \theta_M$, to przybliżoną wartość stałej czasowej można wyrazić w sposób jawny

$$(14) \quad \theta_M \approx \frac{U_{sr} - k_w \left(U_{AK} + \frac{P_M}{I_1 - I_0} \right)}{U_p - \left(U_{AK} + \frac{P_M}{I_1 - I_0} \right)} T$$

Ponieważ model Cassiego (2) łuku silnoprądowego jest liniowy ze względu na kwadrat konduktancji g^2 , to można go także scharakteryzować za pomocą pojedynczej stałej czasowej θ_C . W tym celu można rozpatrzeć impulsy napięcia łuku odpowiadające albo sumie, albo różnicy prądów. Jeśli uwzględnimy impulsy odpowiadające sumie (rys. 2a), to zmierzone wartości napięć średniego U_{sr} i maksymalnego U_m spełniają przybliżone równanie nieliniowe

$$(15) \quad U_{sr} - k_w (U_{AK} + U_C) + \left[U_m - (U_{AK} + U_C) \right] \frac{\theta_C}{T} \left(1 - e^{-\frac{k_w T}{\theta_C}} \right) \approx 0$$

Aby uzyskać wyższą dokładność pomiarów, wartość funkcji wykładniczej powinna być jak najmniejsza. Jeśli $k_w T \gg \theta_C$, to przybliżoną wartość stałej czasowej można wyrazić w sposób jawny

$$(16) \quad \theta_C \approx \frac{U_{sr} - k_w (U_{AK} + U_C)}{U_m - (U_{AK} + U_C)} T$$

Jeśli uwzględnimy impulsy odpowiadające różnicy prądów (rys. 2b), to zmierzone wartości napięć średniego U_{sr} i w punktach zgięcia U_p spełniają przybliżone równanie nieliniowe

$$(17) \quad U_{sr} - k_w (U_{AK} - U_C) + \left[U_p - (U_{AK} + U_C) \right] \frac{\theta_C}{T} \left(1 - e^{-\frac{k_w T}{\theta_C}} \right) \approx 0$$

Podobnie, jak poprzednio wartość funkcji eksponentialnej powinna być jak najmniejsza. Jeśli $k_w T \gg \theta_C$, to przybliżoną wartość stałej czasowej można wyrazić w sposób jawny

$$(18) \quad \theta_C \approx \frac{U_{sr} - k_w (U_{AK} + U_C)}{U_p - (U_{AK} + U_C)} T$$

Model Pentegowa łuku elektrycznego wykorzystuje także pojedynczą wartość stałej czasowej θ_{P1} . Rozpatrzmy model łuku (3) z charakterystyką statyczną typu Ayrton [2]. W tym celu można rozpatrzeć albo impulsy napięciowe odpowiadające sumie prądów, albo impulsy napięciowe odpowiadające różnicy prądów łuku. Jeśli uwzględnimy impulsy odpowiadające sumie (rys. 2a), to zmierzone wartości napięć średniego U_{sr} i maksymalnego U_m spełniają przybliżone równanie algebraiczne nieliniowe

$$(19) \quad U_{sr} - k_w \left(U_{AK} + U_{CP} + \frac{P_{MP}}{I_1 + I_0} \right) + \left[U_m - \left(U_{AK} + U_{CP} + \frac{P_{MP}}{I_1 + I_0} \right) \right] \frac{\theta_{P1}}{T} \left(1 - e^{-\frac{k_w T}{\theta_{P1}}} \right) \approx 0$$

Żądamy aby wartość funkcji wykładniczej była jak najmniejsza. Jeśli $k_w T \gg \theta_{P1}$, to przybliżoną wartość stałej czasowej można wyrazić w sposób jawny

$$(20) \quad \theta_{P1} \approx \frac{U_{sr} - k_w \left(U_{AK} + U_{CP} + \frac{P_{MP}}{I_1 + I_0} \right)}{U_m - \left(U_{AK} + U_{CP} + \frac{P_{MP}}{I_1 + I_0} \right)} T$$

Jeśli uwzględnimy impulsy odpowiadające różnicy prądów (rys. 2b), to zmierzone wartości napięć średniego U_{sr} i odpowiadającego punktowi zgięcia U_p spełniają przybliżone równanie nieliniowe

$$(21) \quad U_{sr} - k_w \left(U_{AK} + U_{CP} + \frac{P_{MP}}{I_1 - I_0} \right) + \left[U_p - \left(U_{AK} + U_{CP} + \frac{P_{MP}}{I_1 - I_0} \right) \right] \frac{\theta_{P1}}{T} \left(1 - e^{-\frac{k_w T}{\theta_{P1}}} \right) \approx 0$$

Aby uzyskać dokładniejszy wynik pomiaru, wartość funkcji wykładniczej powinna być jak najmniejsza. Jeśli $k_w T \gg \theta_{P1}$, to przybliżoną wartość stałej czasowej można wyrazić w sposób jawny

$$(22) \quad \theta_{P1} \approx \frac{U_{sr} - k_w \left(U_{AK} + U_{CP} + \frac{P_{MP}}{I_1 - I_0} \right)}{U_p - \left(U_{AK} + U_{CP} + \frac{P_{MP}}{I_1 - I_0} \right)} T$$

Podobną metodę można zastosować do analizy procesów w obwodzie z modelem łuku z charakterystyką statyczną hiperboliczno-liniową (4). W tym celu można rozpatrzeć albo impulsy napięciowe odpowiadające sumie prądów, albo impulsy napięciowe odpowiadające różnicy prądów łuku. Jeśli uwzględnimy impulsy odpowiadające sumie (rys. 2a), to zmierzone wartości napięć średniego U_{sr} i maksymalnego U_m spełniają przybliżone równanie nieliniowe

$$(23) \quad U_{sr} - k_w \left[U_{AK} + \frac{P_{MR}}{I_1 + I_0} + R_p (I_1 + I_0) \right] + \left[U_m - \left[U_{AK} + \frac{P_{MR}}{I_1 + I_0} + R_p (I_1 + I_0) \right] \right] \times \frac{\theta_{P2}}{T} \left(1 - e^{-\frac{k_w T}{\theta_{P2}}} \right) \approx 0$$

Wymagamy, aby wartość funkcji wykładniczej była jak najmniejsza. Jeśli $k_w T \gg \theta_{p2}$, to przybliżoną wartość stałej czasowej można wyrazić w sposób jawny

$$(24) \quad \theta_{p2} \approx \frac{U_{sr} - k_w \cdot \left[U_{AK} + \frac{P_{MR}}{I_1 + I_0} + R_p(I_1 + I_0) \right]}{U_m - \left[U_{AK} + \frac{P_{MR}}{I_1 + I_0} + R_p(I_1 + I_0) \right]} T$$

Jeśli uwzględnimy impulsy napięcia odpowiadające różnicy prądów (rys. 2b), to zmierzone wartości napięć średniego U_{sr} i odpowiadającego punktowi zgięcia U_p spełniają przybliżone równanie nieliniowe

$$(25) \quad U_{sr} - k_w \left[U_{AK} + \frac{P_{MR}}{I_1 - I_0} + R_p(I_1 - I_0) \right] - \left\{ U_p - \left[U_{AK} + \frac{P_{MR}}{I_1 - I_0} + R_p(I_1 - I_0) \right] \right\} \times \frac{\theta_{p2}}{T} \left(1 - e^{-\frac{k_w T}{\theta_{p2}}} \right) \approx 0$$

Aby uzyskać dokładniejszy wynik, wartość funkcji wykładniczej powinna być jak najmniejsza. Jeśli $k_w T \gg \theta_{p2}$, to przybliżoną wartość stałej czasowej można wyrazić w sposób jawny

$$(26) \quad \theta_{p2} \approx \frac{U_{sr} - k_w \left[U_{AK} + \frac{P_{MR}}{I_1 - I_0} + R_p(I_1 - I_0) \right]}{U_p - \left[U_{AK} + \frac{P_{MR}}{I_1 - I_0} + R_p(I_1 - I_0) \right]} T$$

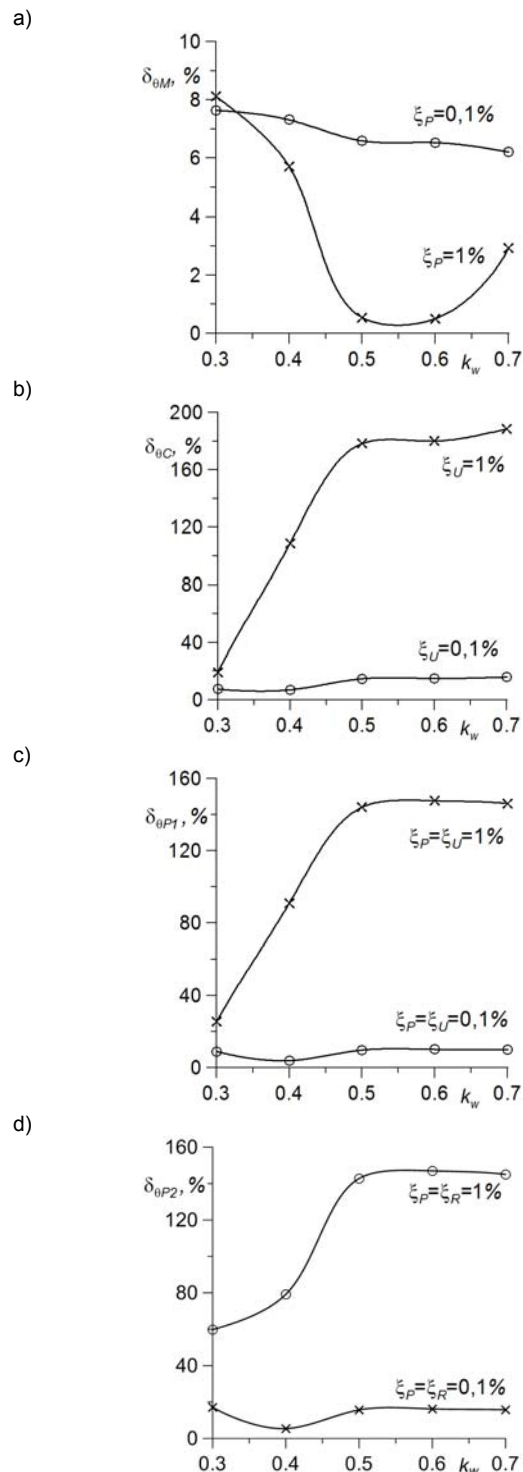
Badanie wpływu zaburzeń długości łuku elektrycznego na dokładność wyznaczania parametrów jego modeli matematycznych

W artykule dokonano jednoczesnej weryfikacji przedstawionych zależności analitycznych i zbadania wpływu zaburzeń długości łuku na dokładność wyznaczania parametrów modeli matematycznych. W modelu Mayra zakłada się stałą moc $P_M = \text{const}$. Jednak z aproksymacji charakterystyki statycznej $P_M = U_{stat} I_{stat}$ wynika, że zaburzenia długości łuku prowadzą do zmian napięcia, a przez to do zmian mocy łuku. W rozważaniach przyjęto więc $P_M = P_{M0} \cdot (1 + \xi_M/100)$, gdzie ξ_M – procentowe zaburzenie mocy. Podobnie w modelu Cassiego zakłada się stałą wartość napięcia $U_C = \text{const}$. Jednak z aproksymacji charakterystyki statycznej wynika, że zaburzenia długości łuku prowadzą do jego zmian $U_C = U_{C0} \cdot (1 + \xi_C/100)$, gdzie ξ_C – procentowe zaburzenie napięcia. Podobne zaburzenia uwzględniono w modelu Pentegowa (1): $P_{MP} = P_{M0} \cdot (1 + \xi_M/100)$ i $U_{CP} = U_{C0} \cdot (1 + \xi_C/100)$ oraz w modelu Pentegowa (2): $P_{MR} = P_{M0} \cdot (1 + \xi_M/100)$ i $R_p = R_{p0} \cdot (1 + \xi_R/100)$.

Modele matematyczne łuku (tab. 1) poddano badaniom symulacyjnym w programie MATLAB-Simulink. W tym celu utworzono prosty obwód z wymuszeniem prądowym prostokątnym o częstotliwości 25 Hz i obciążeniem w postaci modelu łuku. Do generacji zaburzeń $\xi(t)$ wykorzystano generator losowy o częstotliwości taktowania 300 Hz połączony kaskadowo z członem inercyjnym pierwszego rzędu o stałej czasowej $T = 0,35$ ms. W celu uproszczenia analizy założono jednakowe poziomy procentowe zakłóceń napięcia i mocy łuku. Wyniki badań z wykorzystaniem uproszczonych jawnych zależności na stałe czasowe pokazano na rysunku 3.

Z wykresów widać, że w przypadkach niskiego poziomu zaburzeń ($\xi \approx 0,1\%$) błąd metody wyznaczania stałej

czasowej nie przewyższa kilkunastu procent. Największą dokładność uzyskuje się w otoczeniu wartości współczynnika wypełnienia $k_w = 0,5$. Z porównania wykresów wynika także, że model Mayra wyróżnia się największą odpornością na zaburzenia i jednocześnie odwrotną na nie reakcją. Większa amplituda zaburzeń czy też zmiana ich charakteru może prowadzić nawet do wyraźnego zmniejszenia błędów w okolicy $k_w = 0,5$. W przypadkach dużych wartości zaburzeń błędy wyznaczania parametrów osiągają bardzo duże wartości i proponowana metoda traci swą użyteczność.



Rys. 3. Wpływ działania zaburzeń długości łuku o różnej intensywności ξ na błąd wyznaczania stałych czasowych modeli matematycznych łuku: a) Mayra; b) Cassiego; c) Pentegowa (1); d) Pentegowa (2) (parametry modeli są takie, jak na rys. 1)

Wnioski:

1. Jeśli amplitudy zakłóceń długości łuku są niskie (poniżej 0,1%), to opracowana metoda wyznaczania parametrów modeli łuku elektrycznego zasilanego ze źródła o fali prądowej prostokątnej umożliwi osiągnięcie błędu niedokładności poniżej 10 %.
2. Proponowana metoda pozwala stosować względnie słabe wymuszenia stałoprądowe, a przez to zaburzenia procesów technologicznych mogą być nieznaczne.
3. Praktyczna realizacja metody wymaga zastosowania składowej stałej generowanej fali prostokątnej lub dodatkowego źródła prądowego małej mocy, przez co jest ona prosta i może być tania.
4. Wyznaczanie wartości maksymalnych impulsów napięcia U_m , odpowiadających sumie prądów, może zapewnić łatwiejszą realizację i większą dokładność w porównaniu z wyznaczaniem wartości napięcia zgięcia U_p na przebiegach odpowiadających różnicy prądów.
5. W celu określenia stałych czasowych, pomiary wartości średnich i maksymalnych napięcia wyprostowanego jednopółkowo mogą być realizowane z użyciem obecnie popularnych przyrządów (multimetrów cyfrowych lub komputerów z kartami pomiarowymi).

LITERATURA

- [1] Dobaj E., Maszyny i urządzenia spawalnicze, WNT, Warszawa 1998.
- [2] 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 2014r, Materiały konferencyjne, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2014, 83-92.
- [3] Лесков Г.И., Электрическая сварочная дуга, Изд-во Машиностроение, Москва 1970.
- [4] Sawicki A., Haltof M., Wyznaczenie parametrów modeli łuku elektrycznego urządzeń TIG, XXV Symposium Środowiskowe PTZE Zastosowania Elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Medycynie, Wieliczka 28.06.-01.07.2015, 271-273.
- [5] Пентегов И.В., Математическая модель столба динамической электрической дуги, *Автоматическая сварка* 279 (1976), № 6, 8-12.
- [6]

Autorzy: Dr hab. inż. Antoni Sawicki prof. PCz., Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: sawicki.a7@gmail.com; mgr inż. Maciej Haltof, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: maciej@haltof.pl.