

WYBRANE ZAGADNIENIA DIAGNOSTYKI IMITATORÓW ŁUKU SPAWALNICZEGO

Antoni SAWICKI

Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny
tel.: 34 32 50 869 e-mail: sawicki.a7@gmail.com

Streszczenie: Podano uzasadnienie techniczne prowadzenia badań diagnostycznych źródeł spawalniczych z wykorzystaniem elektronicznych imitatorów łuku. Stosowanie ich jako elementów wzorcowych, obciążuje użytkowników do wykonywania odpowiednich kalibracji i adjustacji. Przedstawiono struktury układów do diagnozowania imitatora łuku wykorzystującego zadany model matematyczny Pentegowa. Uwzględniono dwa rodzaje działającego wzorcowego wymuszenia prądowego o fali sinusoidalnej i prostokątnej. Zaprezentowano strukturę układu diagnostycznego wykorzystującego metodę porównawczą połączonych szeregowo imitatora wzorcowego i imitatora podlegającego adjustacji. Zbadano wpływ odchyłeń parametrów modelu matematycznego badanego imitatora na wartości powstających błędów współczynnika THD spadków napięć na imitatorach.

Słowa kluczowe: łuk elektryczny, imitator łuku, diagnostyka imitatorów łuku.

1. WSTĘP

Urządzenia elektryczne do spawania łukowego lub plazmowego stanowią obecnie bardzo znaczącą część wyposażenia technologicznego wielu zakładów i warsztatów produkcyjnych i remontowych. Realizowane z ich użyciem różnorodne operacje technologiczne spajania, cięcia i napawania powinny zapewniać: wysoką jakość technologiczną procesów, bezpieczeństwo zatrudnionego personelu, minimalne szkodliwe oddziaływania na środowisko i personel, wysoką efektywność ekonomiczną procesów i minimalny wpływ poziomu umiejętności operatorów oraz zaburzeń warunków zewnętrznych na jakość produkcji. Bardzo duża uniwersalność i szerokie możliwości realizacji procesów technologicznych w różnych warunkach powodują, że źródła zasilania są narażone na różne uszkodzenia. Zarówno producenci, jak i remontowcy dokonują oceny jakości tych źródeł najczęściej na podstawie badań statycznych i technologicznych (dynamicznych). Ograniczone badania statyczne i dynamiczne bezłukowe [1] nie zapewniają jednak właściwej oceny źródeł zasilania. Ze względu na bardzo szerokie możliwości zmian ich parametrów, dużą pracochłonność badań, duże zużycie energii i materiałów, ograniczenia czasowe i wysokie koszty, coraz bardziej preferowane jest wykorzystanie elektronicznych imitatorów łuków spawalniczych.

Budowanie i stosowanie imitatorów łuku ma uzasadnienie w przypadkach diagnostyki powszechne użytkowanych urządzeń spawalniczych. Stosunkowo małe moce łuków spawalniczych umożliwiają elektroniczne (półprzewodnikowe) odwzorowanie ich właściwości jako elementów

silnie nieliniowych i słabo inercyjnych. Natomiast właściwości elektryczne łuków silnopiędowych urządzeń elektrotermicznych (np. pieców, reaktorów) stanowią techniczne ograniczenia praktycznej realizacji imitatorów wielkich mocy. Ponadto te urządzenia są mniej liczne w stosunku do spawalniczych i często charakteryzują się indywidualnymi cechami zarówno łuków, jak i układów zasilających. Dlatego diagnostyka takich urządzeń jest często wykonywana lokalnie podczas realizacji procesów technologicznych z użyciem odpowiednio dobraćanego zestawu aparatury pomiarowej.

Ze względu na różne technologie spawania, realizowane w różnych warunkach fizycznych i chemicznych, mogą występować różnego rodzaju łuki. Budowa i działanie imitatora łuku spawalniczego wymaga określenia modelu matematycznego łuku. Ze względu na konieczność jego elektronicznej realizacji, model ten powinien być stosunkowo prosty i łatwo strojony w zależności od przewidywanych charakterystyk statycznych i dynamicznych łuku fizycznego. Do takich celów szczególnie nadają się modele hybrydowe [2] i różne warianty modelu Pentegowa [3-5]. Ze względu na dużą złożoność budowy imitatorów i ograniczony rynek usług diagnostycznych tylko niektóre instytucje badawcze i firmy mogą realizować zamówienia na produkcję imitatorów. Z historycznego punktu widzenia jest to więc bardzo młoda dziedzina diagnostyki. W badaniach diagnostycznych układu źródła spawalnicze – imitator łuku spawalniczego mogą występować trzy sytuacje:

- 1) dysponujemy elektronicznym imitatorem łuku, który uznajemy za wzorcowy, a diagnostyce podlegają elektroniczne źródła zasilania;
- 2) dysponujemy elektronicznym źródłem zasilania, które uznajemy za wzorcowe, a diagnostyce podlegają elektroniczne imitatory łuku;
- 3) dysponujemy elektronicznym imitatorem łuku, który uznajemy za wzorcowy, a diagnostyce podlegają inne elektroniczne imitatory łuku.

Ze względu na bardzo pożądaną efektywność technologiczną stosowania sprawnych źródeł zasilania pierwszy przypadek można uznać za najbardziej naturalny i bardziej powszechny od pozostałych. Jednak trudne warunki pracy imitatorów, służących badaniom przeciwieście także niesprawnych źródeł prądu, też mogą prowadzić do skracania ich żywotności i do awarii. Zagadnieniom diagnostycznym źródeł spawalniczych z użyciem wzorcowych imitatorów łuku poświęcono szereg prac [3, 5]. Natomiast w niniejszym artykule zostały rozważone przypadki drugi i trzeci.

2. UKŁADY DIAGNOSTYCZNE IMITATORÓW Z WZORCOWYM ŹRÓDŁEM PRĄDOWYM

Sprawdzenie poprawności działania imitatora łuku wymaga zastosowania wzorcowego źródła zasilania o dobrze znanych charakterystykach statycznych i dynamicznych. Zwykle takie źródło ma nieliniowe charakterystyki zewnętrzne. Natomiast imitator powinien umożliwiać imitację zadanych charakterystyk łuku. W wyborze tych charakterystyk należy kierować się przeznaczeniem technologicznym łuku i dostępnością analitycznych zależności umożliwiających pomiarowe wyznaczanie parametrów imitowanego łuku. Zwykle te zależności dotyczą liniowych modeli matematycznych. Obecnie znana jest nieduża liczba tych zależności [6, 7]. Dodatkowo wymagają one zastosowania określonych przebiegów prądu. Zwykle jest to prąd o przebiegu sinusoidalnym lub prostokątnym. W przypadku zastosowania prądu sinusoidalnego możliwe jest wykorzystanie metod spektralnych lub całkowych wyznaczania parametrów modeli matematycznych [6]. Natomiast w przypadku zastosowania prądu prostokątnego opracowano kilka różnych metod wyznaczania stałych czasowych modeli łuku [7, 8]. Jednakże wtedy charakterystyki statyczne powinny być wyznaczone innymi prostymi metodami [8].

Do badań wybrano stosunkowo uniwersalny model Pentegowa kolumny łuku z charakterystyką statyczną napięciowo-prądową hiperboliczno-liniową opisaną zależnością

$$U_k(I) = R_p I + \frac{P_M}{I} \quad (1)$$

gdzie: $R_0 = bL_0$, $P_M = c + dL_0$ – stałe współczynniki aproksymacji; I – natężenie prądu stałego; L_0 – stała długość łuku.

Związek między kwadratem prądu stanu i_θ i kwadratem prądu rzeczywistego łuku i opisuje równanie różniczkowe liniowe pierwszego rzędu [9, 10]

$$\theta_p \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i^2 \quad (2)$$

gdzie θ_p – stała czasowa modelu matematycznego.

Model Pentegowa odwzorowuje nieliniowy dwójnik obwodu elektrycznego, który jest: energetycznie zbilansowany, cieplnie inercyjny I rzędu, matematycznie liniowy, stacjonarny i elektrycznie bezinercyjny.

Założmy, że w obwodzie z łukiem o charakterystyce statycznej (1) działa wymuszenie prądowe sinusoidalnie zmienne o pulsacji ω i wartości amplitudy I_m

$$i = I_m \cos \omega t = \sqrt{2} I_{sk} \cos \omega t \quad (3)$$

Wzory na obliczanie parametrów charakterystyki statycznej modelu [6] są następujące:

$$P_M = \frac{(U_{sk} I_{sk})^2 - P^2}{R I_{sk}^2 - P} \quad (4)$$

i

$$R_p = \frac{R P - U_{sk}^2}{R I_{sk}^2 - P} \quad (5)$$

Stałą czasową określa wzór

$$\theta_p = \frac{1}{2\omega \sqrt{\left[\frac{(U_{sk} I_{sk})^2 + R I_{sk}^2 (R I_{sk}^2 - 2P)}{(U_{sk} I_{sk})^2 - P^2} \right]^2 - 1}} \quad (6)$$

gdzie: U_{sk} – napięcie skuteczne na kolumnie łuku; P – wartość średnia funkcji mocy chwilowej; R – wartość średnia rezystancji kolumny łuku.

Kompensacja przyelektrodowych spadków napięcia może odbywać się programowo w układzie pomiarowym lub fizycznie z wykorzystaniem odpowiedniego układu [8].

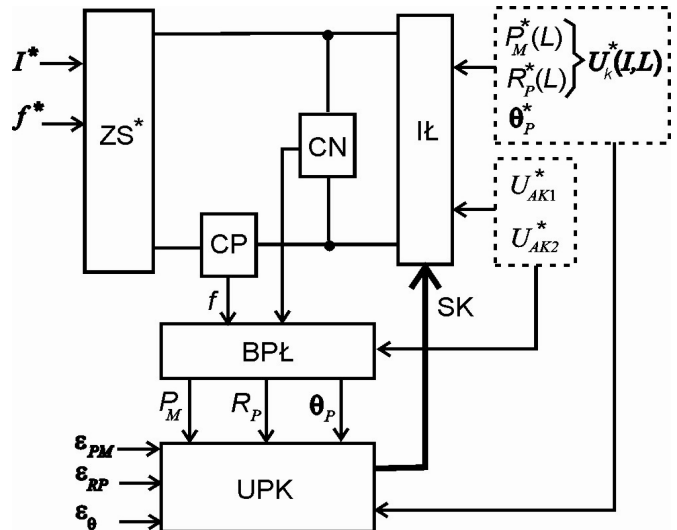
Na rysunku 1 pokazano strukturę układu diagnostycznego do badania imitatorów łuku spawalniczego w obwodzie z wymuszeniem prądowym sinusoidalnym. Wzorcowe źródło prądu spawania ZS^* wytwarza zadany przebieg o wartości skutecznej I_{sk} i częstotliwości f . Jest ono obciążone badanym imitatorem łuku $I\mathbb{L}$. Zarówno do imitatora łuku, jak i do układu diagnostycznego wprowadzany jest zestaw danych definiujących charakterystyki statyczne i dynamiczne łuku. W układzie diagnostycznym obliczane są błędy względne zmierzonych parametrów imitowanego łuku:

$$|P_M - P_M^*| / P_M^* < \varepsilon_{PM} \quad (7)$$

$$|R_p - R_p^*| / R_p^* < \varepsilon_{RP} \quad (8)$$

$$|\theta_p - \theta_p^*| / \theta_p^* < \varepsilon_{\theta P} \quad (9)$$

gdzie: P_M^* , R_p^* , θ_p^* – zadane wartości parametrów; ε_{PM} , ε_{RP} , $\varepsilon_{\theta P}$ – zadane wartości błędów pomiarowych. Jeśli w wybranym zakresie zmian prądu te warunki są spełnione, to można uznać, że badany imitator działa poprawnie.



Rys. 1. Schemat układu diagnostycznego do badania imitatora łuku w obwodzie z prądem sinusoidalnie zmiennym (ZS^* – wzorcowe źródło prądu sinusoidalnego; $I\mathbb{L}$ – badany elektroniczny imitator łuku; CN – czujnik napięcia; CP – czujnik prądu; BPŁ – blok obliczania parametrów imitowanego łuku; UPK – układ pomiarowo-kontrolny; SK – sygnały korekcyjne)

Stosowanie wymuszenia prądowego prostokątnego pozwala na lepszą stabilność płonienia łuku i umożliwia łatwiejszą realizację niektórych procesów technologicznych (np. TIG). Dlatego budowane imitatory powinny być stosowane także do diagnostyki źródeł wytwarzających przebiegi prostokątne

lub inne okresowe, np. o fali trapezowej lub trójkątnej. Jeśli założyć, że współczynnik wypełnienia przebiegu prostokątnego wynosi $k_w = h/T$, to na podstawie metody linearyzacyjnej [7] można pomiarowo określić stałą czasową łuku opisanego modelem (1) i (2) na podstawie wzoru

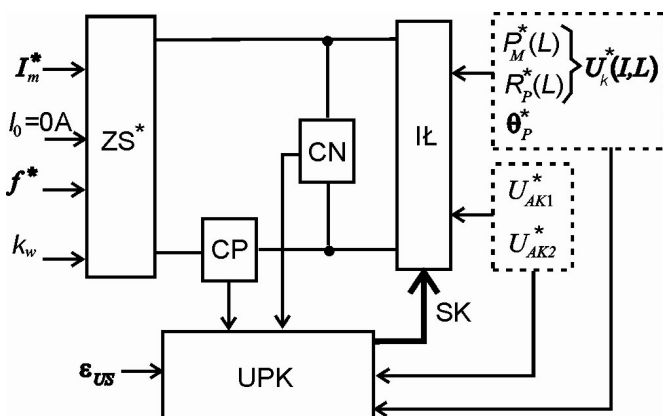
$$\frac{\theta_p}{T} \approx \frac{\frac{P_1}{P_M + R_p I_1^2} - \frac{P_2}{P_M + R_p I_2^2} - 2k_w + 1}{\frac{P_M + R_p I_2^2 \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2}{P_M + R_p I_1^2} - \frac{P_M + R_p I_1^2 \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2}{P_M + R_p I_2^2}} \quad (10)$$

gdzie: u_{sr1} – wartość średnia półfali napięcia w przedziale (0, h); u_{sr2} – wartość średnia półfali napięcia w przedziale (h , T); I_1, I_2 – amplitudy półfal prądu; $P_1 = u_{sr1} I_1$, $P_2 = u_{sr2} I_2$ – moce średnie w półfalach prądu

W układzie diagnostycznym do badania imitatorów łuku zastosowano wzorcowe źródło prądu spawania ZS^* generujące wymuszenie prostokątne. Wytwarza ono przebieg o zadanych wartościach: amplitudy I_m , składowej stałej I_0 , częstotliwości $f = 1/T$ i współczynnika wypełnienia k_w . Jest ono obciążone badanym imitatorem łuku $I\ell$. Zarówno do imitatora łuku, jak i do układu diagnostycznego wprowadzany jest zestaw danych definiujących charakterystyki statyczne i dynamiczne łuku. W układzie diagnostycznym obliczane są błędy względne zmierzonych parametrów imitowanego łuku. Badania obejmują dwa etapy opisane poniżej:

Na pierwszym etapie badań (rys. 2) mogą być wyznaczone charakterystyki statyczne z założeniem $I_0 = 0$ A i z quasi zmienną wartością amplitudy prądu I_m . W takim przypadku (nawet jeśli przebieg jest nieprzemienne lecz o $|i(t)| = \text{const}$) nie ujawniają się efekty dynamiczne płonienia łuku. Wartości częstotliwości i współczynnika wypełnienia fali prądowej mogą być praktycznie dowolne. Wyznaczone punkty pomiarowe charakterystyki są porównywane z punktami na zadanej charakterystyce statycznej. Sposób obliczania błędu dopasowania opisuje wzór

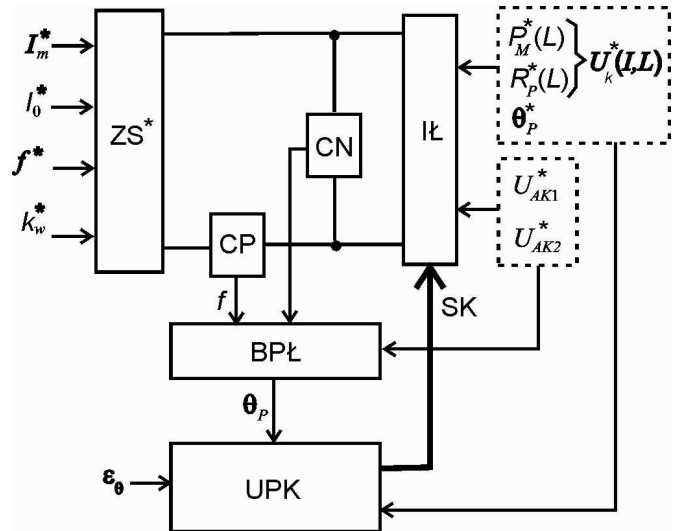
$$\sum_{i=1}^n \left[U_i - \left(\frac{P_M}{I_i} + R_p I_i \right) \right]^2 < \varepsilon_{US} \quad (11)$$



Rys. 2. Schemat układu diagnostycznego do badania statycznego imitatora łuku w obwodzie z prądem prostokątnym (ZS^* - wzorcowe źródło prądu prostokątnego; $I\ell$ - badany elektroniczny imitator łuku; CN - czujnik napięcia; CP - czujnik prądu; UPK - układ pomiarowo-kontrolny; SK - sygnały korekcyjne)

Jeśli ten warunek jest spełniony, to można uznać, że pod względem statycznym imitator działa poprawnie.

Drugi etap diagnostyki polega na wyznaczeniu stałej czasowej modelu łuku. Do jego realizacji można wykorzystać układ o strukturze pokazanej na rysunku 3. W celu ujawnienia się stanów dynamicznych imitatora, razem z wymuszeniem prostokątnym o amplitudzie I_m działa składowa stała prądu I_0 . Wtedy półfale prądu mają amplitudy $I_1 = I_m + I_0$, $I_2 = -I_m + I_0$. Kryterium błędu pomiaru stałej czasowej opisuje wzór (9). Jeśli ten warunek jest spełniony, to można uznać, że pod względem dynamicznym imitator działa poprawnie.



Rys. 3. Schemat układu diagnostycznego do badania dynamicznego imitatora łuku w obwodzie z prądem prostokątnym (ZS^* - wzorcowe źródło prądu prostokątnego; $I\ell$ - badany elektroniczny imitator łuku; CN - czujnik napięcia; CP - czujnik prądu; BPŁ - blok obliczania parametrów imitowanego łuku; UPK - układ pomiarowo-kontrolny; SK - sygnały korekcyjne)

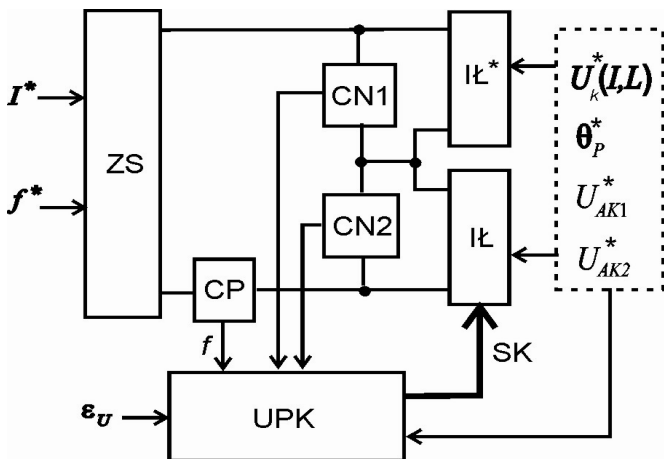
3. UKŁADY DIAGNOSTYCZNE IMITATORÓW Z WZORCOWYM IMITATOREM ŁUKU

Możliwa jest sytuacja, w której laboratorium diagnostyczne dysponuje wysokiej jakości imitatorem łuku spawalniczego uznawanym za wzorcowy. Natomiast nie dysponuje ono wzorcowym źródłem spawalniczym, lecz źródłem o szerokim zakresie zmian nieliniowych charakterystyk napięciowo-prądowych zewnętrznych i to nawet znacznie odbiegających od stromo opadających. Również zakres planowanych badań może wychodzić poza opracowane i dostępne metody eksperymentalnego wyznaczania parametrów modeli matematycznych łuku. W tej sytuacji można zastosować metodę porównawczą.

Ze względu na nieliniowe charakterystyki napięciowo-prądowe łuków możliwe jest ich stabilne płonienie w obwodzie połączonym szeregowo. Przebiegi czasowe prądu wymuszającego mogą być wtedy dowolne. Schemat układu diagnostycznego do badania imitatorów łuku spawalniczego może mieć postać pokazaną na rysunku 4. W przypadku nieidealnego źródła prądowego każdy z imitatorów wpływa na powstawanie odkształceń fali prądu, który jednocześnie przepływa przez oba imitatory. Jako kryterium błędu wygodnie jest zastosować porównanie współczynnika zawartości harmonicznych spadków napięć na imitatorach zgodnie z wyrażeniem

$$\left| \frac{THD_U - THD_U^*}{THD_U^*} \right| < \varepsilon_{TV} \quad (12)$$

Jeśli w wybranym zakresie zmian prądu ten warunek jest spełniony, to można uznać, że badany imitator działa poprawnie zarówno pod względem statycznym, jak i dynamicznym.



Rys. 4. Schemat układu diagnostycznego do badania imitatora łuku metodą porównawczą (ZS - źródło prądu; IŁ - badany elektroniczny imitator łuku; IŁ* - wzorcowy elektroniczny imitator łuku; CN1, CN2 - czujniki napięcia; CP - czujnik prądu; UPK - układ pomiarowo-kontrolny; SK - sygnały korekcyjne)

Ze względu na szeregową (w przybliżeniu trójwarstwową) strukturę łuku fizycznego budowane imitatory najczęściej składają się z kilku szeregowo połączonych układów elektronicznych [3, 5]. Dzięki temu możliwe jest łatwe wyłączenie z obwodu poszczególnych układów imitujących przyelektrodowe spadki napięcia. Takie działanie jest wygodniejsze w porównaniu ze stosowaniem dodatkowego zewnętrznego elektronicznego układu kompensatora przyelektrodowych spadków napięcia [8]

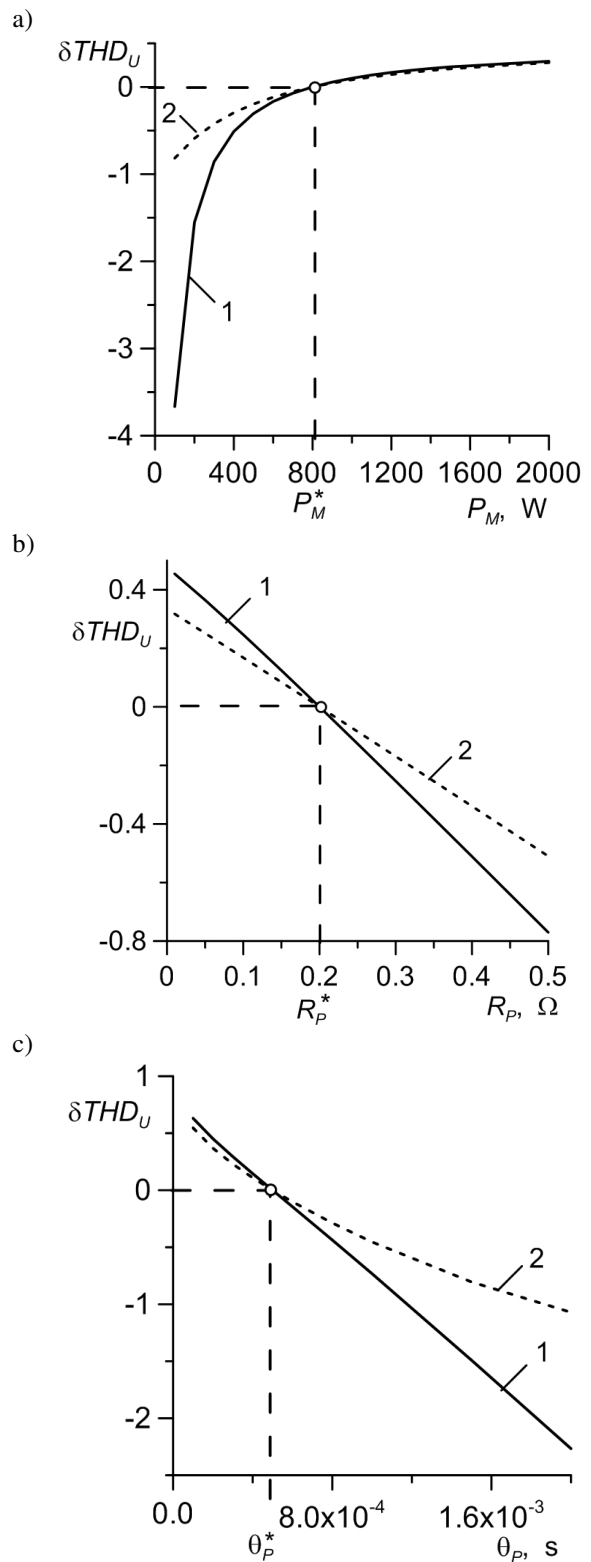
W celu zbadania wpływu odchyłeń poszczególnych parametrów modelu matematycznego diagnozowanego imitatora zakładamy, że różnią się one od parametrów modelu imitatora wzorcowego. Te odchylenia nie są jednocześnie, lecz występują w kolejności wyszczególnionej w opisie rysunku 5. Imitator wzorcowy IŁ* ma następujące parametry: $U_{AK}^* = 16 \text{ V}$, $P_M^* = 800 \text{ W}$, $R_p^* = 0,2 \Omega$, $\theta_p^* = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$. Parametry przebiegu sinusoidalnego, generowanego przez idealne źródło prądowe, są następujące: $I_m = 100 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Odchylenia wybranego parametru badanego imitatora prowadzą do powstawania odchyłeń wartości skutecznych spadków napięć i wartości współczynnika THD_U opisanych wzorem

$$\delta THD_U = (THD_U - THD_U^*) / THD_U^* \quad (13)$$

gdzie: THD_U^* - wartość zadana współczynnika.

Na rysunku 5 liniami ciągłymi oznaczono przypadki pełnej eliminacji napięcia U_{AK} , a liniami przerywanymi przypadki braku takiej eliminacji. Z przedstawionych wykresów widać, że zastosowanie eliminacji przyelektrodowych spadków napięcia zwiększa stromości krzywych, co znacznie ułatwia strojenie badanego imitatora. W praktyce najbardziej niekorzystny przypadek diagnostyczny wystąpi podczas zmian mocy łuku w zakresie $P_M > P_M^*$. Dlatego wtedy deklarowana dopuszczalna wartość odchylenia względnego δTHD_U powinna być najmniejsza.

Następnie zbadano wpływ odchyłeń parametrów diagnozowanego imitatora na efekty działania metody porównawczej w warunkach zasilania z rzeczywistego źródła prą-

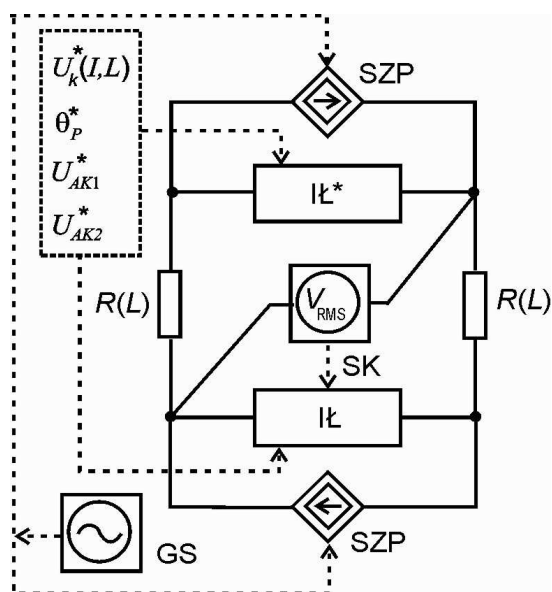


Rys. 5. Wpływ odchyłeń parametrów modelu łuku diagnozowanego imitatora na odchylenie wartości współczynnika δTHD_U metody porównawczej: a) wpływ odchyłeń wartości mocy P_M ; b) wpływ odchyłeń wartości rezystancji R_p ; c) wpływ odchyłeń wartości stałej czasowej θ_p

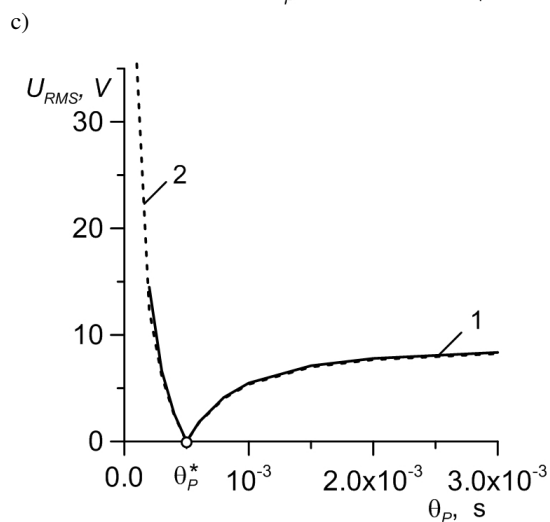
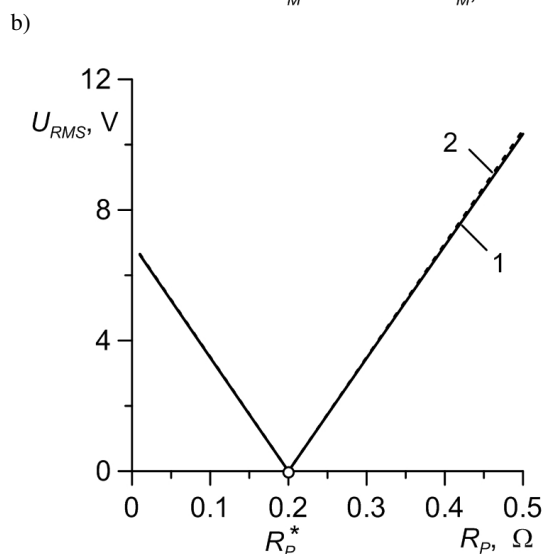
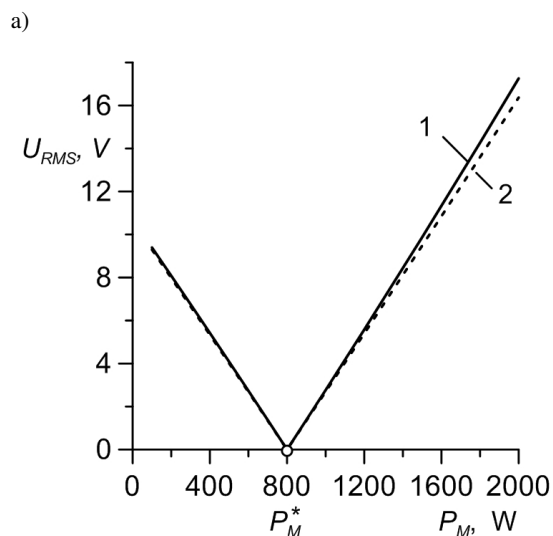
dowego. W tym celu do poprzedniego źródła prądowego dodatkowo włączono równolegle stosunkowo małą admittancję ($G_{zs} = 1/50 \text{ S}$; $B_{zs} = 1/(\omega \cdot 10 \cdot 10^{-3}) \text{ S}$). Powoduje to odkształcenie prądu od przebiegu sinusoidalnego, zmniejszenie jego wartości skutecznej i przez to pogorszenie stabilności działania układu (ułatwienie zgaszenia łuku). Parametry modelu łuku imitatora wzorcowego pozostawiono bez

zmian. Wyniki przeprowadzonych symulacji są bardzo zbliżone do pokazanych na rysunku 5. Na ich podstawie stwierdzono, że w warunkach występowania napięcia U_{AK} użycie rzeczywistego źródła prądowego ogranicza zakres mocy P_M stabilnego działania imitatora (płonięcia łuku) do 900 W. Oprócz tego podobny efekt występuje w zakresie małych wartości stałej czasowej $\theta_p < 4 \cdot 10^{-4}$ s. Stąd wniosek, że eliminowanie efektu przyelektrodowych spadków napięcia umożliwia rozszerzenie zakresów badań diagnostycznych imitatorów elektronicznych łuku.

Na podstawie znanych struktur mostków dwuprądowych [11] można zaproponować analogiczny układ diagnostyczny imitatorów łuku. Jego schemat ideowy pokazano na rysunku 6. Generator sygnału okresowego (np. sinusoidalnego) steruje dwoma identycznymi źródłami prądowymi, do których równolegle są włączone imitatory wzorcowy $I\mathbb{L}^*$ i diagnozowany $I\mathbb{L}$. W pozostałych dwóch gałęziach mostka znajdują się jednakowe elementy biernie R lub L . Zastosowanie kondensatorów pogarsza stabilność pracy układu. W przekątną mostka jest włączony woltomierz wartości skutecznej napięcia działający w szerokim zakresie widma. Jeśli parametry modeli matematycznych imitatorów są takie same, to wartość zmierzonego napięcia wynosi 0 V. Wpływ zmian parametrów modelu matematycznego badanego imitatora na wartość tego napięcia pokazano na rysunku 7. Zastosowano rezystancje $R = 20 \Omega$ w gałęziach mostka. Założono, że podstawowe parametry modeli matematycznych łuku imitatorów są takie jak w poprzednim przypadku. Jednocześnie działają dwa zsynchronizowane ze sobą idealne źródła prądowe o parametrach: $I_m = 100$ A, $f = 50$ Hz. Wyniki symulacji pokazano na rysunku 7. Liniami ciągłymi oznaczono przypadki pełnej eliminacji napięcia U_{AK} , a liniami przerywanymi przypadki braku takiej eliminacji. Powtórzono obliczenia z wykorzystaniem indukcyjności $L = 10$ mH. Uzyskano bardzo zbliżone rezultaty. Z porównania rysunków 5 i 7 wynika, że metoda mostkowa wyróżnia się większą czułością w porównaniu z metodą wykorzystującą szeregowe połączenie imitatorów. Poza tym jest ona mniej wrażliwa na obecność napięcia U_{AK} .



Rys. 6. Schemat układu mostka dwuprądowego do badania imitatora łuku (GS – generator sterujący; SZP – sterowane źródło prądowe; $I\mathbb{L}$ – badany elektroniczny imitator łuku; $I\mathbb{L}^*$ – wzorcowy elektroniczny imitator łuku; V_{RMS} – czujnik - woltomierz wartości skutecznej; SK – sygnały korekcyjne)



Rys. 7. Wpływ odchyłek parametrów modelu łuku diagnozowanego imitatora na wartość napięcia niezrównoważenia mostka U_{RMS} : a) wpływ odchyłek wartości mocy P_M ; b) wpływ odchyłek wartości rezystancji R_p ; c) wpływ odchyłek wartości stałej czasowej θ_p

Jeśli w wybranym zakresie zmian parametrów modeli matematycznych łuku i wybranym zakresie zmian parametrów wymuszenia prądowego spełniony jest warunek

$$U_{RMS} < \varepsilon_U \quad (14)$$

to można uznać, że badany imitator działa poprawnie.

Wzorcowe imitatory elektroniczne mogą zostać zbudowane i zaprogramowane na podstawie wielokrotnych i bardzo złożonych badań eksperymentalnych łuku fizycznego. Prowadzone są one na specjalnych odpowiednio wyposażonych stanowiskach laboratoryjnych przez specjalnie przygotowany personel o wysokich kwalifikacjach. Podczas ich wykonywania potrzebne jest odpowiednie rozpoznanie warunków środowiskowych, dokonywania jest filtracja zakłóceń i stabilizacja wyładowań, a następnie statystyczna obróbka zebranych danych pomiarowych. To gwarantuje w późniejszych badaniach diagnostycznych z użyciem imitatorów uzyskiwanie nie tylko odpowiedniej dokładności pomiarów [5], ale także ich poprawności i powtarzalności. Natomiast wykorzystanie łuku fizycznego w charakterze wzorca do badań diagnostycznych źródeł lub innych imitatorów nawet w warunkach laboratoryjnych, a tym bardziej przemysłowych lub warsztatowych nie daje ani odpowiedniej dokładności, ani powtarzalności rezultatów.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Wzrastające rozpowszechnienie elektronicznych źródeł spawalniczych i wymagań pod względem efektywności operacji technologicznych realizowanych z ich użyciem sprzyjają rosnącemu zapotrzebowaniu na precyzyjne elektroniczne imitatory łuku;
2. Diagnostowanie różnych (nawet częściowo uszkodzonych) źródeł spawalniczych o wstępnie nieokreślonych charakterystykach elektrycznych sprzyja powstawaniu uszkodzeń imitatorów łuku;
3. Diagnostyka imitatorów łuków spawalniczych może być stosunkowo łatwo wykonywana dzięki opracowaniu metod pomiarowego wyznaczania parametrów wybranych modeli matematycznych łuku w obwodach z zadanymi wymuszeniami prądowymi.
4. Imitatory łuku jako podstawowe elementy układów diagnostycznych źródeł spawalniczych podlegają wzorcowaniu i strojeniu, które można realizować w układach o strukturach prezentowanych w tej publikacji.
5. Opisana metoda porównawcza umożliwia najprostszą diagnostykę imitatorów łuku z wykorzystaniem źródeł o dowolnych wymuszeniach prądowych, które w wymaganym zakresie zapewniają stabilność pracy układu.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Sawicki A., Sosiński R.: Zagadnienia diagnostyki i pomiarów parametrów dynamicznych prostowników spawalniczych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2, 1993, s. 30-33.
2. Sawicki A.: Racjonalizacja modeli hybrydowych łuku elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, nr 11, R. 93, 2017, s. 198-203. (doi: 10.15199/48.2017.11.41)
3. Sidorec V.N., Pentegov I.V.: Imitator svaročnoj dugi dlâ ocenki svojstv istočnikov toka, primenâemym pri dugo-voj svarke, *Avtomatičeskââ svarka*, 7, 1981, s. 15-18.
4. Verešago E.N., Kostûčenko V. I.: Imitacionnââ model' êlektričeskoj dugi, *Èlektrotehnika*, 6, 2014, s. 36-42.
5. Sawicki A.: Imitatory łuków w diagnostyce źródeł spawalniczych, XLIX Międzuczelniana Konferencja Metrologów MKM 2017, PCz. 4-6.09.2017, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 54, s. 195-198.
6. Sawicki A., Haltof M.: Spectral and integral methods of determining parameters in selected electric arc models with a forced sinusoid current circuit. *Archives of Electrical Engineering*, no. 1, VOL. 65, 2016, pp. 87-103. (doi: 10.1515/ae-2016-0007)
7. Sawicki A., Haltof M.: Wykorzystanie metody linearyzacyjnej do wyznaczania stałych czasowych modeli łuku elektrycznego z wymuszeniem prądowym prostokątnym. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, nr 4, R. 93, 2017, s. 99-103. (doi: 10.15199/48.2017.04.25)
8. Savicki A., Hal'tof M.: Problemy opredeleniâ parametrov matematičeskikh modelej êlektričeskikh dug v cepâh s istočnikami toka, *Èlektričestvo*, № 1, 2016, s. 25-34.
9. Pentegov I.V.: Voprosy modelirovaniâ dinamiki svaročnoj dugi kak èlementa êlektričeskoj cepi, *Avtomat. svarka*, № 10, 1984, s. 18-23.
10. Pentegov I.V., Sidorec V.N.: Sravnitel'nyj analiz modelej dinamičeskoj svaročnoj dugi, *Avtomat. svarka*, № 2, 1989, s. 33-36.
11. Warsza Z.L.: Samokompensujące się oraz przemiennoprądowe mostki dwuprądowe, *Pomiary Automatyka Robotyka*, nr 7-8, 2004, s. 142-149.

SELECTED DIAGNOSTICS ISSUES FOR WELDING ARC IMITATORS

Technological rationale for diagnostic research of welding sources using electronic arc imitators has been given. Using them as standard elements forces users to perform appropriate calibration and adjustments. Structure of systems for diagnosing arc imitator using given Pentegov mathematical model has been shown. Two kinds of working, standard current enforcement with sinusoidal and square wave has been included. Structure of diagnostics system has been presented that uses comparative method with sequentially connected standard imitator and imitator being adjusted. Influence of mathematical model parameters deviation of researched imitator on resulting errors value of voltage drop *THD* coefficient on imitators has been researched.

Keywords: electrical arc, arc imitator, arc imitator diagnostics.