

IMITATORY ŁUKÓW W DIAGNOSTYCE ŹRÓDEŁ SPAWALNICZYCH

Antoni SAWICKI

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

Streszczenie: Podano uzasadnienie prowadzenia badań naukowych nad doskonaleniem budowy imitatorów łuków przeznaczonych do diagnostyki źródeł spawalniczych. Przedstawiono warianty modeli matematycznych przydatne do odwzorowania charakterystyk kolumny łuku w szerokim zakresie zmian natężenia prądu. Zastosowano zmodyfikowaną funkcję aproksymującą charakterystyki napięciowo-prądowe statyczne do symulacji działania imitatora łuku.

Słowa kluczowe: łuk elektryczny, imitator łuku, diagnostyka źródeł spawalniczych.

1. WSTĘP

Źródła spawalnicze budowane są jako urządzenia elektryczne o stosunkowo dużym stopniu uniwersalności. Wynika to z konieczności realizacji przez nie procesów technologicznych łączenia lub cięcia detali wykonanych z różnych metali, o różnym kształcie, rozmiarach i grubości. Ponadto muszą one umożliwiać realizację procesów uzyskiwania spoin o różnej jakości, czyli różnej wytrzymałości mechanicznej, wyglądzie, szczelności, odporności chemicznej itd. Ponieważ o właściwościach obciążenia elektrycznego źródeł w dużym stopniu decydują materiały spawane (poprzez spadki napięć przyelektrodowych), to w porównaniu z piecami łukowymi, w warunkach obniżonego napięcia właściwości plazmy kolumny mają mniejszy wpływ na wybór źródła zasilania. Umożliwia to pewną standaryzację zasilaczy spawalniczych. Jednak ze względu na silne nieliniowości charakterystyk elektrycznych łuku i bardzo małe wartości funkcji tłumienia, zapewnienie odpowiedniej mocy i stabilności wyładowania ma decydujące znaczenie w ocenie możliwości realizacji procesów technologicznych. Zmusza to konstruktorów do zgrubnego zróżnicowania charakterystyk statycznych i dynamicznych źródeł, a także do umożliwienia obsłudze ich łatwego przestrajania w stosunkowo szerokich zakresach. Ponadto przez odpowiedni dobór kształtu fali prądowej, generowanej przez źródło, jest możliwe wpływanie na rozkład strumieni ciepłych między spoiną a elektrodą, na rozmiary spoiny, na procesy eliminowania wierzchnich warstw tlenkowych itd.

Stosowanie błędnych nastaw systemów sterowania lub eksploatacja spawarek w warunkach zewnętrznych różnych od znamionowych, wpływają na przyspieszenie procesów starzeniowych, a przez to na zwiększenie awaryjności i skrócenie żywotności urządzeń. Objawy uszkodzeń mogą być różne, bardzo często trudne do wykrycia w niewystarczająco kontrolowanym procesie technologicznym.

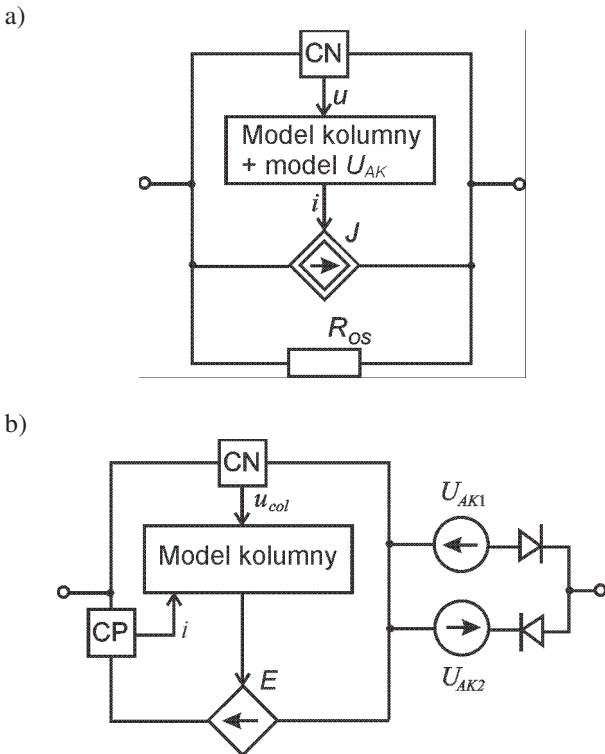
Potrzeba diagnostyki elektrycznych źródeł spawalniczych wynika z konieczności zapewnienia bezpieczeństwa obsługującemu personelowi, wysokiej jakości i wydajności procesów cięcia lub spajania, zmniejszenia kosztów eksploatacji. Badania źródeł, przez ich obciążanie za pomocą dołączanych rezystorów, umożliwiają wyznaczanie rodziny charakterystyk statycznych [1, 2]. Natomiast wykorzystanie łącznika półprzewodnikowego daje możliwość obserwacji reakcji źródła na zwarcia przemijające [3]. Jednak te badania są niepełne, gdyż takie obciążenia znacznie odbiegają od zachowań łuku podczas realizacji procesów technologicznych. Właściwym celem badań diagnostycznych jest osiągnięcie stanu najlepszej współpracy źródła z łukiem elektrycznym. Ponieważ łuk elektryczny charakteryzuje się intensywnymi fluktuacjami parametrów i uciążliwymi oddziaływaniami chemicznymi i cieplnymi na środowisko, to korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie jego elektronicznego ekwiwalentu w postaci imitatora [4].

2. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE IMITATORÓW ŁUKU ELEKTRYCZNEGO

Jeśli porównać diagnostykę źródeł spawalniczych wykorzystującą łuk elektryczny z diagnostyką wykorzystującą imitator łuku [4, 5], to okazuje się, że najszersze możliwości badań ma zastosowanie imitatora dynamicznego. Badania źródeł z użyciem imitatorów mogą być realizowane w bardzo szerokich zakresach prądowych (bez potrzeby wymiany elektrody), zmiany składu chemicznego gazu, z dużą szybkością, łatwiejszą automatyzacją i mniejszymi wymaganiami odnośnie kwalifikacji spawalniczych personelu.

W najczęściej przyjmowanym przybliżeniu można uznać, że łuk elektryczny składa się z trzech stosunkowo jednorodnych warstw. Podczas przepływu prądu na każdej z nich odkłada się spadek napięcia. To umożliwia budowę imitatorów składających się z dwóch (czasami trzech) połączonych szeregowo podukładów. Imitatory bez takiego rozróżnienia mają bardziej skomplikowaną budowę. Szczególnie łatwo jest odwzorować przyelektrodowe spadki napięcia za pomocą elementów bezinercyjnych w postaci spolaryzowanych źródeł napięciowych włączanych przeciwnie do płynącego prądu [6]. W przypadku zastosowania różnych materiałów stanowiących elektrody, suma tych spadków napięć może zależeć od kierunku płynącego prądu, czyniąc charakterystyki łuku asymetrycznymi. Natomiast w bardzo szczególnych przypadkach charakterystyki kolumny mogą być asymetryczne [7]. Dlatego podukład

odwzorowujący kolumnę łuku łączy się zwykle za pośrednictwem mostka prostowniczego. Na rysunku 1 pokazano schematy ideowe imitatorów łuków spawalniczych z wykorzystaniem źródeł sterowanych.



Rys. 1. Schematy ideowe imitatorów łuków spawalniczych:
 a) z wykorzystaniem sterowanego źródła prądu J ;
 b) z wykorzystaniem sterowanego źródła napięcia E
 (CN – czujnik napięcia; CP – czujnik prądu; R_{OS} – rezystor pomocniczy; U_{AK1} , U_{AK2} – źródła odwzorowujące sumy przyelektrodowych spadków napięcia; i , u_{col} – prąd i napięcie kolumny łuku)

Właściwości łuku o symetrycznych charakterystykach, zasilanego ze źródeł spawalniczych, generujących przebiegi prądowe prostokątne bipolarne (symetryczne) o dowolnym współczynniku wypełnienia, są takie same jak podczas zasilania go prądem stałym [8]. Stąd badania diagnostyczne takich źródeł prowadzą do ich obciążania elementami o charakterze statycznym. Inercja łuku pojawia się po wystąpieniu asymetrii prądu źródła, co w pełnej diagnostyce wymaga zastosowania imitatora dynamicznego.

Zapewnienie odpowiedniej dokładności diagnostyki źródeł z użyciem imitatorów łuku wymaga spełnienia pewnych warunków [5]. Zależą one od rodzaju i zakresu prowadzonych badań źródła. W przypadku źródła prądu stałego powinny być spełnione warunki

$$|I_M - I^*|/I^* < \varepsilon_I \quad (1)$$

$$|U_M - U^*|/U^* < \varepsilon_U \quad (2)$$

gdzie: I^* , U^* – zadane wartości prądu i napięcia; I_M , U_M – zmierzone wartości prądu i napięcia; ε_I , ε_U – błędy względne działania układu źródła zasilania.

Jeśli badania obejmują źródło prądowe generujące fale okresowe, to do oceny ich efektywności można posłużyć się zależnościami

$$|I_{rmsM} - I_{rms}^*|/I_{rms}^* < \varepsilon_I \quad (3)$$

$$|U_{rmsM} - U_{rms}^*|/U_{rms}^* < \varepsilon_U \quad (4)$$

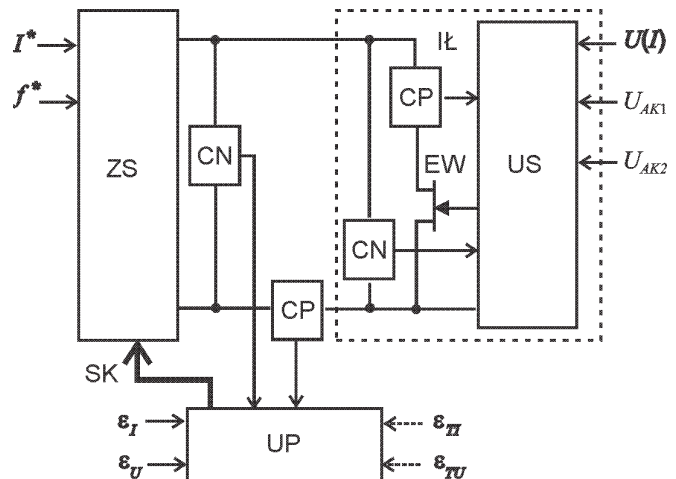
$$|THD_{IM} - THD_I^*|/THD_I^* < \varepsilon_{TI} \quad (5)$$

$$|THD_{UM} - THD_U^*|/THD_U^* < \varepsilon_{TU} \quad (6)$$

gdzie: I_{rms}^* , U_{rms}^* – zadane wartości skuteczne prądu i napięcia; I_{rmsM} , U_{rmsM} – zmierzone wartości skuteczne prądu i napięcia; THD_I^* , THD_U^* – zadane współczynniki zawartości harmonicznych prądu i napięcia; THD_{IM} , THD_{UM} – zmierzone współczynniki zawartości harmonicznych prądu i napięcia; ε_I , ε_U , ε_{TI} , ε_{TU} – odpowiednie błędy względne działania układu źródła zasilania obciążonego imitatorem.

Wartości wielkości zadanych mogą pochodzić z rozważań analitycznych, symulacji komputerowych lub z badań eksperymentalnych źródeł uznawanych za wzorcowe.

Schemat układu diagnostycznego źródła spawalniczego z wykorzystaniem imitatora łuku pokazano na rysunku 2. Jeżeli w wyniku przeprowadzonych badań błędy (1) i (2) albo (3)-(6) nie przewyższają zadanych wartości, to można uznać, że źródło spełnia stawiane wymagania.



Rys. 2. Schemat układu diagnostycznego (ZS – badane źródło spawalnicze; IŁ – imitator łuku; US – układ programowalny z modelem matematycznym łuku do sterowania członem wykonawczym EW imitatora; UP – układ pomiarowy; CN – czujnik napięcia; CP – czujnik prądu; SK – sygnały korekcyjne)

3. WYBÓR MODELU MATEMATYCZNEGO DO BUDOWY IMITATORA ŁUKU

Większość popularnych prostych modeli matematycznych kolumny łuku elektrycznego jest w stanie zadowalająco odwzorowywać charakterystyki dynamiczne łuku jedynie w stosunkowo wąskich dedykowanych zakresach zmian prądu. Przykładami są model Mayra, stosowany do opisu łuków słaboprądowych, i model Cassiego - do łuków silnoprądowych. Wykonanie pełnej diagnostyki źródeł spawalniczych wymaga jednak zastosowania obciążenia zmieniającego się w szerokim zakresie. Taki warunek są w stanie spełnić modele matematyczne nieliniowe łuku. Szczególnie do takich celów nadają się modele hybrydowe. Model stanowiący równoległe połączenie podmodeli (uogólnionego modelu Mayra i modelu Cassiego) ma postać [9]

$$g = \varepsilon(g) \cdot \left(\frac{i^2}{P_w} + G_w \right) + [1 - \varepsilon(g)] \cdot \frac{i^2}{g U_c^2} - \theta(g) \frac{dg}{dt} \quad (7)$$

gdzie: g - konduktancja kolumny, S; i - prąd wymuszający, A; P_w - stała wartość mocy uogólnionego modelu Mayra, W; U_c - stała wartość napięcia modelu Cassiego, V; G_w - konduktancja resztkowa w stanie $i = 0$ A, S; θ - funkcja tłumienia, s; ε - funkcja wagowa.

Jeśli uwzględnimy się wznoszenie się charakterystyk napięciowo-prądowych łuku w zakresie silnych prądów (na skutek intensywnego promieniowania), to można zaproponować inny wariant modelu hybrydowego

$$g = \varepsilon(g) \cdot \left(\frac{i^2}{P_w} + G_w \right) + [1 - \varepsilon(g)] \cdot \left[\frac{i^2}{g U_c^2} - \frac{P_{rg}(g)}{U_c^2} \right] - \theta(g) \frac{dg}{dt} \quad (8)$$

Funkcja tłumienia może być zadana w postaci funkcji nieliniowej zależnej od konduktancji [9]

$$\theta(g) = \theta_{g0} + \theta_{g1} \exp(-\alpha_g g) \approx \begin{cases} \theta_{g1}, & \text{if } g \leq g_0 \\ \theta_{g0}, & \text{if } g > g_0 \end{cases} \quad (9)$$

gdzie: $\alpha_g > 0$, $\theta_{g1} \gg \theta_{g0} > 0$ s - stałe współczynniki aproksymacji. Często uzyskuje się zadowalające efekty modelowania przyjmując $\theta(g) = \text{const}$. W rozważaniach można założyć tutaj funkcję wagową w postaci

$$\varepsilon(g) = \exp\left(-\frac{g}{g_0}\right) \quad (10)$$

gdzie g_0 - wartość konduktancji odpowiadająca przełączeniu między modelami. Jej wartość można przyjąć jako

$$g_0 = \frac{I_0}{U_c} = \frac{P_M}{U_c^2} \quad (11)$$

Charakterystyka mocy rozpraszanej radiacyjnie może być aproksymowana zależnością

$$P_{rg}(g) = a_{g1}g + a_{g2}g^2 \quad (12)$$

gdzie stałe współczynniki wyrażone są: a_{g1} w V^2 ; a_{g2} w V^3/A .

Jak widać, wykorzystanie modeli hybrydowych kolumny łuku umożliwia uwzględnienie kilku nieliniowości w tworzonych imitatorach. Jednak wadą modeli hybrydowych są trudności w eksperymentalnym wyznaczaniu ich parametrów [9].

Szczególnie przydatny do tworzenia imitatorów jest model kolumny łuku zaproponowany przez W.N. Pentegowa i następnie rozwijany wspólnie z I.W. Sidorecem [10]. Model ten jest liniowy. Stanowi on uogólnienie innych prostszych modeli liniowych łuku [5, 6]. Do jego budowy wykorzystuje się dowolną charakterystykę statyczną $U_{st}(I)$. Rezystancję kolumny łuku określa się wzorem $R_{st} = U_{st}/i_\theta$ z wykorzystaniem fikcyjnego prądu $i_\theta(t)$, uzyskując w stanach dynamicznych zależność na napięcie łuku

$$u = u_{col} + U_{AK} = R_{st}(i_\theta)i + U_{AK} = \frac{U_{st}(i_\theta)}{i_\theta}i + U_{AK} \quad (13)$$

gdzie: R_{st} - rezystancja statyczna kolumny, Ω ; i_θ - prąd

stanu, który wyznacza się z równania różniczkowego

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} + i_\theta^2 = i^2 \quad (14)$$

gdzie θ - stała czasowa.

W pracach [5, 6, 10] wykorzystywano charakterystykę napięciowo-prądową statyczną, opisaną funkcją potęgową, do tworzenia imitatorów łuku niezaburzanego.

4. WYKORZYSTANIE ZMODYFIKOWANEJ FUNKCJI APROKSYMUJĄCEJ CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE DO SYMULACJI DZIAŁANIA IMITATORA ŁUKU

W dalszych badaniach zastosowano następującą postać aproksymacji charakterystyki statycznej kolumny [11]

$$U(I) = U_p \cdot \left(\frac{I}{I_p} \right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{I}{I_p}\right) + 1\right) \quad (15)$$

gdzie $(I_p, U_p + U_{AK})$ - współrzędne punktu zapłonu wyładowania. Stanowi ona punkt wyjścia do wyprowadzenia zmodyfikowanej charakterystyki napięciowo-prądowej.

Zmiany długości łuku l wywołują zmiany napięcia zapłonu i napięcia w zakresie silnoprądowym

$$U_0(I) = U_{0min} + u_0 \cdot l \quad (16)$$

Dłuższy łuk ma też większą rezystancję

$$R_0(I) = R_{0min} + r_0 \cdot l \quad (17)$$

Skojarzenie tych trzech zależności z uwzględnieniem funkcji wagowej $\zeta(I) = 1 - \exp(-I/I_p)$ daje zmodyfikowaną charakterystykę napięciowo-prądową kolumny łuku [12]

$$U(I) = U_p \cdot \left(\frac{I}{I_p} \right)^{k_1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{I}{I_p}\right)^{k_1} + 1\right) + (U_0 + R_0 I^{k_0}) \cdot \zeta(I) \cdot \left[1 - \left(\frac{I}{I_p} \right)^{k_1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{I}{I_p}\right)^{k_1} + 1\right) \right] \quad (18)$$

gdzie: k_0, k_1 - współczynniki aproksymacji, $k_1 > 1$.

Zwiększenie długości łuku l prowadzi do zwiększenia nie tylko wartości U_0 i R_0 , ale także i składowej napięcia zapłonu

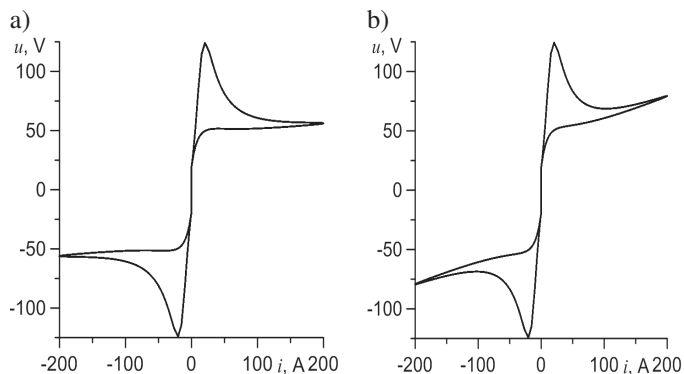
$$U_p(l) = E_{p0} \cdot l^{k_2} \quad (19)$$

gdzie: k_2, E_{p0} - współczynniki aproksymacji zależne od kształtu, temperatury i materiału elektrod oraz od składu chemicznego gazu ($0 < k_2 < 1$).

W zakresie małych długości łuku urządzeń elektrotechnologicznych można przyjmować tę zależność jako liniową $U_p(l) = E_{p0} \cdot l$.

Na rysunku 3 pokazano wyniki symulacji procesów w obwodzie składającym się ze źródła prądu sinusoidalnego ($I_m = 200$ A, $f = 50$ Hz) i makromodelu imitatora łuku. Do jego utworzenia użyto modelu Pentegowa-Sidoreca kolumny łuku (14) ze zmodyfikowaną charakterystyką statyczną (18). Jego

parametry były następujące: $U_0=30$ V, $U_p=100$ V, $I_p = 3$ A, $R_0=0,03$ V·A^{-k₀}, $\theta = 2 \cdot 10^{-4}$ s, $U_{AK} = 19$ V. Wykonane symulacje wykazały duże możliwości proponowanej wersji modelu w łatwym odwzorowywaniu charakterystyk dynamicznych różnych łuków elektrycznych.



Rys. 3. Charakterystyki dynamiczne modeli łuku: a) z parametrami ($k_0=1, k_1=2$); b) z parametrami ($k_0=1,3, k_1=2$)

5. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Tworzenie imitatorów elektronicznych adekwatnych do wyładowań łukowych i ich wykorzystanie w diagnostyce urządzeń elektrotechnologicznych stanowi jedno z bardzo istotnych uzasadnień rozwoju teorii modelowania matematycznego łuku.
2. Wykorzystanie zmodyfikowanej charakterystyki napięciowo-prądowej statycznej (18) do budowy imitatora może umożliwić dokładne odwzorowanie stanów dynamicznych w obwodzie z łukiem i diagnozowanym źródłem nie tylko spawalniczym, ale także z innymi rodzajami źródeł stosowanych w elektrotechnologii.
3. Model matematyczny Pentegowa-Sidoreca cechuje się dużo większą łatwością adaptacji do charakterystyk rzeczywistego łuku w porównaniu z popularnymi modelami hybrydowymi, które wykorzystują proste podmodele z charakterystykami statycznymi aproksymowanymi przez funkcje potęgowe (np. model Zarudiego).

6. BIBLIOGRAFIA

1. Sawicki A., Sosiński R.: Wybrane zagadnienia diagnostyki nowoczesnych prostowników spawalniczych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Nr 4, 1994, s. 82-85.
2. Sawicki A., Sosiński R.: Uniwersalny system diagnostyczny elektrycznych źródeł spawalniczych, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, 1, 1993, s. 38-41.
3. Sawicki A., Sosiński R.: Zagadnienia diagnostyki i pomiarów parametrów dynamicznych prostowników spawalniczych, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 2, 1993, s. 30-33.
4. Sawicki A., Sosiński R.: Imitatory łuków spawalniczych, *Materiały XXXV Krajowej Konferencji Spawalniczej, Częstochowa 1992*, s. 300-307.
5. Верещаго Е.Н., Костюченко В. И.: Имитационная модель электрической дуги, *Электротехника*, 6, 2014, s. 36-42.
6. Верещаго Е.Н., Костюченко В. И.: Модель электрической дуги в MATLAB/Simulink. *Электротехника та електроенергетика*, 2, 2013, s. 40-46.
7. Sawicki A.: Asymetria charakterystyk dynamicznych łuku elektrycznego, *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, 4, 2010, s. 10-14.
8. Sawicki A., Haltof M.: Wyznaczanie parametrów modeli matematycznych łuku elektrycznego w wybranych stanach pracy urządzeń TIG, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 12 (91), 2015, s. 212-217.
9. Sawicki A.: Modele hybrydowe łuku elektrycznego z ulepszonymi charakterystykami dynamicznymi w szerokich zakresach zmian wartości prądu bipolarnego, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 2, 2017, s. 40-42.
10. Сидорев В.Н., Пентегов И.В.: Имитатор сварочной дуги для оценки свойств источников тока, применяемых при дуговой сварке, *Автоматическая сварка*, 7, 1981, s. 15-18.
11. Marciniak L.: Modelowanie zwarć doziemnych łukowych w sieciach średniego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 3, 2009, s. 188-191.
12. Sawicki A.: Aproksymacje charakterystyk napięciowo-prądowych łuku urządzeń elektrotechnologicznych, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 6, 2013, s. 58-68. (Approximations of arc voltage-current characteristics in electrotechnological devices, p. 40-54)

ARC IMITATORS IN WELDING SOURCES DIAGNOSTICS

Justification for scientific research improving construction of arc imitators intended for welding sources diagnostics is given. Variants of mathematical models useful for reproducing characteristics of arc column in wide range of current changes is presented. Modified function approximating static voltage-current characteristics has been applied for simulation of arc imitator operation.

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