

## Wykorzystanie metody linearyzacyjnej do wyznaczania stałych czasowych modeli łuku elektrycznego z wymuszeniem prądowym prostokątnym

**Streszczenie.** Opisano trudności w eksperymentalnym wyznaczeniu stałych czasowych modeli matematycznych łuku elektrycznego. Rozważono przebiegi napięcia w obwodzie z wymuszeniem prądowym prostokątnym i modelem Pentegowa łuku. Zastosowano metodę linearyzacyjną do wyznaczania stałych czasowych uproszczonych modeli liniowych, stanowiących szczególne przypadki modelu Pentegowa. Na podstawie symulacji komputerowych procesów w obwodzie z parametrami modeli, wskazano na możliwość stosunkowo dokładnego wyznaczania stałych czasowych tych modeli.

**Abstract.** Difficulties in experimental determination of time constants of electric arc models were described. There have been taken under consideration voltage time series in circuit with forced rectangular current and the Pentegov arc model. The linearization method was applied for obtaining time constants of simplified linear arc models which are the particular variants of the Pentegov model. On the basis of computer simulations of processes in circuit with model parameters, it was indicated the possibility of a relatively precise determination of the time constants of these models. (Application of a linearization method for determining time constants of electric arc models with a rectangular current source).

**Słowa kluczowe:** łuk elektryczny, model Pentegowa, stała czasowa, metoda linearyzacyjna.

**Keywords:** electrical arc, Pentegov model, time constant, linearization method.

### Wstęp

Wyznaczanie eksperymentalne funkcji tłumienia łuku elektrycznego jest potrzebne do wyznaczania: warunków stabilności płonienia wyładowania, zakresów możliwych oddziaływań zewnętrznych na łuk, parametrów źródła energii i pozostałych elementów w obwodzie zasilania oraz entalpii łuku. Ponieważ tłumienie zależy od wielu parametrów łuku, to wykorzystywane są funkcje względem różnych argumentów (prądu, ciśnienia, strumienia przepływu gazowego itd.) [1]. Jednak najczęściej tłumienie procesów cieplnych i elektrycznych przedstawiane jest jako silnie nieliniowa funkcja prądu stanu [2]. Pomimo to w większości uproszczonych modeli matematycznych funkcję tłumienia zastępuje się stałą wartością parametru, tzw. stałą czasową. Równocześnie podejmowane są także działania odwrotne, czyli próby uzmienniania stałej czasowej w prostych i hybrydowych modelach łuku, zarówno bez przeprowadzania ścisłych analiz fizycznych [3], jak i z takimi analizami [4].

Uproszczone modele matematyczne łuku są zwykle jednowymiarowe i charakteryzują się małą liczbą stałych parametrów. Przyjęte założenia upraszczające określają warunki prowadzenia badań eksperymentalnych i sposób wyznaczania jego parametrów. Ze względu na bardzo duży poziom generowanych zakłóceń i bardzo dużą wrażliwość łuku na zakłócenia zewnętrzne, należy podejmować różne działania w celach ekranowania obszaru wyładowania i stabilizacji łuku poddanego różnym wymuszeniom elektrycznym. Wybór rodzaju wymuszenia elektrycznego wynika z: przewidywanych warunków płonienia łuku w urządzeniu elektrotechnologicznym, dysponowanego źródła energii o przestrajanych parametrach, względnej łatwości analiz modeli matematycznych, wymaganej dokładności wyznaczanych parametrów. Spośród nich szczególne trudności sprawia dokładne wyznaczenie stałej czasowej. Mogą one powstawać na różnych etapach prowadzonych badań, począwszy od potrzeby idealizacji przebiegów wymuszeń elektrycznych, a kończąc na odpowiednich postaciach analitycznych wzorów i błędach zaokrąglenia obliczeń numerycznych podczas obróbki danych.

W publikacjach [5, 6] przedstawiono metody widmowe i całkowite wyznaczania eksperymentalnego parametrów

różnych modeli matematycznych łuku: Mayra, Cassiego, Pentegowa z charakterystyką statyczną hiperboliczno-płaską HP i hiperboliczno-liniową HL, łuku włączonego w obwód z wymuszeniem prądem sinusoidalnie zmiennym. Zbadano wpływ poziomu zakłóceń w obwodzie zasilania i w kolumnie łukowej na błędy wyznaczania parametrów modeli. Stwierdzono największą wrażliwość wyznaczania stałych czasowych na zakłócenia w porównaniu z pozostałymi parametrami modeli.

Autorzy artykułu opisali również podobne badania modeli łuku w obwodzie z wymuszeniem o fali prądowej prostokątnej o amplitudzie  $I_m$  i o różnych wartościach współczynnika wypełnienia  $k_w$ . Do wyznaczania stałej czasowej łuku wykorzystano dwie metody analityczną i aproksymacji liniowej. Metoda analityczna [6] charakteryzuje się niemal dowolną wartością składowej stałej prądu ( $|I_0| > 0A$ ) oraz dużą dokładnością pomiarów i obliczeń. Jej ograniczeniem jest stała wartość współczynnika wypełnienia  $k_w = 0,5$ . Natomiast przybliżona metoda aproksymacji liniowej [7] charakteryzuje się ograniczoną wartością składowej stałej prądu ( $0 < |I_0| < 0,5|I_m|$ ) i mniejszą dokładnością. Nie wymaga ona jednak wprowadzenia ścisłego ograniczenia na współczynnik wypełnienia. Oddzielnie rozpatruje się dodatnie (ze współczynnikiem wypełnienia  $k_w$ ) i ujemne (ze współczynnikiem wypełnienia  $k_w = 1 - k_w$ ) półfale przebiegu bipolarnego napięcia łuku. Tylko w przypadku małych wartości zaburzeń kolumny łuku (poniżej 1%) uzyskano akceptowalne wartości błędów (poniżej 10%).

W niniejszej publikacji przedstawiono zracjonalizowaną, w stosunku do [7], metodę linearyzacyjną wyznaczania stałych czasowych. Metoda ta, zaproponowana przez dra S. Wąsowicza [8], powstała przez ścisłe rozważenie procesów przejściowych w obwodzie z modelem matematycznym Pentegowa łuku elektrycznego. Wyróżnia się ona większą uniwersalnością, gdyż nakłada słabsze ograniczenia na współczynnik wypełnienia przebiegu prądu  $k_w$  i na wartość składowej stałej prądu  $I_0$ . Pozostałe parametry modeli matematycznych wynikają z kształtu charakterystyki napięciowo-prądowej statycznej i mogą być łatwo wyznaczone np. metodą ekspresową opisaną w [7].

### Wyznaczanie stałej czasowej modelu Pentegowa łuku elektrycznego

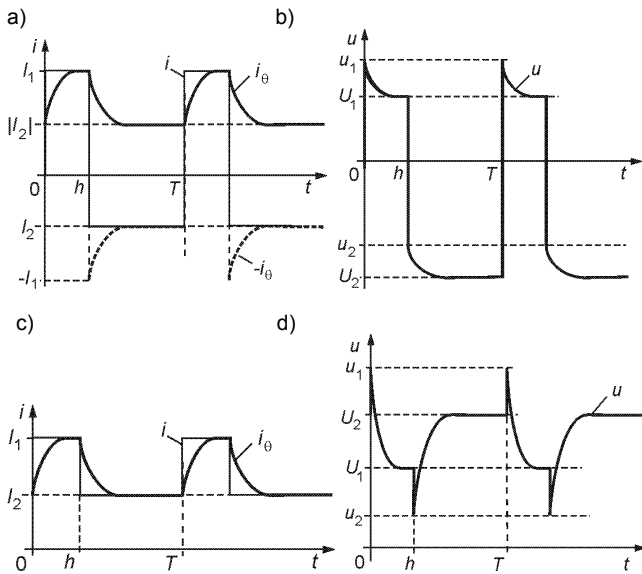
Okresowe nagłe zmiany kierunku przepływu prądu prostokątnego o zerowej wartości średniej nie wpływają na stan energetyczny łuku, który zachowuje się tak, jak podczas zasilania prądem stałym. W takim stanie nie ujawnia się inercja łuku, co uniemożliwia wyznaczenie stałych czasowych modeli. Aby uzyskać efekt okresowych zmian stanów energetycznych łuku, które odbywają się zgodnie z wartością funkcji tłumienia, proponuje się wprowadzenie do obwodu dodatkowego źródła prądu stałego o wartości  $I_0$  podłączonego równoległe do źródła prądu impulsowego o amplitudzie  $I_m$ . To zaburzenie może być wprowadzane krótkotrwale, aby nie miało znaczącego wpływu na proces technologiczny. Przebiegi prądu wymuszającego  $i$ , pokazane na rysunku 1a, c, można opisać analitycznie

$$(1) \quad i = \begin{cases} I_1 = I_m + I_0, & 0 < t - nT < h \\ I_2 = -I_m + I_0, & h < t - nT < T \end{cases}$$

gdzie:

$$(2) \quad I_m = \frac{I_1 - I_2}{2}; \quad I_0 = \frac{I_1 + I_2}{2}; \quad n \in N$$

W zależności od wartości amplitud będą im odpowiadały różne przebiegi napięć  $u$  (rys. 1b, d).



Rys. 1. Przebiegi prądu wymuszającego prostokątnego  $i$ , prądu stanu  $i_0$  i napięcia na kolumnie łuku  $u$  w stanie ustalonym: a), b) przypadek prądu bipolarnego; c), d) przypadek prądu unipolarnego

Przyjmijmy ograniczenia prezentowanej metody w postaci warunku

$$(3) \quad |I_1^2 - I_2^2| \Leftrightarrow (|I_0| \vee |I_m|) \ll (|I_1| \wedge |I_2|)$$

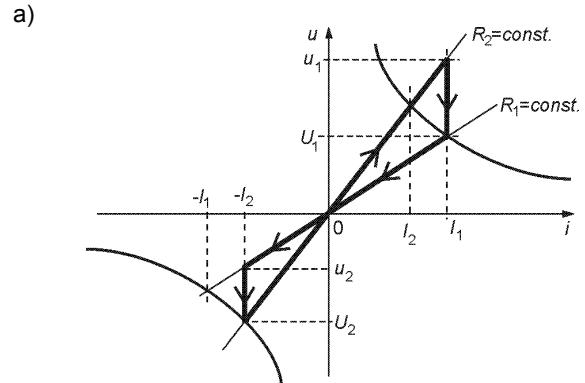
Na podstawie teorii Pentegowa kwadrat prądu stanu można wyrazić zależnością

$$(4) \quad i_\theta^2 = \begin{cases} I_1^2 + (I_2^2 - I_1^2) \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right), & 0 < t < h; \\ I_2^2 + (I_1^2 - I_2^2) \exp\left(-\frac{t-h}{\theta}\right), & h < t < T \end{cases}$$

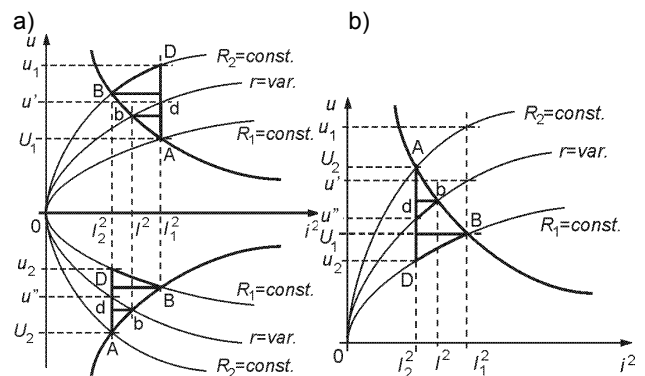
Natomiast napięcie wyznacza się na podstawie charakterystyki statycznej  $U_{col}(i_\theta)$  oraz przebiegu prądu chwilowego  $i$

$$(5) \quad u_{col} = \frac{U_{col}(i_\theta)}{i_\theta} i$$

Przebiegom prądów  $i$  i napięć łuku (rys. 1) odpowiadają charakterystyki dynamiczne łuku w postaci pętli na płaszczyźnie  $u(i)$  pokazane na rysunku 2. Natomiast na rysunku 3 pokazano, w stosunku do nich ekwiwalentne, krzywe na płaszczyźnie  $u(i^2)$ . Wybranim punktom na charakterystykach odpowiadają związki:  $U_1 = U(I_1)$ ,  $U_2 = U(I_2)$ ,  $u_1 = I_1 U_2 / I_2$ ,  $u_2 = I_2 U_1 / I_1$ .



Rys. 2. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuku  $u_{col}(i)$  z prądem wymuszającym prostokątnym  $i$ : a) przypadek prądu bipolarnego ( $I_1 > 0 > I_2$ ); b) przypadek prądu unipolarnego ( $I_1 > I_2 > 0$ ), ( $R_1 < R_2$ )



Rys. 3. Charakterystyki dynamiczne napięcie-kwadrat prądu wymuszającego  $u_{col}(i^2)$ : a) przypadek prądu bipolarnego ( $|I_1 + I_2| \ll |I_1|$ )  $\wedge$  ( $|I_1 + I_2| \ll |I_2|$ ); b) przypadek prądu unipolarnego ( $|I_1 - I_2| \ll |I_1|$ )  $\wedge$  ( $|I_1 - I_2| \ll |I_2|$ ), ( $R_1 < R < R_2$ )

Z podobieństwa małych Abd i dużych ABD trójkątów krzywoliniowych (rys. 3) o wierzchołkach na poszczególnych gałęziach charakterystyk napięcia  $u_{col}(i^2)$  i rezystancji  $R(I_1)$ ,  $r(i_\theta)$ ,  $R(I_2)$  łuku wynika możliwość zastosowania aproksymacji

$$(6) \quad \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) = \frac{I_1^2 - i_\theta^2}{I_1^2 - I_2^2} \approx \frac{u' - U_1}{u_1 - U_1}, \quad 0 < t < h$$

$$(7) \quad \exp\left(-\frac{t-h}{\theta}\right) = \frac{i_\theta^2 - I_2^2}{I_1^2 - I_2^2} \approx \frac{u'' - U_2}{u_2 - U_2}, \quad h < t < T$$

Stąd napięcia na kolumnie łuku w stanach przejściowych wynoszą

$$(8) \quad u' \approx U_1 + (u_1 - U_1) \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right), \quad 0 < t < h$$

$$(9) \quad u'' \approx U_2 + (u_2 - U_2) \exp\left(-\frac{t-h}{\theta}\right), \quad h < t < T$$

z dodatkowym założeniem  $(\theta \ll h) \wedge (\theta \ll T - h)$ . Obliczenie wartości średniej napięcia na kolumnie łuku prowadzi do określenia stałej czasowej modelu Pentegowa łuku elektrycznego [8]

$$(10) \quad \frac{\theta}{T} \approx \frac{u_{sr} - k_w U_1 - (1 - k_w) U_2}{u_1 - U_1 + u_2 - U_2}$$

gdzie współczynnik wypełnienia przebiegu prądu  $k_w = h/T$ . Jeśli przebieg jest bipolarny i uwzględnia się sumę przyelektrodowych spadków napięcia ( $I_1 > 0$  A,  $I_2 < 0$  A,  $U_{AK} > 0$  V), to wyrażenie na stałą czasową można opisać zmodyfikowanym wzorem [8]

$$(11) \quad \frac{\theta}{T} \approx \frac{u_{sr} - k_w (U_1 + U_{AK}) - (1 - k_w) (U_2 - U_{AK})}{u_1 - (U_1 + U_{AK}) + u_2 - (U_2 - U_{AK})}$$

Na podstawie wartości średnich przebiegów napięcia wyprostowanych jednopółkowo można oszacować wartość stałej czasowej

$$(12) \quad \frac{\theta}{T} \approx \frac{u_{sr1} - k_w U_1}{u_1 - U_1}$$

lub

$$(13) \quad \frac{\theta}{T} \approx \frac{u_{sr2} - (1 - k_w) U_2}{u_2 - U_2}$$

gdzie:  $u_{sr1}$  – wartość średnia półfali napięcia w przedziale  $(0, h)$ ;  $u_{sr2}$  – wartość średnia półfali napięcia w przedziale  $(h, T)$ .

Sumowanie pól obszarów objętych wykresem napięcia prowadzi do innej równoważnej postaci wzoru (11)

$$(14) \quad \frac{\theta}{T} \approx \frac{u_{sr} - k_w U_1 - (1 - k_w) U_2}{(R_2 - R_1)(I_1 - I_2)}$$

gdzie:  $R_1 = U_1/I_1$ ,  $R_2 = U_2/I_2$ . Po przekształceniach wzór ten można przedstawić w jeszcze innej równoważnej postaci [8]

$$(15) \quad \frac{\theta}{T} \approx \frac{\frac{P_1}{U_1 I_1} + \frac{P_2}{U_2 I_2} - 1}{\left( \sqrt{\frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}} \frac{I_1}{I_2} - \sqrt{\frac{U_1 I_1}{U_2 I_2}} \frac{I_2}{I_1} \right)^2}$$

gdzie:  $P_1 = u_{sr1} I_1$ ,  $P_2 = u_{sr2} I_2$ .

W prezentowanych wzorach na stałą czasową można zauważyć występowanie w mianownikach ułamków różnic wyrażań zawierających wielkości fizyczne. Jest to bardzo niekorzystne z punktu widzenia błędów obliczeniowych i pomiarowych. Występowanie dodatkowych operacji potęgowania powoduje znaczne narastanie błędów. Dlatego należy stosować takie przekształcenia wzorów na stałe czasowe konkretnych modeli łuku, aby eliminować lub minimalizować wpływ różnic w mianownikach wyrażań.

### Wyznaczanie stałych czasowych prostych modeli matematycznych łuku elektrycznego

Model matematyczny Pentegowa należy do klasy modeli liniowych i stanowi uogólnienie innych bardzo często używanych prostszych liniowych modeli matematycznych łuku elektrycznego [9]. Przyjmując różne założenia upraszczające na postać charakterystyki napięciowo-prądowej statycznej można uzyskać bardzo obszerny zbiór modeli spełniających bilans energetyczny w kolumnie.

Jako pierwszy zostanie rozpatrzony model Mayra, którego charakterystyka statyczna spełnia warunek  $P_M = U_1 I_1 = U_2 I_2$ . Wartości średnie półfali wyprostowanych jednopółkowo przebiegów napięcia ( $u_{sr1}$ ,  $u_{sr2}$ ) i mocy ( $P_1$ ,  $P_2$ ) umożliwiają wyznaczenie stałej czasowej

$$(16) \quad \frac{\theta_M}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr1} - k_w}{U_1} - \frac{P_1 - k_w}{P_M}}{\frac{u_1 - 1}{U_1} - \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 - 1}$$

lub

$$(17) \quad \frac{\theta_M}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr2} - (1 - k_w)}{U_2} - \frac{P_2 - 1 + k_w}{P_M}}{\frac{u_2 - 1}{U_2} - \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2 - 1}$$

Przekształcenie tych dwóch wyrażań, polegające na dodaniu oraz odjęciu liczników i mianowników równych ułamków, prowadzi do zależności

$$(18) \quad \frac{\theta_M}{T} \approx \frac{\frac{P}{P_M} - 1}{\left( \frac{I_1 - I_2}{I_2} \right)^2} = \frac{\frac{P_1 - P_2}{P_M} - 2k_w + 1}{\left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 - \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2}$$

W przypadku modelu Cassiego charakterystyka statyczna spełnia warunek  $U_C = U_1 = U_2 = \sqrt{u_1 u_2}$ . Wartości średnie wyprostowanych jednopółkowo przebiegów napięcia ( $u_{sr1}$ ,  $u_{sr2}$ ) umożliwiają wyznaczenie stałej czasowej

$$(19) \quad \frac{\theta_C}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr1} - k_w}{U_1} - \frac{u_{sr1} - k_w}{U_C^*}}{\frac{u_1 - 1}{U_1} - \left| \frac{I_1}{I_2} \right| - 1}$$

lub

$$(20) \quad \frac{\theta_C}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr2} - (1 - k_w)}{U_2} - \frac{u_{sr2} - 1 + k_w}{U_C^*}}{\frac{u_2 - 1}{U_2} - \left| \frac{I_2}{I_1} \right| - 1}$$

gdzie w przypadku prądu unipolarnego  $U_C^* = U_C$ , a bipolarnego  $U_C^* = U_C \operatorname{sgn} i$ . Przekształcenie tych dwóch

wyrażeń, podobnie jak w przypadkach (16) i (17), prowadzi do zależności na stałą czasową modelu

$$(21) \quad \frac{\theta_C}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr1} - u_{sr2} - 2k_w + 1}{U_1} - \frac{u_{sr1} - u_{sr2} - 2k_w + 1}{U_2}}{\frac{u_1 - u_2}{U_1} - \frac{u_1 - u_2}{U_2}} = \frac{U_C^*}{\left| \frac{I_1}{I_2} \right| - \left| \frac{I_2}{I_1} \right|}$$

Rozpatrzmy przypadek modelu Pentegowa HP o charakterystyce statycznej hiperboliczno-paskiej, która spełnia warunek  $U_1 = U_{CP} + P_{MP}/I_1$ ,  $U_2 = U_{CP} + P_{MP}/I_2$ . Wartości średnie wyprostowanych jednopółkowo przebiegów napięcia ( $u_{sr1}$ ,  $u_{sr2}$ ) i mocy ( $P_1$ ,  $P_2$ ) umożliwiają wyznaczenie stałej czasowej ( $U_{CP}^* = U_{CP} \operatorname{sgn} i$ )

$$(22) \quad \frac{\theta_P}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr1} - k_w}{U_1} - \frac{u_{sr2} - k_w}{U_2}}{\frac{R_2}{R_1} - 1} = \frac{\frac{P_1}{U_{CP}^* I_1 + P_{MP}} - k_w}{\frac{U_{CP}^* I_2 + P_{MP}}{U_{CP}^* I_1 + P_{MP}} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 - 1}$$

lub

$$(23) \quad \frac{\theta_P}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr2} - (1 - k_w)}{U_2} - \frac{u_{sr1} - (1 - k_w)}{U_1}}{\frac{R_1}{R_2} - 1} = \frac{\frac{P_2}{U_{CP}^* I_2 + P_{MP}} - 1 + k_w}{\frac{U_{CP}^* I_1 + P_{MP}}{U_{CP}^* I_2 + P_{MP}} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2 - 1}$$

Przekształcenie tych dwóch wyrażeń, podobnie jak w przypadku wzoru (21), prowadzi do zależności na stałą czasową modelu

$$(24) \quad \frac{\theta_P}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr1} - u_{sr2} - 2k_w + 1}{U_1} - \frac{u_{sr1} - u_{sr2} - 2k_w + 1}{U_2}}{\frac{U_{CP}^* I_2 + P_{MP}}{U_{CP}^* I_1 + P_{MP}} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 - \frac{U_{CP}^* I_1 + P_{MP}}{U_{CP}^* I_2 + P_{MP}} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2} = \frac{\frac{P_1}{U_{CP}^* I_1 + P_{MP}} - \frac{P_2}{U_{CP}^* I_2 + P_{MP}} - 2k_w + 1}{\frac{U_{CP}^* I_2 + P_{MP}}{U_{CP}^* I_1 + P_{MP}} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 - \frac{U_{CP}^* I_1 + P_{MP}}{U_{CP}^* I_2 + P_{MP}} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2}$$

W przypadku modelu Pentegowa HL o charakterystyce statycznej hiperboliczno-liniowej spełniony jest warunek  $U_1 = P_{MR}/I_1 + R_P I_1$ ,  $U_2 = P_{MR}/I_2 + R_P I_2$ . Wartości średnie wyprostowanych jednopółkowo przebiegów napięcia ( $u_{sr1}$ ,  $u_{sr2}$ ) i mocy ( $P_1$ ,  $P_2$ ) umożliwiają wyznaczenie stałej czasowej

$$(25) \quad \frac{\theta_R}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr1} - k_w}{U_1} - \frac{u_{sr2} - k_w}{U_2}}{\frac{R_2}{R_1} - 1} = \frac{\frac{P_{MR} + R_P I_1^2}{P_{MR} + R_P I_1^2} - k_w}{\frac{P_{MR} + R_P I_2^2}{P_{MR} + R_P I_1^2} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 - 1}$$

lub

$$(26) \quad \frac{\theta_R}{T} \approx \frac{\frac{u_{sr2} - (1 - k_w)}{U_2} - \frac{u_{sr1} - (1 - k_w)}{U_1}}{\frac{R_1}{R_2} - 1} = \frac{\frac{P_2}{P_{MR} + R_P I_2^2} - 1 + k_w}{\frac{P_{MR} + R_P I_1^2}{P_{MR} + R_P I_2^2} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2 - 1}$$

Przekształcenie tych dwóch wyrażeń prowadzi do zależności na stałą czasową modelu

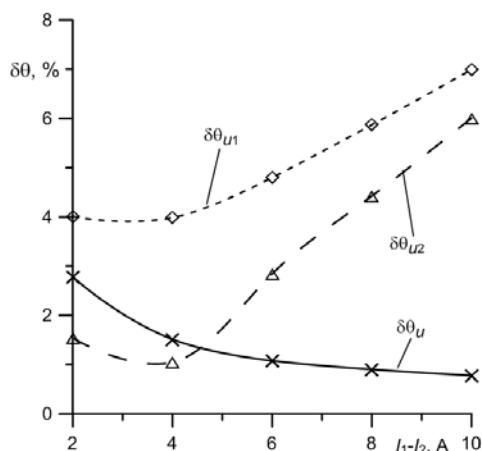
$$(27) \quad \frac{\theta_R}{T} \approx \frac{\frac{P_1}{P_{MR} + R_P I_1^2} - \frac{P_2}{P_{MR} + R_P I_2^2} - 2k_w + 1}{\frac{P_{MR} + R_P I_2^2}{P_{MR} + R_P I_1^2} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)^2 - \frac{P_{MR} + R_P I_1^2}{P_{MR} + R_P I_2^2} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2}$$

Jako ostatni zostaje rozpatrzony model Pentegowa HPL o charakterystyce statycznej hiperboliczno-płasko-liniowej, która spełnia warunek  $U_1 = U_{CP} + P_{MP}/I_1 + R_P I_1$ ,  $U_2 = U_{CP} + P_{MP}/I_2 + R_P I_2$ . Stałą czasową modelu można obliczyć ze wzoru [8]

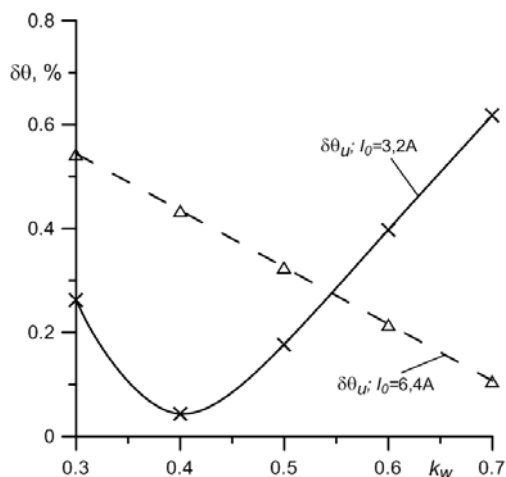
$$(28) \quad \frac{\theta_{PR}}{T} \approx \frac{u_{sr} - k_w \left( U_{CP}^* + \frac{P_{MP}}{I_1} + R_P I_1 \right) - (1 - k_w) \left( U_{CP}^* + \frac{P_{MP}}{I_2} + R_P I_2 \right)}{\left[ U_{CP}^* \left( \frac{1}{I_2} - \frac{1}{I_1} \right) + P_M \left( \frac{1}{I_2^2} - \frac{1}{I_1^2} \right) \right] (I_1 - I_2)}$$

#### Badanie efektywności wyznaczania stałych czasowych modeli łuku elektrycznego za pomocą metody linearyzacyjnej

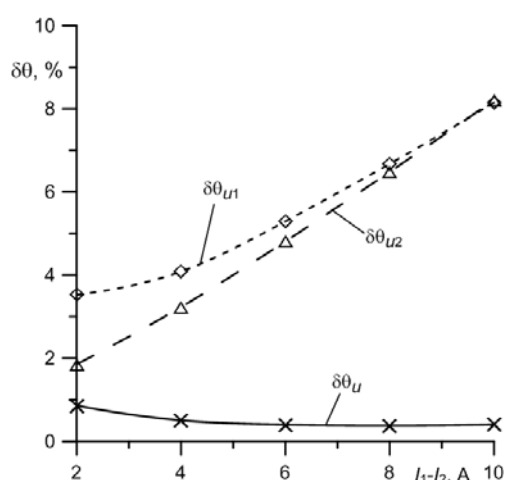
W celu sprawdzenia poprawności analizy i otrzymanych zależności wykonano symulacje procesów w prostym obwodzie zawierającym niezakłócony łuk elektryczny, zasilany ze źródła prądu generującego fałę prostokątną o amplitudzie  $I_m$ , częstotliwości  $f$  i współczynniku wypełnienia  $k_w$ . Równoległe do tego źródła włączono dodatkowe źródło prądu stałego  $I_0$ . Wyniki obliczeń błędów pokazano na rysunkach 4, 5 i 6. Przypadkowi modelu Cassiego (rys. 4) odpowiada unipolarny przebieg prądu o częstotliwości 25 Hz, zadana wartość prądu  $I_1 = 120$  A i takie wartości  $I_2$ , którym odpowiadają różne prądy ( $I_1 - I_2$ ). Z kolei przypadkowi modelu Pentegowa HL (rys. 5) odpowiada bipolarny przebieg prądu ( $f = 25$  Hz;  $k_w = 0,3-0,7$ ), którego wartości wynoszą  $I_1 = 83,2$  A,  $I_2 = -76,8$  A,  $I_0 = 3,2$  A. Przypadkowi modelu Pentegow HP (rys. 6) odpowiada unipolarny przebieg prądu ( $f = 25$  Hz;  $k_w = 0,5$ ), którego  $I_1 = 100$  A, a prąd  $I_2$  wynosi odpowiednio 98, 96, 94, 92 i 90 A.



Rys. 4. Wpływ kształtu prądu zasilającego na błąd wyznaczania stałej czasowej modelu Cassiego z wykorzystaniem wartości średnich napięcia ( $\delta\theta_{u1}$  - odpowiada  $u_{sr1}$ ,  $\delta\theta_{u2}$  - odpowiada  $u_{sr2}$ ,  $\delta\theta_u$  - odpowiada wypadkowemu  $u_{sr}$ ), ( $k_w = 0,6$ ;  $\theta_C = 2 \cdot 10^{-4}$  s;  $U_C = 60$  V)



Rys. 5. Wpływ współczynnika wypełnienia  $k_w$  prądu zasilającego na błąd wyznaczania stałej czasowej modelu Pentegowa HL ( $\theta_R = 3 \cdot 10^{-4}$  s,  $P_{MR} = 160$  W;  $R_p = 0,13\Omega$ )



Rys. 6. Wpływ kształtu prądu zasilającego na błąd wyznaczania stałej czasowej modelu Pentegow HP ( $\theta_p = 5 \cdot 10^{-4}$  s,  $P_{MP} = 60$  W,  $U_{CP} = 50$  V)

Na uzyskane wartości błędów wyznaczania stałej czasowej wpływ miały błędy zaokrągleń obliczeń numerycznych, które zależą od postaci analitycznej wzorów i dokładności obliczeń. W zakresach małych różnic prądów  $I_1$  i  $I_2$  uzyskano stosunkowo małe błędy.

Autorzy zbadali także odporność opisanej metody na zakłócenia losowe w kolumnie łuku. Jeśli różnice prądów  $I_1$  i  $I_2$  rosły, to wpływ zakłóceń na wyznaczanie stałej czasowej

maleje. Jednocześnie wpływ współczynnika  $k_w$  jest nieznaczący.

#### Wnioski:

1. Przedstawiona metoda linearyzacyjna może stanowić alternatywę w stosunku do innych znanych metod wyznaczania stałych czasowych modeli matematycznych łuku elektrycznego z wymuszeniem prądowym prostokątnym.
2. Metoda ta jest opracowana na podstawie ścisłych rozważań teoretycznych i nie wymaga przyjmowania założeń silnie ograniczających wartości współczynnika wypełnienia.
3. Ze względu na duży stopień teoretycznego uogólnienia metoda ta obejmuje szeroką gamę modeli matematycznych łuku i może być rozszerzona na inne modele.

**Autorzy:** dr hab. inż. Antoni Sawicki prof. PCz., Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: [sawicki.a7@gmail.com](mailto:sawicki.a7@gmail.com); mgr inż. Maciej Haltof, Politechnika Częstochowska, E-mail: [maciej@haltof.pl](mailto:maciej@haltof.pl).

#### LITERATURA

- [1] Sawicki A., Wpływ quasi-statycznych zmian ciśnienia gazu na modele łuku elektrycznego urządzeń elektrotechnologicznych. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 58, (2014), nr 2, 41-48.
- [2] Kalasek V., Measurements of time constants on cascade d.c. arc in nitrogen. TH-Report 71-E18, Eindhoven 1971.
- [3] Tseng K.J., Wang Y., Vilathgamuwa D.M., Development of a dynamic model of electric arc for power electronics simulations. *IEEE Industrial Applications Conference, IAS'96*, (1996), no. 4, 2173-2180.
- [4] Белкин Г.С., О постоянных величинах в обобщенном уравнении Касси-Майра для динамической вольт-амперной характеристики дуги. *Электричество*, (2012), № 3, 19-22.
- [5] Sawicki A., Haltof M., Metoda wyznaczania parametrów modelu Pentegowa opisującego łuk elektryczny o charakterystyce statycznej typu Ayrton. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91, (2015), nr 5, 117-120.
- [6] Савицки А., Хальтоф М., Проблемы определения параметров математических моделей электрических дуг в цепях с источниками тока. *Электричество* (2015), № 1, Sawicki A., Haltof M., Wyznaczanie parametrów modeli matematycznych łuku elektrycznego w wybranych stanach pracy urządzeń TIG. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91, (2015), nr 12, 212-217.
- [8] Wąsowicz S., Wyznaczanie stałej czasowej modelu Pentegowa łuku elektrycznego z wymuszeniem prądowym prostokątnym. Praca niepublikowana, Częstochowa 2016.
- [9] Пентегов И.В., Сидорев В.Н., Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги. *Автомат. сварка* (1989), № 2, с. 33-36.