

Zmodyfikowana metoda całkowa wyznaczania parametrów modelu Mayra i uogólnionego modelu Mayra łuku elektrycznego zasilanego ze źródeł energii elektrycznej generujących pobudzenia sinusoidalne

Streszczenie. Dokonano modyfikacji wzorów metody całkowej wyznaczania parametrów modelu Mayra i uogólnionego modelu Mayra łuku elektrycznego przez wprowadzenie wartości średnich i skutecznych przebiegów okresowych napięcia lub prądu. Drogą symulacyjną wykazano efektywność tej metody w szerokich zakresach zmian mocy łuku i jego funkcji tłumienia oraz zmian konduktancji w otoczeniach przejść prądu sinusoidalnego przez wartość zerową. Zbadano wpływ wartości reakcji wewnętrznych rzeczywistych źródeł prądu i napięcia na funkcje korekcyjne służące do wyznaczania parametrów modeli zmodyfikowaną metodą całkową.

Abstract. Modifications have been made to formulas of integral method for determining parameters of Mayr model and generalized Mayr model of electrical arc by introducing average and effective values of periodical changes of voltage and current. Effectiveness of this method in wide range of changes in arc power and its damping function, as well as conductance changes around passing sinusoidal current through zero value has been demonstrated using a simulation. An impact of changes in reactance value of internal real sources of current and voltage on correction function used to determine model parameters with modified integral method has been researched. (Modified integral method for determining parameters of Mayr model and generalized Mayr model of electrical arc powered by electrical energy source generating sinusoidal stimulation).

Słowa kluczowe: łuk elektryczny, model Mayra, uogólniony model Mayra, metoda całkowa.

Keywords: electrical arc, Mayr model, generalized Mayr model, integral method.

Wstęp

Charakterystyki statyczne i dynamiczne łuku elektrycznego, podobnie jak w przypadku dławików z rdzeniami ferromagnetycznymi, znacznie się różnią. Duży wpływ na ich kształty ma nie tylko częstotliwość prądu wymuszającego, ale również działania innych zewnętrznych czynników fizycznych, których wpływ może się znacznie różnić w warunkach statycznych i dynamicznych. Możliwość uwzględnienia ich wpływu na napięcie zapłonu wyładowania mają modele dynamiczne z zadawaną charakterystyką quasi statyczną (np. Nowikowa-Shellhase, Pentegowa-Sidoreca) [1, 2] lub modele hybrydowe [3]. Pokazano, że taką możliwość ma również szczególnie przypadek modelu Pentegowa w postaci uogólnionego modelu Mayra [4].

Zastosowana w [5] metoda wyznaczania parametrów modelu Mayra i uogólnionego modelu Mayra (GMM) wymagała opracowania złożonego programu do wychwytywania odpowiednich fragmentów przebiegów prądu i napięcia łuku. Następnie, na pozyskanych fragmentach wykonywano operacje uśredniania, a także obliczania wartości skutecznych. Jednak powszechnie stosowane programy do symulacji oraz do zbierania i obróbki danych pomiarowych z reguły dostarczają użytkownikom wiele gotowych bloków pomiarowych (ich makromodeli), m.in. do wyznaczania wartości średnich i skutecznych. Wykorzystanie tych bloków może znacznie uprościć zaprogramowanie komputera przystosowanego do akwizycji i obróbki danych. Ponadto istnieje wtedy możliwość łatwego rozszerzenia operacji uśredniania danych na długie przedziały czasowe, co może przyczynić się do większej odporności układu na działające zakłócenia i przez to do zmniejszenia błędów obliczeń.

W artykule przedstawiono modyfikacje wzorów analitycznych [5] służących do wyznaczania parametrów modeli matematycznych łuku, których efektywność zweryfikowano w sposób symulacyjny. Ponieważ rozważania dotyczą przybliżonego modelowania procesów dynamicznych w samej kolumnie łuku, to uznano, że przyelektrodowe spadki napięć zostały skompensowane w sposób fizyczny [6, 7] lub obliczeniowy.

Modele Mayra i GMM

Model Mayra jest jednym z najczęściej używanych modeli matematycznych kolumny łuku do symulowania procesów w obwodach elektrycznych ze słabymi prądami. Należy on do klasy modeli liniowych opisanych równaniem różniczkowym I rzędu

$$(1) \quad \theta_M \frac{dg}{dt} + g = \frac{i^2}{P_M}$$

gdzie: g - konduktancja kolumny; i - prąd wymuszający; P_M - stała moc Mayra, W ; θ_M - stała czasowa modelu Mayra wyrażana w milisekundach. Modelowi temu odpowiada charakterystyka statyczna napięciowo-prądowa łuku pobudzanego przez prąd stały I

$$(2) \quad U_{col} = \frac{P_M}{I}$$

kóra nie przechodzi przez początek układu (0, 0). W modelu Mayra wartość napięcia przebiegia przerwy międzyelektrodowej pozostaje nieokreślona, a zależy ona od wielu czynników fizycznych, takich jak: temperatura, ciśnienie i skład chemiczny gazu, temperatura i kształt elektrod, promieniowanie jonizujące, dodatkowe okresowe impulsy wysokonapięciowe itd.

Wprowadzenie modyfikacji do modelu Mayra umożliwia uwzględnienie skończonej (zadanej) wartości napięcia w punkcie zapłonu wyładowania na charakterystyce statycznej łuku elektrycznego. Odpowiednie równanie ma postać [4]

$$(3) \quad \theta_w \frac{dg}{dt} + g = \frac{i^2 + I_w^2}{P_w} = \frac{i^2}{P_w} + G_w$$

gdzie: $G_w = I_w^2 / P_w$ - konduktancja charakterystyczna modelu GMM, S ; P_w - stała moc modelu GMM, W ; I_w - prąd modelu GMM, A ; θ_w - stała czasowa modelu GMM wyrażana w milisekundach. Modelowi temu odpowiada charakterystyka statyczna łuku

$$(4) \quad U_{col} = \frac{P_W I}{I^2 + P_W G_W} = \frac{P_W I}{I^2 + I_W^2}$$

która przechodzi przez początek układu (0, 0).

Zmniejszaniu wartości modułu prądu zwykle towarzyszy znaczny wzrost funkcji tłumienia łuku, co powoduje silne rozmycie wartości napięcia przebiega przerwy międzyelektrodowej na charakterystykach dynamicznych. Wtedy następuje utrata efektywności wyznaczania parametrów odpowiadających współrzędnym punktu przebiega [5]. Ponadto istnieje wiele czynników fizycznych wpływających na zmniejszenie stałej czasowej łuku. Do nich należą m.in. odpowiedni skład chemiczny gazu i intensywność omywania kolumny przepływem gazowym.

Zmodyfikowana metoda wyznaczania parametrów modeli matematycznych Mayra i GMM łuku pobudzanego przez prąd sinusoidalny

Wstępny etap badań łuku elektrycznego obejmuje wyznaczanie przyelektrodowych spadków napięcia. W tym celu można wykorzystać różne metody bezpośrednio i pośrednio [6, 7]. Znajomość tych spadków umożliwia określenie napięcia na kolumnie łuku u_{col} . Zakładamy, że na łuk działa wymuszenie w postaci prądu sinusoidalnego

$$(5) \quad i = I_m \cos \omega t = \sqrt{2} I_{rms} \cos \omega t$$

gdzie: I_m – amplituda prądu, A; I_{rms} – wartość skuteczna prądu, A; $\omega = 2\pi f$ – prędkość kątowa, rad/s. Rozwiązanie analityczne modelu (3) prowadzi do zależności na tangens kąta przesunięcia fazowego w zależności określającej prąd stanu [5]

$$(6) \quad \begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{\int_0^T g \sin 2\omega t dt}{\int_0^T g \cos 2\omega t dt} = \\ &= \frac{2[g \sin \omega t \cos \omega t]_{av}}{[g \cdot (\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t)]_{av}} = \\ &= \frac{2 \left[\frac{i^2}{u_{col}} i \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right]_{av}}{\left[\frac{i}{u_{col}} \cdot \left(i^2 - i^2 \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right]_{av}} \end{aligned}$$

gdzie: av – indeks oznaczający obliczanie wartości średniej z wyrażenia w nawiasach na wybranym przedziale czasu. Na tej podstawie można określić stałą czasową modelu

$$(7) \quad \theta_W = \frac{1}{2\omega} \operatorname{tg} \varphi$$

Moc modelu GMM [5] można obliczyć z zależności

$$(8) \quad \begin{aligned} P_W &= \frac{I_{rms}^2}{\frac{2}{T} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \int_0^T g \cos 2\omega t dt} = \\ &= \frac{I_{rms}^2}{2(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \cdot [g \cdot (\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t)]_{av}} = \\ &= \frac{I_{rms}^4}{(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \cdot \left[\frac{i}{u_{col}} \cdot \left(i^2 - i^2 \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right]_{av}} \end{aligned}$$

lub jej równoważnej

$$(9) \quad \begin{aligned} P_W &= \frac{I_{rms}^2 \operatorname{tg} \varphi}{\frac{2}{T} (1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \int_0^T g \sin 2\omega t dt} = \\ &= \frac{I_{rms}^2 \operatorname{tg} \varphi}{4(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) [g \sin \omega t \cos \omega t]_{av}} = \\ &= \frac{I_{rms}^4 \operatorname{tg} \varphi}{2(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi) \cdot \left[\frac{i^2}{u_{col}} \cdot i \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right]_{av}} \end{aligned}$$

Prąd modelu GMM [5] określa wzór

$$(10) \quad I_W^2 = P_W \frac{1}{T} \int_0^T g dt - I_{rms}^2 = P_W \left(\frac{i}{u} \right)_{av} - I_{rms}^2$$

Ponieważ model Mayra stanowi szczególny przypadek modelu GMM ($I_W = 0$ A), to wzory na wyznaczanie jego parametrów upraszczają się do postaci

$$(11) \quad P_M = \frac{I_{rms}^2}{\frac{1}{T} \int_0^T g dt} = \frac{I_{rms}^2}{\left(\frac{i}{u} \right)_{av}} = (ui)_{av}$$

$$(12) \quad \theta_M = \frac{1}{2\omega} \operatorname{tg} \varphi = \theta_W |_{I_W=0A}$$

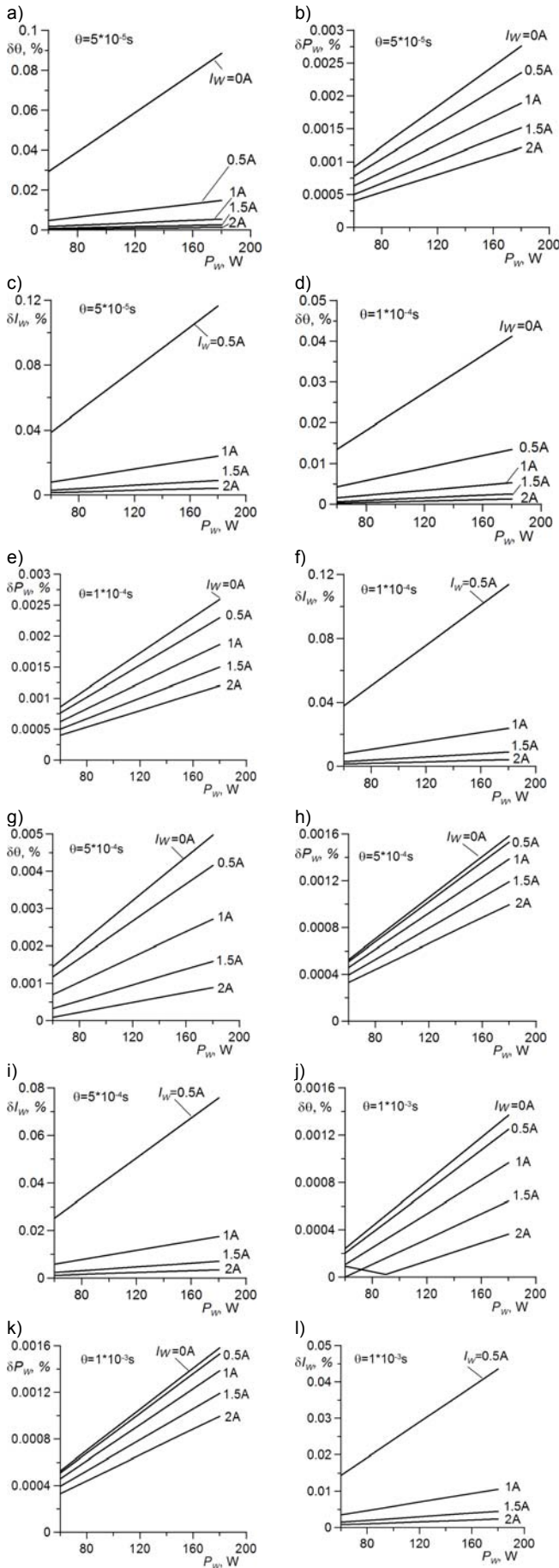
Numeryczna weryfikacja zmodyfikowanej metody całkowitej wyznaczania parametrów modeli Mayra i GMM łuku w obwodzie ze źródłem prądowym idealnym

W celu zbadania efektywności zmodyfikowanej metody całkowitej wyznaczania parametrów modeli matematycznych łuku utworzono ich makromodele w programie MATLAB-Simulink. Każdy z nich (wariant Mayra dotyczy przypadku $I_W = 0$ A) został włączony w prosty obwód elektryczny zawierający źródło prądu sinusoidalnego o częstotliwości $f = 50$ Hz i amplitudzie 7 A. W układach pomiarowych, gdzie zwykle występują stosunkowo wysokie poziomy zakłóceń procesów w obwodach fizycznych z łukiem elektrycznym, należy przewidzieć zastosowanie filtrów odpowiednich częstotliwości. Do przekształcenia kosinusoidalnego przebiegu prądu w przebieg sinusoidalny zastosowano człon opóźniający o czasie opóźnienia $T/4$. Użycie zamiast

niego członu całkującego ($\omega \int I_m \cos \omega t dt$) prowadzi do większych błędów obliczeniowych i jest wrażliwe na zniekształcenia przebiegów.

Efektami przeprowadzonych symulacji są obliczone błędy względne procentowe wyznaczania parametrów modeli matematycznych łuku. Zbadano wpływ parametrów zadanych (mocy, tłumienia, konduktancji resztkowej) na tendencje zmian modułów błędów $\delta\theta$, δP_W i $\delta I_W = f(P_W, \theta, I_W)$. Jak widać błędy te układają się wzdłuż odcinków linii prostych, co świadczy o ich systematycznym charakterze.

Na rysunku 1 pokazano wykresy błędów procentowych wyznaczania parametrów modelu matematycznego GMM (3) w obwodzie z wymuszeniem prądowym i makromodelem łuku o zadawanych wartościach (θ , P_W , I_W).



Rys. 1. Błędy procentowe wyznaczania parametrów modelu GMM łuku zasilanego z idealnego źródła prądowego ($I_m = 7 \text{ A}$, $f = 50 \text{ Hz}$)

Przypadkom małych wartości współczynnika tłumienia łuku ($\theta = 5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$) i bardzo małych wartości prądu ($I_w \approx 0 \text{ A}$) odpowiadają stosunkowo duże moduły błędów $\delta\theta$ wyznaczania stałej czasowej modelu. Moduły te rosną wraz ze wzrostem mocy łuku, a maleją wraz ze wzrostem prądu I_w i wzrostem funkcji tłumienia. Moduły błędów wyznaczania mocy δP_w modelu matematycznego mają stosunkowo małe wartości (poniżej 1%). Rosną one ze wzrostem mocy. Natomiast maleją wraz ze wzrostem prądu I_w i stałej czasowej. Moduły błędów wyznaczania prądu makromodelu δI_w rosną wraz ze wzrostem mocy łuku, a maleją wraz ze wzrostem stałej czasowej i prądu I_w .

Ogólnie stwierdzono, że w przeważającej większości przypadków wyznaczone wartości parametrów modeli łuku są mniejsze od rzeczywistych. Moduły błędów rosną prawie liniowo wraz ze wzrostem mocy łuku. Najmniejsze wartości modułów błędów odpowiadają największym wartościom prądu I_w .

Wykorzystanie zmodyfikowanej metody całkowej do wyznaczania parametrów modeli Mayra i GMM łuku w obwodach z rzeczywistymi źródłami energii

Łuk elektryczny w urządzeniach przemysłowych i elektroenergetycznych zasilany jest ze źródeł energii elektrycznej o różnych charakterystykach zewnętrznych. Ze względów ekonomicznych i technologicznych możliwe jest stosowanie źródeł prądowych (o charakterystykach fragmentami idealnych) do zasilania łuku małej i średniej mocy w urządzeniach spawalniczych. W urządzeniach elektrotermicznych wielkiej mocy (piecach łukowych, piecach plazmowo-łukowych, piecach łukowo-oporowych itd.) i w elektroenergetyce (aparatach łączeniowych) łuki są zwykle zasilane z rzeczywistych źródeł energii (prądowych lub równoważnych napięciowych).

Po wykazaniu efektywności zmodyfikowanej metody całkowej wyznaczania parametrów modelu GMM podjęto próbę rozszerzenia zakresów zastosowań zależności analitycznych (6)-(12), na przypadki zastosowania rzeczywistych źródeł napięcia (impedancja wewnętrzna $Z_w = X_L = \omega L > 0 \Omega$) i prądu (admitancja wewnętrzna $Y_w = 1/Z_w < \infty \text{ S}$). Na skutek nieliniowego obciążenia źródła, kształty przebiegów ustalonego prądu łuku mogą odbiegać od sinusoidalnego. Stanowi to naruszenie podstawowego założenia metody analitycznej. W celu uproszczenia analizy uwzględniono tylko jeden zmienny parametr źródła - indukcyjność, co można uzasadnić właściwościami typowych źródeł, zapewniającymi efektywną stabilizację wyładowań. Aby rozszerzyć użyteczność wzorów analitycznych, wprowadzono odpowiednie funkcje korekcyjne, zależne od parametrów impedancji (admitancji) wewnętrznej źródła. W przybliżeniu można je opisać prostymi zależnościami

$$(13) \quad \theta_r \approx F_\theta(L) \cdot \theta_m$$

$$(14) \quad P_r \approx F_P(L) \cdot P_m$$

$$(15) \quad I_r \approx F_I(L) \cdot I_m$$

gdzie: m - indeks wielkości mierzzonej; r - indeks wielkości bliskiej rzeczywistej; funkcje $F_\theta(L) \approx \tilde{F}_\theta(\theta, P_w, I_w, L)$, $P_r(L) \approx \tilde{F}_P(\theta, P_w, I_w, L)$ i $I_r(L) \approx \tilde{F}_I(\theta, P_w, I_w, L)$ aproksymują dane uzyskane z symulacji. Efektywność stosowania tych funkcji aproksymujących w zakresach dużych wartości indukcyjności zależy od poziomu zakłóceń występujących w łuku elektrycznym.

Na rysunku 2 pokazano wykresy funkcji korekcyjnych, mogących służyć do wyznaczania parametrów modelu GMM łuku zasilanego z rzeczywistego źródła prądowego o zmiennej indukcyjności wewnętrznej. Jak widać, obliczone symulacyjnie wartości stałej czasowej θ ulegają zawyżeniu ($F_\theta' < 1$), a mocy P_W ($F_P' > 1$) zaniżeniu w stosunku do rzeczywistych. F_P' szybko maleje wraz ze wzrostem indukcyjności źródła. Jeśli indukcyjności L są duże (ponad 50 mH), to funkcje F_θ' i F_P' leżą w wąskim pasmie, pomimo znacznych zmian prądu I_W w zakresie (0-2) A i mocy P_W w zakresie (50-100) W.

Jeśli funkcja tłumienia procesów elektrycznych w łuku jest mała ($\theta = 1 \cdot 10^{-4}$ s), co pokazano na rysunku 2a-c, to można zaproponować użycie aproksymacji

$$(16) \quad F_\theta'(L) = 0,193 \ln(L) - 0,445$$

$$(17) \quad F_P'(L) = 2,08L^{-0,133}$$

Natomiast funkcję $F_I'(L)$ charakteryzuje znaczny rozrzut wartości, wzrastający wraz ze zmniejszaniem indukcyjności. Ich rozkład można potraktować jako losowy. Aproksymacja danych prowadzi do zależności

$$(18) \quad F_I'(L) = 2,09L^{-0,138}$$

W zakresie zmian indukcyjności powyżej 100 mH i wysokiego poziomu zakłóceń można przyjmować wartość F_I' bliską jedności.

Jeśli funkcja tłumienia procesów w łuku jest duża ($\theta = 1 \cdot 10^{-3}$ s), co pokazano na rysunku 2d-f, to można zaproponować użycie aproksymacji

$$(19) \quad F_\theta'(L) = 0,0928 \ln(L) + 0,448$$

$$(20) \quad F_P'(L) = 1,719L^{-0,0968}$$

Natomiast funkcję $F_I'(L)$ charakteryzuje znaczny rozrzut wartości, wzrastający wraz ze zmniejszaniem indukcyjności. Aproksymacja danych prowadzi do zależności

$$(21) \quad F_I'(L) = 1,1L$$

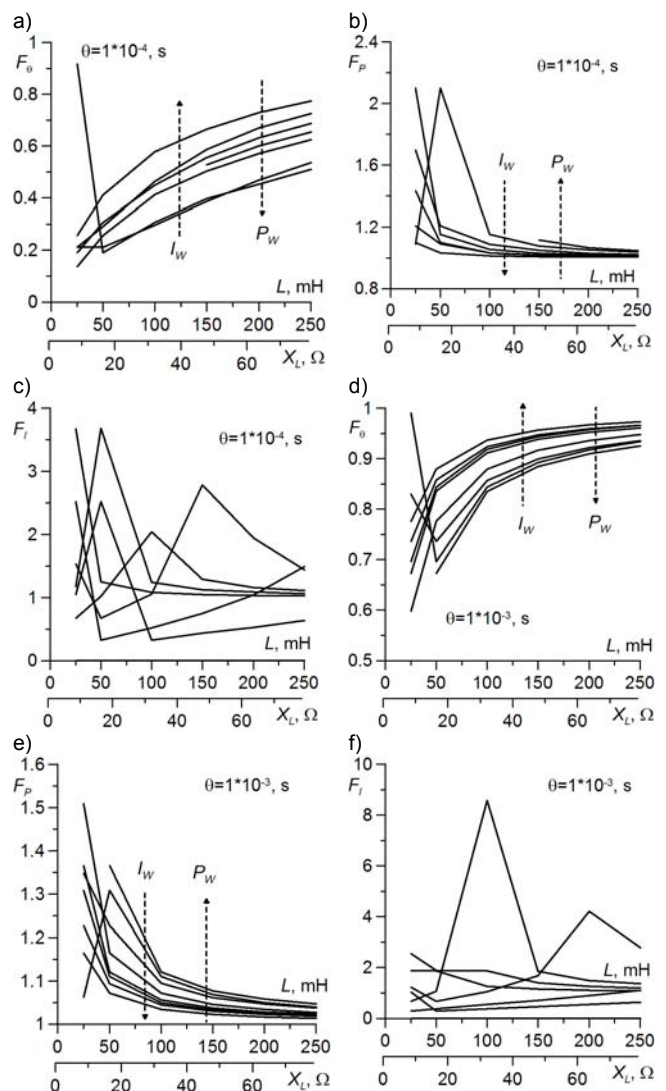
Odształcenia fal prądu i napięcia, w stosunku do sinusoidalnych, prowadzą do wzrostu współczynników THD_I i THD_U , które określa się ze wzorów [8]:

$$(22) \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1}$$

$$(23) \quad THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}$$

gdzie: I_k – numery harmoniczných prądu; U_k – numery harmoniczných napięcia. Odpowiednie wykresy tych współczynników pokazano na rysunku 3. Wykresy $THD_I(L)$ są niemal skorelowane z wykresami $F_P'(L)$. Natomiast wykresy $THD_U(L)$ mają tendencję odwrotną i nieco podobną do wykresów $F_\theta'(L)$. Te wykresy mogą stanowić wygodne

wskazniki służące do zgrubnej oceny przydatności wzorów analitycznych i funkcji korekcyjnych w badaniach eksperymentalnych obwodów z łukami słaboprądowymi zasilanymi z rzeczywistych źródeł prądu.



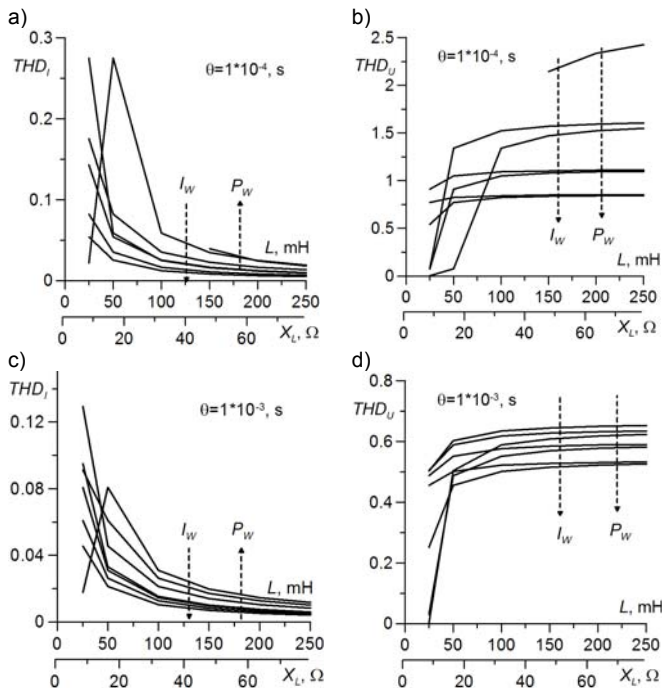
Rys. 2. Funkcje korekcyjne do wyznaczania parametrów modelu GMM łuku zasilanego z rzeczywistego źródła prądowego ($I_m = 7$ A, $f = 50$ Hz)

Na rysunku 4 pokazano wykresy funkcji korekcyjnych mogących służyć do wyznaczania parametrów modelu GMM łuku zasilanego z rzeczywistego źródła napięciowego o zmiennej indukcyjności wewnętrznej L . Tak jak poprzednio, obliczone symulacyjnie wartości stałej czasowej ulegają zawyżeniu, a mocy P_W i prądu I_W zaniżeniu w stosunku do rzeczywistych. W przypadkach funkcji F_θ'' i F_P'' oraz w zakresie zmian indukcyjności L ponad 50 mH leżą one w wąskim pasmie pomimo znacznych zmian prądu $I_W = (0-2)$ A i mocy $P_W = (50-100)$ W.

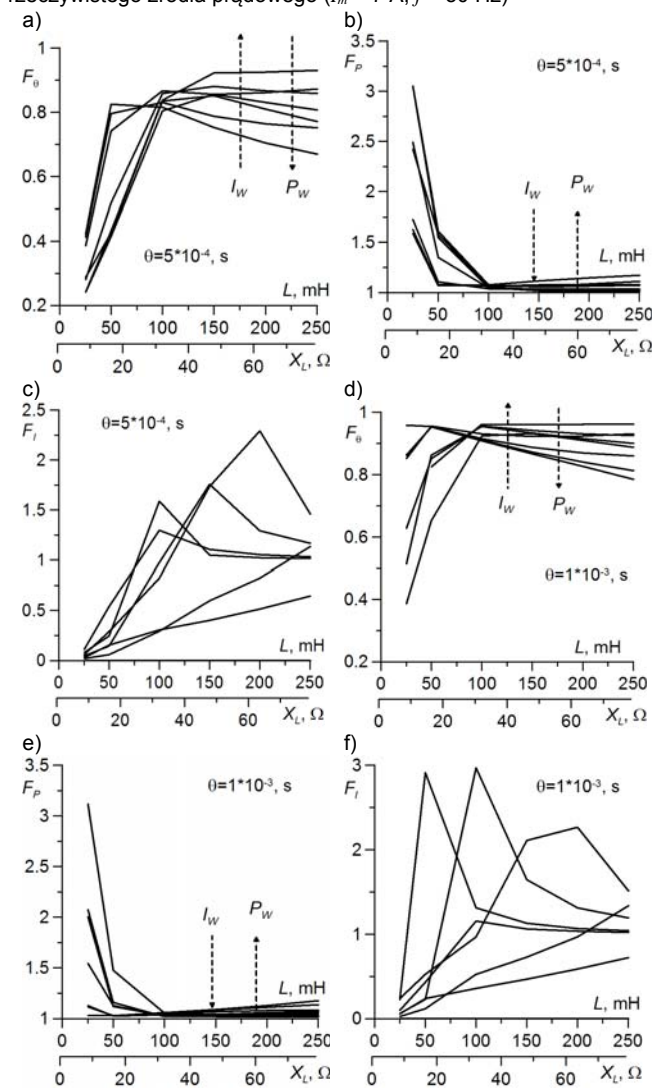
Jeśli funkcja tłumienia procesów w łuku jest mała ($\theta = 5 \cdot 10^{-4}$ s), co pokazano na rysunku 4a-c, to można zaproponować użycie aproksymacji

$$(24) \quad F_\theta''(L) = 0,2012 \ln(L) - 0,209$$

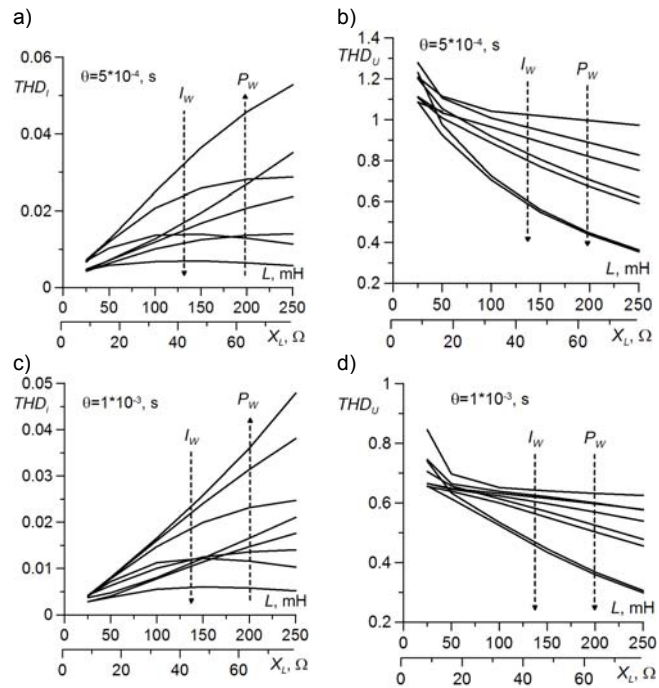
$$(25) \quad F_P''(L) = 4,205L^{-0,269}$$



Rys. 3. Funkcje współczynnika zawartości harmonicznego prądu THD_I i napięcia THD_U łuku opisanego modelem GMM i zasilanego z rzeczywistego źródła prądowego ($I_m = 7$ A, $f = 50$ Hz)



Rys. 4. Funkcje korekcyjne do wyznaczania parametrów modelu GMM łuku zasilanego z rzeczywistego źródła napięciowego ($U_m = 300$ V, $f = 50$ Hz)



Rys. 5. Funkcje współczynnika zawartości harmonicznego prądu THD_I i napięcia THD_U łuku opisanego modelem GMM i zasilanego z rzeczywistego źródła napięciowego ($U_m = 300$ V, $f = 50$ Hz)

Natomiast funkcję $F_i''(L)$ charakteryzuje, tak jak poprzednio, znaczny rozrzut wartości, początkowo wzrastający wraz ze wzrostem indukcyjności. Aproksymacja danych prowadzi do zależności

$$(26) \quad F_i''(L) = 4,334 \cdot 10^{-3} L + 0,0753$$

Jeśli funkcja tłumienia procesów w łuku jest duża ($\theta = 1 \cdot 10^{-3}$ s), co pokazano na rysunku 4d-f, to można zaproponować użycie aproksymacji

$$(27) \quad F_\theta'''(L) = 0,0314 \ln(L) + 0,708$$

$$(28) \quad F_p''(L) = 2,103 L^{-0,134}$$

Natomiast funkcję $F_i'(L)$ charakteryzuje znaczny rozrzut wartości, wzrastający wraz ze zmniejszaniem indukcyjności. Aproksymacja danych prowadzi do zależności

$$(29) \quad F_i'(L) = 0,337 \ln(L) - 0,847$$

Na rysunku 5 pokazano wykresy współczynników zawartości harmonicznego prądu i napięcia łuku w obwodzie z rzeczywistym źródłem napięciowym. Wykresy $THD_I(L)$ wskazują na narastanie tego współczynnika ze wzrostem indukcyjności. Tak więc, prąd staje się coraz bardziej odkształcony. Wzrost mocy P_W powoduje zwiększenie szybkości narastania THD_I , natomiast wzrost natężenia prądu I_W powoduje jego zmniejszenie. Wykresy $THD_U(L)$ mają tendencję odwrotną, gdyż wartości tego współczynnika maleją wraz ze wzrostem indukcyjności. To oznacza, że napięcie staje się coraz mniej odkształcone, zbliżając się do fali sinusoidalnej. Wzrosty mocy P_W lub prądu I_W przyczyniają się do zmniejszenia tego wskaźnika. Ze względu na dużą zmienność wskaźników THD_I i THD_U nie mogą one ułatwiać oceny przydatności wzorów analitycznych i funkcji korekcyjnych w badaniach eksperymentalnych obwodów z łukami słaboprądowymi zasilanymi z rzeczywistych źródeł napięcia.

Analizując wykresy, pokazane na rysunku 1c,f,i,l, można zauważyć, że wartości błędów wyznaczania prądu δI_w łuku zasilanego z idealnego źródła prądowego są znacznie większe od błędów wyznaczania pozostałych parametrów modelu GMM (mocy δP_w i stałej czasowej $\delta \theta$).

Zastosowanie rzeczywistych źródeł zasilania powoduje, że w szerokim zakresie zmian indukcyjności wewnętrznych funkcje korekcyjne $F_i(L)$ i $F_i''(L)$ zmieniają się niemonotonicznie, demonstrując cechy podobne do zmian losowych (rys. 2c,f, rys. 4c,f). W miarę zwiększania wartości reaktancji źródeł (źródła energii zbliżają się działaniem do idealnego prądowego) funkcje te dążą do wartości 1.

Wnioski

1. Zastosowanie wymuszenia w postaci idealnego źródła prądu sinusoidalnego w obwodach z łukiem elektrycznym małej mocy umożliwia efektywne wyznaczanie parametrów i charakterystyk modeli matematycznych Mayra i GMM łuku przez pomiar wartości średnich i skutecznych wyrażeń wiążących prąd i napięcie na kolumnie plazmowej.
2. Najmniejsze wartości błędów wyznaczania parametrów modelu matematycznego GMM łuku uzyskuje się w przypadkach dużych wartości prądu $I_w = \sqrt{G_w P_w}$, co odpowiada silnej jonizacji obszaru kolumny w trakcie przechodzenia prądu przez wartość zerową.
3. Wzrost funkcji tłumienia łuku przyczynia się do zmniejszenia błędów wyznaczania parametrów modelu matematycznego GMM łuku.
4. W przypadku zasilania łuku elektrycznego z rzeczywistych źródeł energii wyznaczone wartości stałej czasowej są zawyżone, a mocy zaniżone w stosunku do rzeczywistych, co w bardziej dokładnych obliczeniach wymaga zastosowania funkcji korekcyjnych.
5. W obwodach z rzeczywistymi źródłami energii elektrycznej najmniej wrażliwe na zmiany reaktancji źródła jest wyznaczanie mocy modelu GMM łuku.
6. Przeprowadzone symulacje procesów ujawniły szczególnie duże trudności w dokładnym wyznaczeniu wartości parametru I_w modelu GMM łuku zasilanego z rzeczywistych źródeł energii. W celu ich pokonania, właściwości tych źródeł nie powinny znacznie różnić się od właściwości idealnego źródła prądowego.
7. Wykorzystanie współczynników zawartości harmonicznego prądu TDH_i i napięcia TDH_U łuku do oceny zakresu stosowalności metody całkowej

wyznaczania parametrów modelu GMM jest ograniczone do źródeł prądowych ze stromo opadającymi charakterystykami zewnętrznymi $U(I)$.

8. Przedstawione w publikacji błędy wyznaczania parametrów modeli łuku wynikają z niedokładności operacji matematycznych wykonywanych na komputerze. Są one również właściwe komputerowym układom pomiarowo-diagnostycznym. Mają one również wpływ na dokładność wyznaczania funkcji korekcyjnych.
9. Występujące w warunkach fizycznych zewnętrzne oddziaływanie zaburzające kolumnę plazmową powinny być filtrowane, gdyż mogą znacznie powiększyć błędy wyznaczania parametrów modeli matematycznych i zmniejszyć celowość korzystania z funkcji korekcyjnych.

Autor: dr hab. inż. Antoni Sawicki prof. PCz., Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: sawicki.a7@gmail.com.

LITERATURA

- [1] Пентегов И.В., Сидорев В.Н., Сравнительный анализ моделей динамической сварочной дуги, *Автомат. сварка*, (1989), № 2, 33-36
- [2] Marciniak L., Implementacje modeli łuku ziemnozwarciowego w programach PSCAD i Matlab/Simulink, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), nr 9a, 126-129
- [3] King-Jet Tseng, Yaoming Wang, Mahinda Vilathgamuwa, An Experimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12 (1997) vol., no. 3, 429-436
- [4] Wąsowicz S., Uogólniony model Mayra łuku elektrycznego, Praca niepublikowana. Częstochowa 2016
- [5] Sawicki A., Metoda całkowej wyznaczania parametrów modelu Mayra i uogólnionego modelu Mayra łuku elektrycznego z wymuszeniem za pomocą źródła prądu sinusoidalnego, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, (2017), nr 1 (w druku)
- [6] Савицки А., Хальтоф М., Проблемы определения параметров математических моделей электрических дуг в цепях с источниками тока, *Электричество*, (2016), № 1, 25-34
- [7] Sawicki A., Haltof M., Wybrane metody eksperymentalnego wyznaczania przyelektrodowych spadków napięcia łuków elektrycznych. Cz. 1. Metody bezpośrednie wyznaczania przyelektrodowych spadków napięcia, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, (2015), nr 6, 61-69
- [8] Kowalski Z., Jakość energii elektrycznej, Monografie PŁ. Wydawnictwo PŁ, Łódź 2007