

WPLYW PROCESÓW INICJACJI I GASZENIA ŁUKÓW W PIECACH ŁUKOWYCH AC NA STANY ASYMETRII UKŁADU ZASILANIA

Marek GAŁA^{1,2}, Antoni SAWICKI², Kazimierz JAGIEŁA^{2,3}, Janusz RAK²

1. Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej
tel.: +48 343250831 e-mail: m.gala@el.pcz.czest.pl
2. Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Oddział Częstochowa
tel.: +48 343244654 e-mail: sawicki.a7@gmail.com
tel.: +48 343244654 e-mail: marek.gala@gmail.com
tel.: +48 343244654 e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com
tel.: +48 343244654 e-mail: jener35@gmail.com
3. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Katedra Informatyki i Automatyki
tel.: +48 338279264 e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com

Streszczenie: W artykule opisano wybrane czynniki wpływające na zmiany długości łuków występujące w piecach łukowych AC. Szczególną uwagę zwrócono na wydłużenia kolumny plazmowej towarzyszące procesom zainicjowania i gaszenia łuku. Do symulacji pracy pieca wykorzystano matematyczny model Pentegowa łuku elektrycznego z zadaną statyczną charakterystyką napięciowo-prądową, zależną od długości kolumny. Opracowano model układu zasilania pieca z sieci elektroenergetycznej wysokiego napięcia. Przedstawiono wyniki badań uzyskane w stanach asymetrii sieci trójfazowej wywołanych zwarciami i rozciąganiem łuku w jednej fazie, a także rozciąganiem łuków w dwóch fazach. Zaprezentowano wyznaczone wartości wskaźników asymetrii oraz wartości skuteczne prądów i napięć w wybranych węzłach systemu. Stwierdzono silny wpływ stanów zwarcia i rozciągania łuków, występujących w jednej oraz w dwóch fazach, na wartości skuteczne napięć i prądów w pozostałych fazach oraz na asymetrię napięć po stronie pierwotnej transformatora piecowego, a także po stronie wtórnej transformatora sieciowego.

Słowa kluczowe: łuk elektryczny, model Pentegowa, piec łukowy, asymetria sieci.

1. WSTĘP

Stalownicze piece łukowe prądu przemiennego zwykle budowane są jako odbiorniki trójfazowe. Ze względu na bardzo duże moce powinny one zapewniać symetryczne obciążenie sieci. Jednak różne warunki pracy tych urządzeń powodują, że tylko w szczególnych sytuacjach udaje się zapewnić pełne symetryczne obciążenia poszczególnych faz [1]. Pomimo odpowiedniej symetrycznej konstrukcji układu zasilania i podejmowanych starań o równomierne rozmieszczenie składników wsadu w koszu wsadowym i na trzonie pieca, mogą występować zaburzenia w rozmieszczeniu złomu i w położeniu elektrod. Podobnie jak stany zwarcia, tak i krótkotrwałe stany asymetrii układu zasilania pieca można uznawać jako normalne zjawiska towarzyszące procesom technologicznym. Znajomość tych zjawisk jest jednak potrzebna do odpowiedniego doboru nastaw komponentów systemu zasilania i systemu sterowania pieca. Ekstremalne stany asymetrii mogą występować podczas inicjowania i gaszenia łuku. Zwykle czasy ich trwania nie są

długie, lecz z różnych powodów mogą być dość często powtarzane. Takie różne stany przejściowe w sytuacji silnej nieliniowości łuków i obecności elementów reaktancyjnych mogą sprzyjać powstawaniu przepięć i zjawisk rezonansowych. Aby możliwe było symulacyjne zbadanie stanów asymetrii pracy pieców (w szerokich zakresach zmian prądów i długości kolumny łukowej), wymagane jest zastosowanie odpowiednich modeli matematycznych łuku [2, 3]. W przeprowadzonych badaniach użyty został uniwersalny model Pentegowa [6], umożliwiający łatwą modyfikację charakterystyk i wprowadzenie dodatkowej zmiennej w postaci długości kolumny łukowej.

2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA ZMIANY DŁUGOŚCI ŁUKÓW W AC-EAF

Cechą charakterystyczną stalowniczych pieców łukowych prądu przemiennego (AC-EAF) jest słaba stabilność pionięcia łuków. Wynika ona nie tylko z okresowych zmian kierunku przepływu prądów i chwilowych zaników wyładowania, ale także różnych oddziaływań zewnętrznych na kolumny plazmowe. Należą do nich oddziaływania mechaniczne, wynikające z przesuwania elektrod grafitowych, przesuwania stałych materiałów wsadowych i kołysania kąpeli metalowej. Prowadzą one do zmian długości łuków. Zwykle, ze względu na duże masy elektrod grafitowych, złomu i kąpeli, charakteryzują się one stosunkowo małymi prędkościami ruchów. W porównaniu z nimi oddziaływania elektromagnetyczne prądów w sąsiednich łukach i elektrodach prowadzą do bardzo szybkich zmian długości kolumn. Ulegają one zarówno odchyleniom, jak również przesunięciom wraz z plamami łukowymi [4].

W symulowaniu procesów w AC-EAF zwykle zakłada się stałe długości łuków. Ponieważ ze względu na słabą stabilność tych łuków ich długości są stosunkowo małe, to i względne ich przyrosty też nie są duże. Jednak z powodu silnych nieliniowości charakterystyk statycznych i dynamicznych łuków pomijanie tych efektów może zniekształcać oceny stabilności pracy i oddziaływania

pieców na sieci zasilające. Szczególnie duże zmiany długości łuków występują podczas startu pieca i podczas jego wyłączenia. W pierwszym przypadku po zwarcu elektrod ze wsadem następuje ich unoszenie, prowadzące do zapłonu i rozciągania łuków, aż do osiągnięcia zadanych wartości rezystancji kolumn plazmowych. W drugim przypadku gaszenie łuków następuje po ich nadmiernym rozciągnięciu, co umożliwia racjonalne oszczędzanie aparatury komutacyjnej. Ze względu na losowe zmiany położenia wsadu i zakłócenia w działaniu układów regulacji długości łuków mogą być różne. Często podczas pracy pieców obserwowane są niskoczęstotliwościowe wahania elektrod. Mogą one wynikać z zaburzeń długości łuku lub z niestabilności działania układów regulacji.

Ze względu na bardzo duże moce AC-EAF i wysokie temperatury gazów w obszarze roboczym, dynamika procesów w łukach odbywa się ze stosunkowo dużą inercją. Oczywiście zależy to od stadium topienia wsadu i składu chemicznego gazu. Szeroki zakres zmian natężenia prądu roboczego powoduje, że popularne proste modele matematyczne łuku elektrycznego mogą mieć ograniczone zastosowanie. Obecnie coraz częściej stosuje się modele hybrydowe, kojarzące model Mayra i Cassiego [5]. Jednak podobne rezultaty można osiągnąć stosując bardzo uniwersalny model Pentegowa [6]. Wykorzystuje on statyczną charakterystykę napięciowo-prądową i umożliwia łatwe uwzględnienie zmian długości kolumny łuku [7].

Według założeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych procesy startu i stopu AC-EAF powinny być symetryczne. Istnieje jednak kilka przyczyn, z których wynikają możliwe stany asymetryczne. Należą do nich różne masy elektrod, nierównomierne rozmieszczenie wsadu w kotle pieca oraz odmienne zagłębienie elektrod w kąpiel metalową i warstwę żużla. Ponadto niekiedy występują różne stany awaryjne w układach napędowych i sterowania elektrod prowadzące do asymetrii ich działania.

3. MODEL MATEMATYCZNY ŁUKU ROZCIĄGANEGO

Do opisu matematycznego właściwości dynamicznych kolumny łuku elektrycznego można wykorzystać model Pentegowa [6]. W tym modelu zamiast rzeczywistego łuku wprowadza się łuk hipotetyczny. Konduktancję jego kolumny określa się za pomocą fikcyjnego prądu stanu $i_0(t)$. Ten prąd zmienia się z pewną stałą czasową $\theta = \text{const}$. Tak więc model Pentegowa odwzorowuje nieliniowy dwójnik pasywny, który jest: energetycznie zbilansowany, cieplnie inercyjny I rzędu, liniowy, stacjonarny i elektrycznie bezinercyjny. Zgodnie z założeniami modelu, prądy i napięcia łuku spełniają warunek

$$\frac{i}{u} = \frac{i_0}{U} = g \quad (1)$$

gdzie: $U(I)$ – charakterystyka napięciowo-prądowa statyczna kolumny łuku, g – konduktancja kolumny. Na podstawie równania bilansu mocy w kolumnie plazmowej

$$\frac{dQ}{dt} + Ui_0 = ui \quad (2)$$

(gdzie: dQ/dt – pochodna zmiany energii wewnętrznej plazmy; Ui_0 – moc elektryczna rozproszona z kolumny; ui – moc elektryczna dostarczona) można otrzymać

równanie różniczkowe liniowe I rzędu

$$\theta \frac{di^2}{dt} + i_0^2 = i^2 \quad (3)$$

gdzie θ – oznacza stałą czasową. W ogólnym przypadku napięcie na kolumnie łuku określa wzór

$$u = \frac{U(i_0)}{i_0} i \quad (4)$$

W zależności od wybranej charakterystyki statycznej można uzyskać różne warianty modelu łuku. Do nich można zaliczyć model Mayra i model Cassiego [6, 8]. W stosunku do takich przypadków opracowano wiele metod [9] eksperymentalnego wyznaczania parametrów modeli. Wyznaczanie kształtu charakterystyki statycznej jest stosunkowo łatwe w przypadkach wykorzystania prądu stałego lub prostokątnego o wartości $|i(t)| = \text{const}$. Takie możliwości istnieją w stosunku do łuków małej mocy w urządzeniach spawalniczych. Piece łukowe prądu przemiennego (AC-EAF) i prądu stałego (DC-EAF) są budowane jako zupełnie oddzielne jednostki, charakteryzujące się różnymi właściwościami metalurgicznymi i elektrycznymi [10]. Wpływają na to parametry sieci zasilających w punkcie przyłączenia, konstrukcja i bieżące ułożenie przewodów toru wieloprądowego, sposób przebiegu procesu technologicznego, stan wyposażenia technicznego w warunkach szybkich procesów zużycia i starzenia, wybrany sposób regulacji mocy i poziom umiejętności obsługującego personelu.

Pomimo iż w piecach łukowych występuje bardzo wysoki poziom zakłóceń, to jednak bardzo często stosowane są modele deterministyczne. To jeszcze bardziej utrudnia eksperymentalne wyznaczanie parametrów tych modeli.

Jeśli założyć charakterystykę statyczną łuku w postaci

$$U(I, l) = A + Bl + \frac{P_M}{I} \quad (5)$$

to w przybliżeniu można odwzorowywać jego właściwości w pełnym zakresie natężenia prądu. Parametr A odpowiada sumie przyelektrodowych spadków napięcia. Parametr B jest często nazywany gradientem napięcia ze względu na odchylenie łuku od osi elektrody. Parametr P_M jest związany z zakresem słaboprądowym. Można wówczas przyjąć, że pod wpływem rozciągania łuku, jego charakterystyki ulegają transformacji w kierunku wyższych wartości napięcia. Jednym z niedostatków takiej aproksymacji jest nieokreśloność napięcia powtórnego zapłonu łuku prądu zmiennego. Dlatego korzystne jest wprowadzenie modyfikacji wzoru (4) w postaci

$$U(I, l) = A + Bl + \frac{P_M I}{I^2 + I_w^2} \quad (6)$$

Odciętej I_w punktu ekstremalnego odpowiada określona wartość napięcia zapłonu [7].

4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH STARTU PIECA Z ROZCIĄGANYMI ŁUKAMI

Strukturę analizowanego pieca łukowego (AC-EAF) przedstawiono na rysunku 1. Przyjęto założenia podobne jak

w pracach [2, 3]. Wybrane parametry źródła, transformatorów, kabli i filtrów podano w opisach symboli graficznych. Parametry charakterystyki napięciowo-prądowej statycznej łuku mają wartości: $A = 20 \text{ V}$, $B = 6000 \text{ V/m}$, $P_M = 1 \cdot 10^3 \text{ W}$, $I_W = 50 \text{ A}$. Stała czasowa modelu dynamicznego wynosiła $\theta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$.

W pierwszej symulacji startu pieca długości łuków w fazach L2 i L3 były jednakowe i wynosiły $l = 0,08 \text{ m}$. Natomiast w fazie L1 następował zapłon łuku realizowany od stanu zwarcia. Następnie odbywało się rozciąganie kolumny z prędkością $0,5 \text{ m/s}$ aż do jego zgaszenia. Podczas tych zmian rejestrowano wartości chwilowe prądów i napięć trzech łuków, wartości skuteczne napięć i prądów po stronach wtórnych transformatorów piecowego i sieciowego oraz współczynniki asymetrii napięć po stronie pierwotnej transformatora sieciowego i po stronie wtórnej transformatora piecowego. Czas objęty symulacją wynosił ok. $0,4 \text{ s}$.

Jako wskaźników charakteryzujące asymetrię napięć fazowych użyto wielkości:

- wskaźnik składowej przeciwnej

$$k_{u2} = \frac{|U_2|}{|U_1|} \cdot 100\% \quad (7)$$

- wskaźnik składowej zerowej

$$k_{u0} = \frac{|U_0|}{|U_1|} \cdot 100\% \quad (8)$$

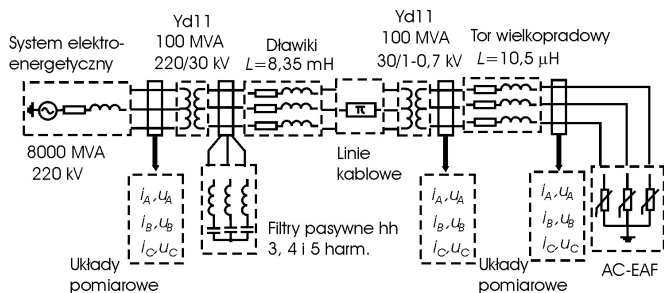
- wskaźnik sumaryczny asymetrii

$$k_u = \frac{|U_2 + U_0|}{|U_1|} \cdot 100\% \quad (9)$$

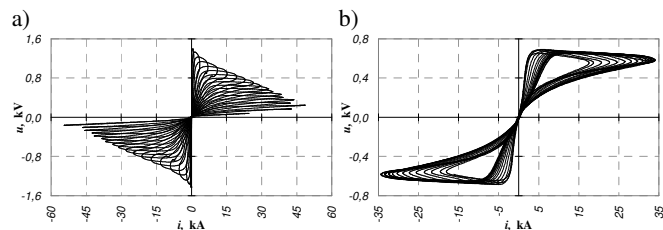
gdzie: U_0 – składowa kolejności zerowej napięcia,
 U_1 – składowa kolejności zgodnej napięcia,
 U_2 – składowa kolejności przeciwnej napięcia.

Podobne zależności obowiązują w przypadkach rozpatrywania prądów przewodowych. Pomimo wykonania obliczeń wszystkich wskaźników, ze względu na ograniczoną objętość artykułu, zaprezentowano wyłącznie wykresy wartości wskaźnika sumarycznego.

W drugiej symulacji procesu startu pieca długość łuku w fazie L3 była stała i wynosiła $l = 0,08 \text{ m}$. Natomiast w fazach L1 i L2 następowały zapłony łuków realizowane od stanu zwarcia. Następnie odbywało się rozciąganie łuków aż do ich zgaszenia. Podczas tych zmian rejestrowano wartości tych samych zmiennych, jak poprzednio.

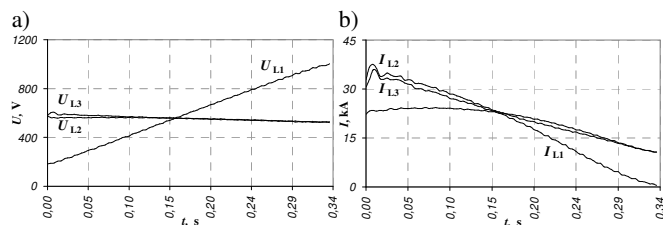


Rys. 1. Schemat zastępczy obwodów zasilania łuków w AC-EAF

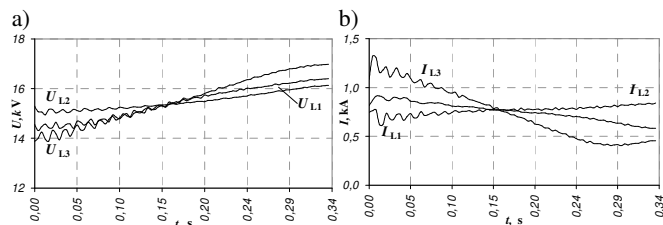


Rys. 2. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków w AC-EAF z zaburzeniami w jednej fazie L1:

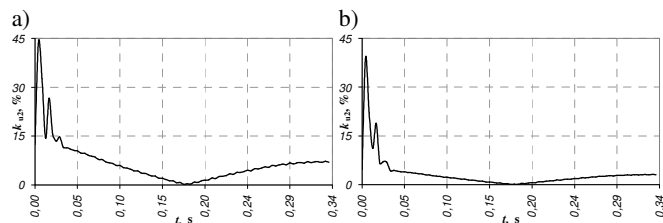
- a) charakterystyka łuku w fazie L1 z rozciągającym łukiem;
- b) charakterystyka łuku w fazie L3 ze stałą długością łuku



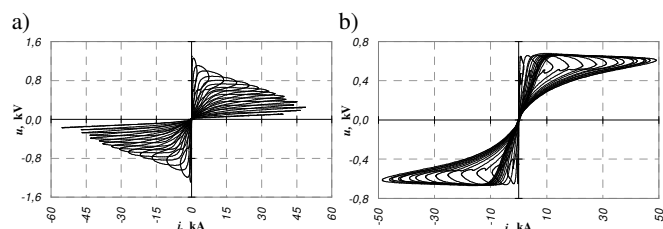
Rys. 3. Przebiegi wartości skutecznych poszczególnych wielkości fazowych po stronie wtórnej transformatora piecowego podczas rozciągania jednego łuku: a) napięcia, b) prądy



Rys. 4. Przebiegi wartości skutecznych poszczególnych wielkości fazowych po stronie wtórnej transformatora sieciowego podczas rozciągania jednego łuku: a) napięcia, b) prądy

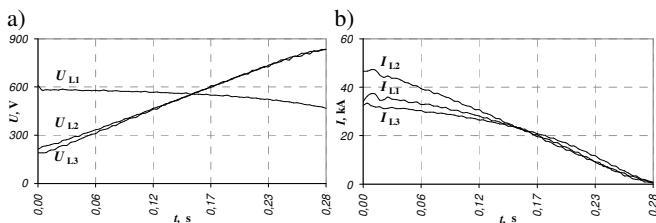


Rys. 5. Przebiegi wartości wskaźnika sumarycznego asymetrii podczas rozciągania jednego łuku: a) po stronie pierwotnej transformatora piecowego, b) po stronie wtórnej transformatora sieciowego

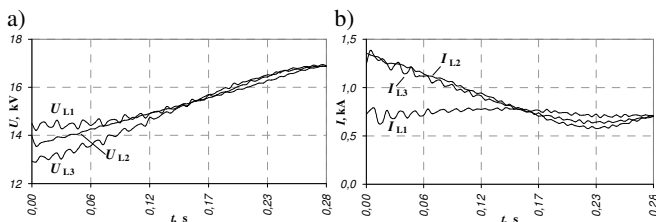


Rys. 6. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków w AC-EAF z zaburzeniami w fazach L1 i L2:

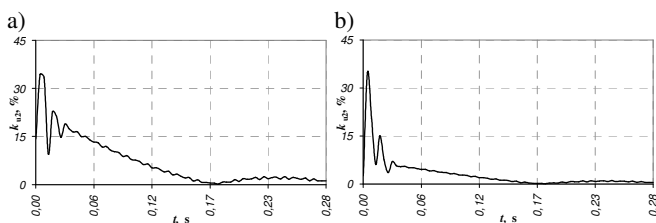
- a) charakterystyka łuku w fazie L1 z rozciągającym łukiem;
- b) charakterystyka łuku w fazie L3 ze stałą długością łuku



Rys. 7. Przebiegi wartości skutecznych poszczególnych wielkości fazowych po stronie wtórnej transformatora piecowego podczas rozciągania dwóch łuków: a) napięć, b) prądów



Rys. 8. Przebiegi wartości skutecznych poszczególnych wielkości fazowych po stronie wtórnej transformatora sieciowego podczas rozciągania dwóch łuków: a) napięć, b) prądów



Rys. 9. Przebiegi wartości wskaźnika sumarycznego asymetrii podczas rozciągania dwóch łuków: a) po stronie pierwotnej transformatora piecowego, b) po stronie wtórnej transformatora sieciowego

W wyniku przeprowadzonych symulacji zaobserwowano zniekształcenia dynamicznych pętli histerezy nie tylko w fazie z łukiem rozciągającym, ale także i w fazach sąsiednich. Ponadto charakter zmian wartości skutecznych prądów i napięć po stronie pierwotnej transformatora piecowego oraz po stronie wtórnej transformatora sieciowego były podobne. Nie stwierdzono występowania zjawisk rezonansowych prowadzących do powstawania znacznych przepięć. W stanach zwarcia i bliskich zwarciom wskaźniki asymetrii znacznie przewyższały wartości dopuszczalne 2-3%. Można zauważyć, że początkowo charakteryzowały się dużymi zmianami, by następnie niemal liniowo zmniejszać się do wartości zerowych w stanie symetrii. Rozciąganie łuków powyżej wartości długości łuków w sąsiednich fazach prowadziło do niewielkiego wzrostu wskaźnika asymetrii. Zgodnie z oczekiwaniami zwarcie i rozciąganie łuku w jednej fazie wywołuje większą asymetrię napięć niż w przypadku występowania takich procesów w dwóch fazach.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Wybór modelu Pentegowa łuku elektrycznego umożliwia stosunkowo łatwe utworzenie makromodelu pieca łukowego i przeprowadzenie symulacji procesów elektromagnetycznych w systemie zasilania, poczynając od stanów zwarcia aż do stanów jałowych.

2. Obecność elementów reaktancyjnych w obwodach zasilania pieca (transformatorów, dławików i filtrów biernych LC) nie jest w stanie ograniczyć asymetrii w sieci 30 kV podczas występowania zwarć jedno- i dwufazowych.

3. Pomimo dużych zmian parametrów obciążenia nie zaobserwowano występowania stanów rezonansowych w obwodach zasilania pieca.

4. Ponieważ stany zwarcia jedno- i dwufazowego są zwykle krótkotrwałe, to pomimo bardzo dużych wskaźników asymetrii efekty oddziaływania pieca na sieć zasilającą nie powinny być w istotnym stopniu uciążliwe. Tym bardziej, że wskaźniki te szybko maleją i stany asymetrii związane z nadmiernie rozciągniętymi łukami nie powinny być traktowane jako bardzo szkodliwe.

6. BIBLIOGRAFIA

- Jagięła K., Rak J., Gała M.: Asymetria napięciowo-prądowa w torze zasilania pieca łukowego AC, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, No. 2/2019 (1122), s. 123-129.
- Gała M., Sawicki A., Jagięła K.: Zagadnienia modelowania łuków elektrycznych pieców stalowniczych, *Śląskie Wiadomości Elektryczne* 2018, No. 6, s. 4-9.
- Gała M., Sawicki A., Jagięła K.: Modeling of asymmetrical operating states of AC-EAF furnaces in the power system XXIX Sympozjum Środowiskowe PTZE Zastosowania Elektromagnetyzmu we Współczesnej Inżynierii i Medycynie. Janów Podlaski 2019, 9-12 czerwiec 2019. (IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.23919/PTZE.2019.8781701)
- Kruczinin A.M., Sawicki A.: Piece i urządzenia łukowe. Seria Monografie nr 74, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
- King-Jet Tseng, Yaoming Wang D.: Mahinda Vilathgamuwa: An Experimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 429-436, 1997.
- Пентегов И.В.: Математическая модель столба динамической электрической дуги. *Автоматическая сварка*, (279), № 6, 1976, с. 8-12. (in Russian, Pentegov I.V.: Mathematical model of the column of electric dynamic arc. *Avtomatich. Svarka*, no. 6, 1976, pp. 8-12).
- Sawicki A.: Modelowanie wpływu zaburzeń zewnętrznych charakterystyk statycznych o nieokreślonym i określonym napięciu zapłonu na charakterystyki dynamiczne łuku w obwodzie ze źródłem prądu. Cz. 1. Podstawowe zależności analityczne. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 2019, nr 2, s. 46-51. (Modelling the Effect of External Disturbances in Static Characteristics of Unspecified and Determined Ignition Voltages on Dynamic Characteristics of Arc in a Circuit with the Current Source. Part. 1. Primary Analytical Correlations (DOI: 10.17729/ebis.2019.2/6)
- Grishkevich A.A., Hudym V.I., Kruczinin A.M., Sawicki A.: Zagadnienia energetyczne wybranych urządzeń elektrycznych systemów stalowniczych, Pod red. A. Sawickiego. Seria Monografie Nr 195, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010.
- Sawicki A., Haltof M.: Spectral and integral methods of determining parameters in selected electric arc models with a forced sinusoid current circuit. *Archives of*

IMPACT OF ARC INITIATION AND EXTINGUISHING PROCESSES IN AC ARC FURNACES ON ASYMMETRY STATES OF THE POWER SUPPLY SYSTEM

The article describes selected factors affecting changes in arc length occurring in AC arc furnaces. Particular attention was paid to the extension of the plasma column accompanying the processes of initiating and extinguishing the arc. For the simulation of the furnace work, mathematical Pentegov model of the arc was used with a given static voltage-current characteristic depending on the length of the column. A model of the AC arc furnace power supply system from the high voltage power network was developed. The research results obtained in the three-phase network asymmetry caused by short circuit and arc stretching in one phase, as well as arc stretching in two phases are presented. The determined values of asymmetry indices and RMS values of currents and voltages in selected system nodes were presented. A strong influence of short-circuit and arc stretching states, occurring in one and two phases, on the effective values of voltages and currents in the remaining phases and on voltage asymmetry on the primary side of the furnace transformer and on the secondary side of the network transformer was found.

Keywords: electric arc, Pentegov model, arc furnace, network asymmetry.