

Analiza wpływu stanu procesu elektrostalowniczego na charakterystyki obwodu elektroenergetycznego pieca łukowego AC

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki badań wpływu stanu procesu elektrostalowniczego na charakterystyki obwodu elektroenergetycznego pieca łukowego AC. Na potrzeby analizy zarejestrowane zostały przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów dla wszystkich etapów wytopu. Wyznaczone zostały współczynniki pozwalające na ocenę stanu wytopu oraz zidentyfikowane parametry modelu wyładowania łukowego.

Abstract. The article presents the results of research into the influence of the state of the electrosteel process on the characteristics of the power circuit of the AC arc furnace. For the purposes of the analysis, waveforms of instantaneous voltages and currents were recorded for all stages of melting. The coefficients allowing for the assessment of the state of melting were determined and the parameters of the arc discharge model were identified. (Analysis of the influence of the state of the electrosteel process on the power circuit characteristics of the ac arc furnace).

Słowa kluczowe: piec łukowy, tor elektryczny, charakterystyki.
Keywords: arc furnace, power circuit, characteristics.

Wprowadzenie

Stalownicze piece łukowe prądu przemiennego są urządzeniami służącymi do roztapiania wsadu w postaci złomu [1]. Należą do największych odbiorników energii podłączonych do systemu energetycznego [2]. W urządzeniach tych przetwornikiem energii elektrycznej na energię cieplną jest łuk elektryczny powstający pomiędzy grafitową elektrodą a wsadem. Charakterystyki prądowo-napięciowe łuku są nieliniowe i ulegają zmianom w trakcie trwania procesu technologicznego. Praca pieców łukowych jest bardzo niestabilna, szczególnie w początkowej fazie roztapiania wsadu [3, 4].

Sterowanie dostarczaniem energii do pieca łukowego odbywa się poprzez zmianę położenia elektrod oraz zmianę odczepów transformatora. W układach regulacji sygnał uchybu wyznaczany jest na podstawie zmierzonych wartości skutecznych lub średnich napięć i prądów łuków. Sygnały te wykorzystywane są również do monitorowania przebiegu procesu technologicznego. Do określenia stanu procesu, w szczególności pokrycia łuku żużłem spienionym, dodatkowo wykorzystuje się współczynniki zawartości harmonicznych (THD) [5, 6].

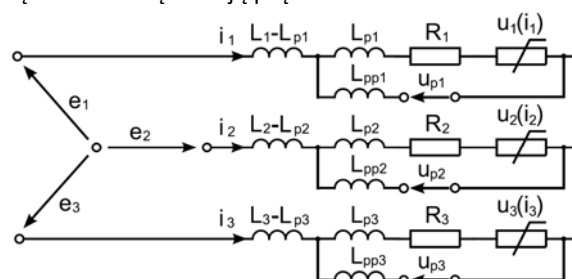
Zapewnienie stabilnej pracy pieca ma istotne znaczenie, nie tylko ze względów technologicznych oraz ekonomicznych, ale także ze względu na wpływ urządzenia na system energetyczny. W ramach badań analizowano wpływ stanu procesu na charakterystyki obwodu elektroenergetycznego i poszukiwano wielkości, które pozwalałyby zapewnić pełniejszą informację dotyczącą zmian stanu procesu i pokrycia łuku żużłem spienionym.

Tor elektryczny pieca łukowego

Tor elektryczny pieca łukowego składa się z transformatora piecowego, szynoprzewodów, przewodów giętkich oraz elektrod. Do celów analizy jego pracy konieczne jest przyjęcie pewnych uproszczeń. Rysunek 1 przedstawia schemat zastępczy toru, uwzględniający dodatkowo układy pomiaru napięcia łuków.

Na schemacie układ zasilania pieca łukowego sprowadzony został do trzech napięć zasilających e_1 , e_2 , e_3 , połączonych w gwiazdę. Transformatory wraz z liniami zasilającymi piec przedstawiono w postaci szeregowo połączonych rezystancji i reaktancji przeliczonych na stronę wtórną transformatora piecowego [3].

Na schemacie tym tor elektryczny pieca łukowego jest obwodem trójfazowym bez przewodu zerowego. W każdej z faz występują indukcyjności L_1 , L_2 , L_3 , na które składają się indukcyjności linii zasilających, transformatorów oraz toru wieloprzewodowego, zwłaszcza strony wtórnej transformatora, szynoprzewodów i przewodów giętkich. Rezystancje R_1 , R_2 , R_3 , związane są głównie z rezystancją elektrod, opornością przejścia w uchwycie elektrod oraz rezystancją wsadu. Obciążeniem w obwodzie są wyładowania łukowe u_1 , u_2 , u_3 będące nieliniową funkcją prądu.



Rys.1. Schemat systemu toru elektrycznego pieca łukowego wraz z układem pomiaru napięcia łuków

W celu określenia dokładnej wartości napięcia łuku niezbędna jest znajomość rezystancji fazowych R_k , indukcyjności pętli pomiaru napięcia łuku L_{pk} , indukcyjności wzajemnych M_k oraz pochodnych prądu di_k/dt . Parametry R_k i L_{pk} można określić w czasie zwarć dwufazowych [3].

Indukcyjności wzajemne M_k można wyznaczyć na podstawie różnic pomiędzy wyznaczonymi indukcyjnościami L_{pk} . Wartości pochodnych di_k/dt są znane w przypadku stosowania do pomiaru prądów fazowych cewek Rogowskiego [7]. Przy stosowaniu przekładników prądowych można je wyznaczyć z wykorzystaniem operacji różniczkowania numerycznego zmierzonych wartości prądów.

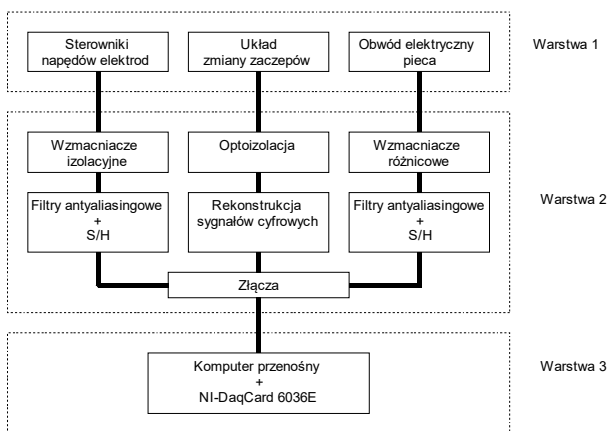
System pomiarowy

W systemach sterowania pieców łukowych nie są rejestrowane wartości chwilowe napięć i prądów, które są konieczne do wyznaczenia charakterystyk napięciowo-prądowych łuków. Na potrzeby badań zbudowany został system pomiarowy pozwalający na rejestrację tych

wartości [4]. Jego strukturę pokazano na rysunku 2. Składa się ona z kilku warstw realizujących różne zadania związane z akwizycją wymaganych wielkości. Pierwsza warstwa jest integralną częścią instalacji pieca. Zapewnia ona niezbędne sygnały wymagane przez układy sterowania i monitorowania. Składa się z przetworników pomiarowych oraz dzielników zapewniających wymagany zakres sygnałów wejściowych.

W warstwie tej wyróżnić można:

- układy pomiaru napięć fazowych mierzonych w pobliżu uchwytów elektrod, odpowiadających po kompensacji napięciom łuków,
- przekładniki napięcia po stronie pierwotnej transformatora piecowego, mierzące napięcie zasilania pieca,
- przekładniki prądowe po stronie pierwotnej transformatora piecowego,
- układy pomiaru prędkości ruchu elektrod, będące częścią sterownika układów napędowych,
- układy odczytu położenia przełącznika zacze- pów transformatora.



Rys.2. Schemat systemu pomiarowego

Badania przedstawione w pracy przeprowadzone były na piecu łukowym prądu przemiennego o masie wsadu wynoszącej 140 ton. Tor elektryczny pieca był torem triangulowanym o mocy transformatora piecowego wynoszącej 105 MVA i trzech elektrodach o średnicy 600 mm.

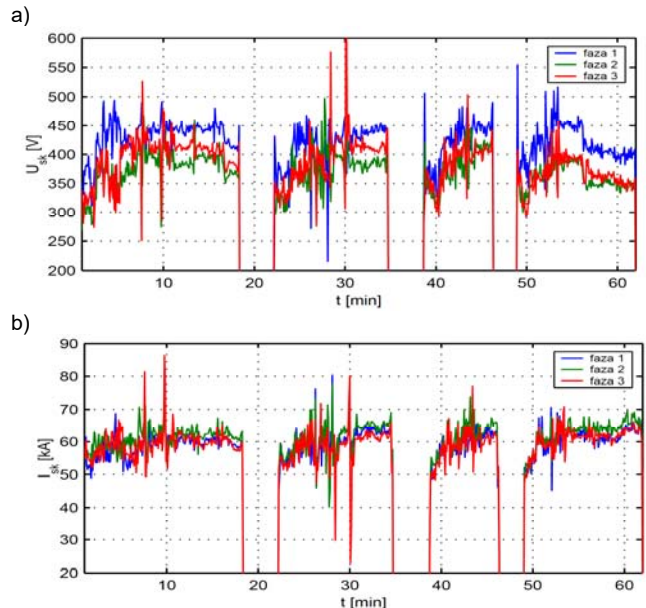
W czasie wykonywania pomiarów rejestrowano dziesięć sygnałów. Trzy sygnały napięć w pobliżu elektrod u_{pk} , trzy prądy fazowe i_k , trzy sygnały prędkości elektrod v_k i jedno napięcie zasilające u_z , mierzone po pierwotnej stronie transformatora piecowego. Dane były rejestrowane przez cały okres wytopu z częstotliwością 10 kHz dla każdego kanału.

Charakterystyki obwodu elektroenergetycznego

W ramach przeprowadzonych badań na podstawie zmierzonych napięć u_{pk} i zidentyfikowanych parametrów schematu zastępczego z rysunku 1, wyznaczone zostały napięcia łuków u_k .

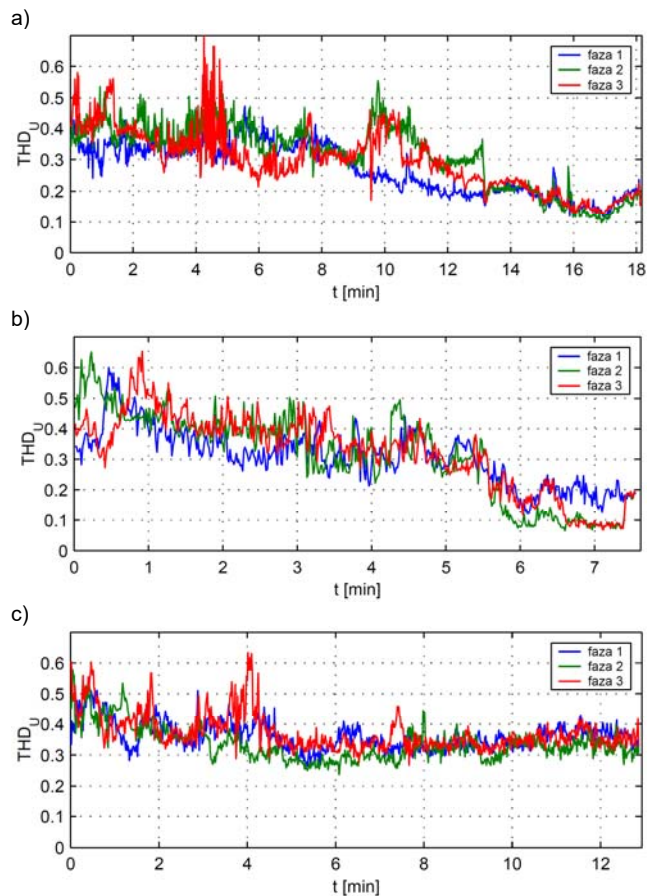
Ponieważ w praktyce obserwacja pracy pieca na podstawie wartości chwilowych nie jest realizowana, wyznaczone zostały wartości skuteczne napięć U_{sk} i prądów I_{sk} . Zmiany tych wartości w funkcji czasu t , dla całego wytopu, w którym piec ładowany jest czterema koszami, pokazane są na rysunku 3. Po załadowaniu każdego z koszy przebiegi tych wartości są mocno zakłócone. Widoczne są duże wahania wynikające ze zmian długości łuku i zwarć powodowanych przez osuwający się wsad. Po wytopieniu studni we wsadzie, kiedy łuk pali się pomiędzy

elektrodą a roztopionym jeziorkiem zmiany wartości skutecznych napięć i prądów są dużo mniejsze.

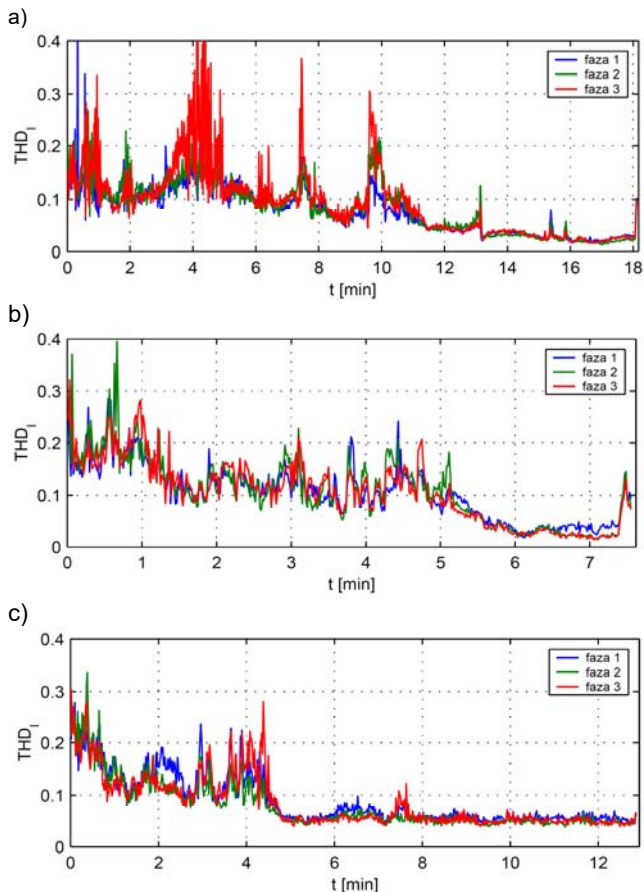


Rys.3. Wykresy dla całego wytopu a) wartości skutecznej napięcia łuku, b) wartości skutecznej prądu

Na rysunkach 4 i 5 przedstawione zostały wartości współczynników zawartości harmonicznych napięć łuków u_k oraz prądów i_k dla koszy 1, 3, 4. Dla kosza 2 charakterystyki nie są prezentowane, gdyż są zbliżone do uzyskanych dla kosza 1.



Rys.4. Wykres zmian współczynnika zawartości harmonicznych THD_U napięcia łuku dla a) kosza 1, b) kosza 3, c) kosza 4.



Rys.5. Wykres zmian współczynnika zawartości harmonicznych THD₁ prądu łuku dla a) kosza 1, b) kosza 3, c) kosza 4.

Wartości współczynników harmonicznych napięć THD_u w początkowym okresie roztapiania każdego z koszy mają duże wartości, co wynika z nieliniowej charakterystyki napięciowo-prądowej łuku palącego się w zimnym otoczeniu. Najniższe wartości przyjmują one pod koniec roztapiania 1-go i 3-go kosza, kiedy łuk otoczony jest żużłem spienionym. Na bazie tych przebiegów można oceniać stan pokrycia łuku żużłem spienionym.

Zawartość harmonicznych w prądzie jest niższa niż napięciu, jednak w fazie roztapiania prąd ulega szybkim zmianom, co wpływa na dość duże wahania współczynnika zawartości harmonicznych. Wynika to z zmian długości łuku, powodowanych przez osuwający się wsad i jego przemieszczanie. Pod koniec roztapiania wartości współczynnika THD₁ przestają się gwałtownie zmieniać.

Ocena stanu pokrycia łuku żużłem spienionym na bazie tych wartości jest trudniejsza. Wynika to z mniejszej ich różnicy dla łuku zakrytego żużłem, co obserwujemy pod koniec 3-go kosza, a łukiem odkrytym występującym pod koniec 4-go kosza.

W ramach prowadzonych badań podjęto się znalezienia współczynników, które bardziej jednoznacznie pozwalałyby określić stan pokrycia łuku żużłem spienionym. Zdecydowano się na wyznaczenie dla całego wytopu zmian parametrów modelu łuku opisanego zależnością (1) [3, 8].

$$u(t) = c \cdot |i(t)|^a d^b \text{sign}(i(t)) \quad (1)$$

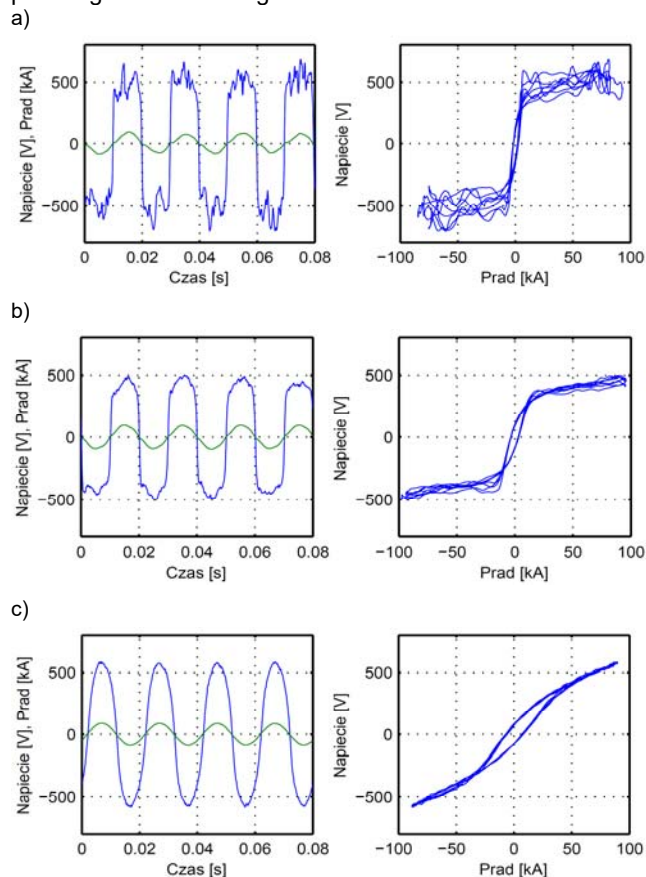
gdzie: d – długość łuku

a, b, c – parametry zależne od etapu wytopu.

W przedstawionym modelu szczególne znaczenie ma parametr a , gdyż związany jest z kształtem charakterystyki napięciowo-prądowej. Ponieważ charakterystyka ta ma różny kształt w zależności od etapu wytopu, można parametr ten wykorzystać do oceny stanu łuku.

Przykładowe przebiegi napięć i prądów oraz charakterystyki napięciowo-prądowe otrzymane dla różnych faz wytopu pokazane są na rysunku 6. Przedstawione przebiegi zarejestrowane były w stabilnych okresach pracy pieca w fazie roztapiania, po roztopieniu bez żużła spienionego oraz po roztopieniu z żużłem spienionym.

W fazie roztapiania przebiegi napięć są silnie zakłócone i mają kształt zbliżony do przebiegu prostokątnego. Jeżeli otoczenie łuku ma wysoką temperaturę i jest on otoczony żużłem spienionym kształt przebiegów napięć dąży do przebiegu sinusoidalnego.



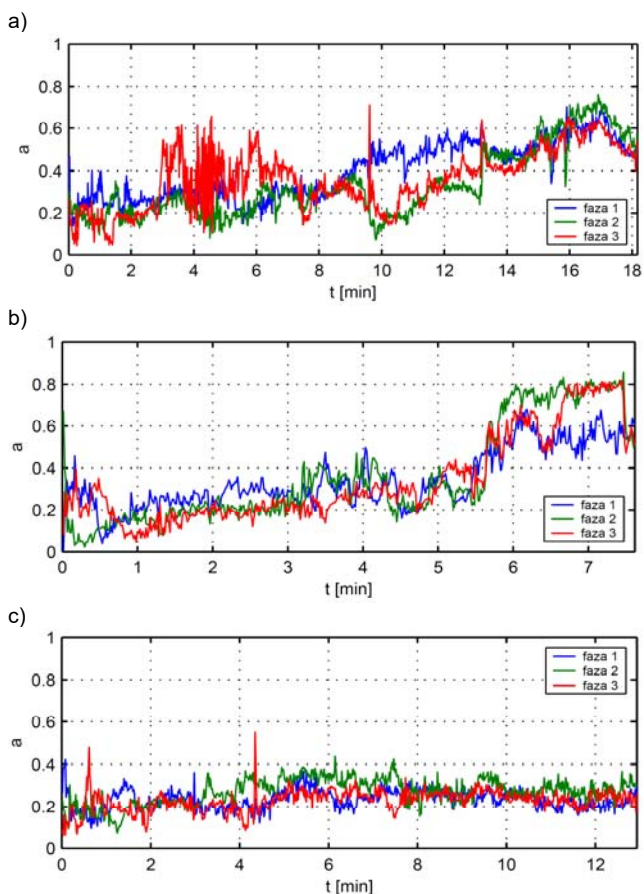
Rys.6. Charakterystyki napięciowo-prądowe łuku: a) w fazie roztapiania, b) po roztopieniu bez żużła spienionego, c) po roztopieniu z żużłem spienionym

W ramach badań dla całego przebiegu procesu dokonano identyfikacji parametru a modelu łuku [4]. Wyniki identyfikacji tego parametru dla koszy 1, 3 i 4 badanego wytopu, po uśrednieniu za okres 1 s, przedstawione są na rysunku 7. Na wykresach widać, że jego zmiany nie są w pełni skorelowane ze zmianami harmonicznych napięcia i prądu. Szczególnie jest to widoczne dla 4-go kosza. Parametr a ma wartość około 0,2 dla całego okresu roztapiania kosza, co świadczy o braku osłonięcia łuku żużłem spienionym. Pomimo zakłóceń widocznych na przebiegach zawartości harmonicznych, jego zmiany są stosunkowo niewielkie.

Porównując wykresy dla koszy 3 i 4 można zauważyć wpływ żużła spienionego na charakterystyki łuku. Pod koniec 3-go kosza łuk jest całkowicie osłonięty żużłem w otoczeniu elektrod w fazie 2 i 3, w związku z czym wykładnik łuku ma największą wartość wynoszącą ok. 0,8.

W fazie 1 pokrycie żużlem jest niepełne, w związku z tym parametr ten ma wartość około 0,6

Dla kosza 4-go, po roztopieniu wsadu, temperatura kąpieli stalowej jest zbliżona do temperatury panującej pod koniec roztopiania 3-go kosza. Widać jednak, że wartość parametru a nie zwiększa się, lecz praktycznie dla całego czasu roztopiania kosza pozostaje na stałym poziomie wynoszącym ok. 0,2. Związane jest to z brakiem żużla spienionego, gdyż w trakcie roztopiania 4-go kosza jest on zlewany z powierzchni kąpieli stalowej. W wyniku tego łuki nie są osłonięte i temperatura ich otoczenia jest zbliżona do temperatury kąpieli stalowej. Wartość ta jest także zbliżona do uzyskanej na początku roztopiania dla 1-go kosza, kiedy wsad ma niską temperaturę.



Rys.7. Wykres zmian parametru a , a) dla kosza 1, b) dla kosza 3, c) dla kosza 4

Na podstawie przedstawionych wykresów można zauważyć, że wartość parametru a w niewielkim stopniu jest funkcją temperatury kąpieli stalowej. Wartość tego parametru zmienia się istotnie, jeżeli wzrasta temperatura otoczenia łuku, co występuje kiedy jest on otoczony żużlem spienionym.

W związku z tym można stwierdzić, że obserwacja zmian wartości tego parametru pozwala na określenie stopnia osłonięcia łuku przez żużel.

Podsumowanie

W trakcie prowadzenia procesu technologicznego wytopu stali w piecu łukowym istotna jest możliwość obserwacji stanu łuku elektrycznego. Ma to szczególne znaczenie przy pracy z żużlem spienionym, gdyż pozwala na określenie stopnia pokrycia łuku. Do obserwacji można wykorzystać różne wielkości, takie jak wartości średnie, bądź skuteczne napięć i prądów, współczynniki zawartości harmonicznych. Jednak nie dają one prostej, jednoznacznej odpowiedzi.

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że obserwacja zmian wartości parametru a modelu łuku, pozwala na ocenę stanu otoczenia łuku. Z przebiegów wynika, że wartość tego parametru w niewielkim stopniu jest zależna od temperatury wsadu. Na jego wartość główny wpływ ma temperatura otoczenia łuku. W związku z tym nadaje się on do określania stopnia osłonięcia łuku przez żużel spieniony.

Wykorzystanie parametru a modelu łuku w istniejących systemach sterowania pieców łukowych wymaga modyfikacji w układzie pomiarowym, polegających na dodaniu rejestracji wartości chwilowych napięć i prądów. Niezbędne jest także opracowanie oprogramowania pozwalającego na identyfikację parametrów układu pomiarowego, celem wyznaczenia napięcia łuków oraz identyfikację wartości parametru a .

Autorzy: dr inż. Robert Kazala, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: rkazala@tu.kielce.pl; prof. dr hab. inż. Mirosław Wcislik, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: wcislik@tu.kielce.pl.

LITERATURA

- [1] Berger R., The future of steelmaking – How the European steel industry can achieve carbon neutrality, *Focus.*, 05 (2020), Roland Berger GmbH
- [2] Łukasik, Z., Olczykowski, Z. Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems, *Energies* 13(2020), 1462, <https://doi.org/10.3390/en13061462>
- [3] Wcislik M., Metoda estymacji parametrów toru elektrycznego urządzenia łukowego dla potrzeb sterowania procesem elektrostalowniczym, *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej E 28(1992)*, Kielce.
- [4] Kazala R., Analiza układu regulacji położenia elektrod pieca łukowego z uwzględnieniem sprzężeń międzyfazowych obwodu elektroenergetycznego, *Praca doktorska (2007)*, Politechnika Świętokrzyska
- [5] Berger R., Tools for foaming slag operation at EAF steelmaking, *Archives of Metallurgy and Materials*, 53(2008), 405-409
- [6] Gerhan R. E., Lugo N., Kurela T. J., Method for controlling foaming of slag in an electric arc furnace, patent US20070133651A1, (2007)
- [7] Dmochowski Z., Kierus K., Problematyka pomiarów wielkości fizycznych pieców łukowych w polskich hutach i odlewniach, *Przegląd Elektrotechniczny*, 4(1987)
- [8] Lowke J.J., A simple theory of free burning arc, XIII ICPIG, 0466, Berlin (1977), 519-520