

doi:10.15199/48.2023.12.09

## Parametry i charakterystyki układu elektrycznego trójfazowego stalowniczego pieca łukowego

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono ewolucję procesów stalowniczych, zwłaszcza elektrostalowniczego. Omówiono obwód elektroenergetyczny stalowniczego topielnego pieca łukowego. Przedstawiono podstawy formalne wyznaczania parametrów schematu zastępczego tego obwodu oraz obwodu pomiaru napięć. Zaprezentowano zasady wyznaczania napięć łuków elektrycznych oraz charakterystyk wyładowań łukowych. Zamieszczono przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe łuku elektrycznego obserwowane na stalowniczym piecu łukowym.

**Abstract.** The paper deals with the evolution of steelmaking processes, especially the electrowinning process. The electrical power circuit of a steelmaking arc furnace melting furnace is discussed. The formal basis for the determination of the parameters of the equivalent circuit diagram of this circuit and the voltage measurement circuit is presented. The principles of determining arc voltages and arc discharge characteristics are presented. Examples of arc current-voltage characteristics observed on a steel arc furnace are included.. (**Parameters and characteristics of the electrical system of a three-phase steelmaking arc furnace.**)

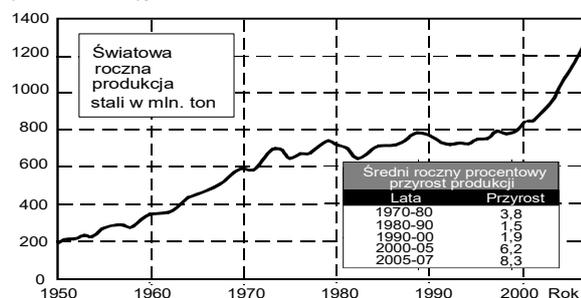
**Słowa kluczowe:** Piec łukowy, tor elektryczny, obwód elektroenergetyczny, łuk elektryczny, pomiar napięcia łuku, parametry.

**Keywords:** Electric arc furnace, power circuit, electric arc, arc voltage measurement.

### Wstęp

Era żelaza trwa od ok. 700 roku p.n.e. [1]. Ilość produkowanej stali jest wciąż wykładnią rozwoju gospodarki i znaczenia gospodarczego kraju. Przemysłowa produkcja stali rozpoczęła się znacznie później, bo dopiero ok. 1740 roku, kiedy to zastosowano wyrabianie w tyglu, stąd proces produkcyjny nazwano tyglowym. Proces tyglowy zastąpiono kolejno procesem Bessemera, Siemens-Martina, tlenowozasadowym (BOF) i ostatecznie elektrycznym, łukowym. Na ogół zastępowanie starej technologii przez nową przynosi niższe ceny i lepszą jakość stali.

Jak przedstawiono na rysunku 1 światowa produkcja i zużycie stali ciągle wzrasta.



Rys. 1. Światowa produkcja stali w mln ton od 1950 roku [2]

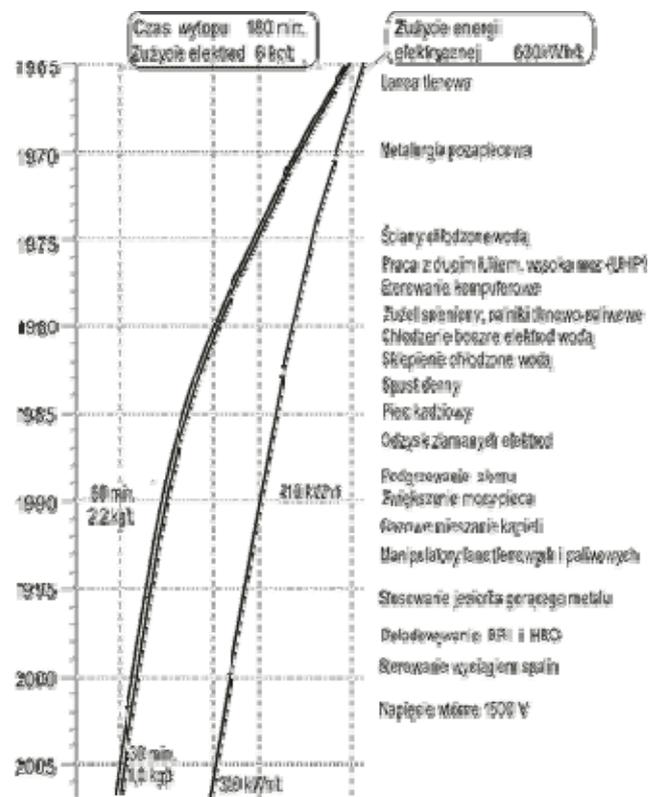
Należy zauważyć, że od 2000 roku nastąpiła intensyfikacja tego wzrostu.

Proces elektryczny jest realizowany w piecach łukowych. Przy sprawności wytwarzania energii elektrycznej wynoszącej 35% oraz uwzględniając energochłonność wytwarzania surowki, stalowniczy proces łukowy jest 2-3 krotnie efektywniejszy energetycznie niż proces BOF. Według IISI [3] użycie 1 Mg złomu daje oszczędność 1000-2000 kWh/(Mg stali). Dlatego stal jest traktowana jako materiał ekologiczny. Jednakże tylko 30% produkowanej stali jest wytwarzana ze złomu, reszta 70% produkcji jest wytwarzana z rudy poprzez redukcję węglem tleny.

W stalownictwie piece łukowe wykorzystuje się wprawdzie od ok. 1900 roku, ale wykorzystanie tej technologia jest zauważalne dopiero po II Wojnie Światowej. Pojemność pieców stalowniczych wzrastała aż do 300 Mg. Okazało się, że najefektywniejsze są piece o pojemności ok. 100 Mg, pracujące w instalacjach mini-hut i piece takiej pojemności, zasilane z trójfazowej sieci AC są obecnie najczęściej spotykane.

### Ewolucja instalacji pieca łukowego i stalowniczego procesu elektrycznego

Piec łukowy jest reaktorem wsadowym. W przestrzeni pieca realizowana jest sekwencja wielu procesów składowych wynikających z zasad fizyki i chemii procesu technologicznego stali. Wysoką efektywność energetyczną prowadzenia wytopu uzyskano poprzez stosowanie pewnych rozwiązań technicznych i w wyniku ewolucyjnej optymalizacji procesu elektrostalowniczego. W wyniku tej optymalizacji ponad dwukrotnie zmniejszyło się zużycie energii, natomiast czas wytopu i zużycie elektrod zmniejszyły się sześciokrotnie [4, 5] – rysunek 2.



Rys.2 Ewolucja wskaźników eksploatacyjnych pieców łukowych w latach 1965-2007

Rzeczywisty rozwój technologii elektrostalowniczej związany jest ze zmianami toru elektrycznego pieca łukowego. W celu skrócenia czasu wytopu zaczęto stosować coraz większe moce na jednostkę pojemności pieca oraz coraz większe natężenia prądów, a także coraz wyższe napięcie zasilania pieca. Dla poprawy stabilności łuków wprowadzono dodatkowe reaktancje szeregowe w obwodzie pieca. Wraz ze wzrostem mocy pieca wzrosło znaczenie oddziaływań między systemem energetycznym a piecem łukowym – migotanie napięcia.

Przez zastosowanie metalurgii kadziowej, procesy wyrobienia, rafinacji przeniesiono do pieców kadziowych, w wyniku obniżyła się średnia temperatura wnętrza pieca łukowego, co spowodowało zmniejszenie strat cieplnych. Taki też wpływ miało zastosowanie żużla spienionego.

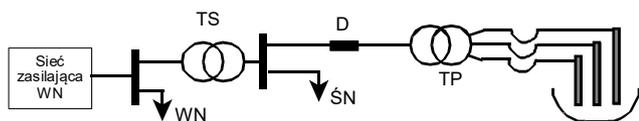
Na zmniejszenie zużycia elektrod wpłynęły: zastosowanie chłodzenia bocznej powierzchni elektrod wodą, odzyskiwanie złamanych elektrod oraz poprawa stabilności pracy obwodu pieca łukowego.

Wszystkie rozwiązania techniczne prezentowane na rysunku 3 do ok. 2000 roku tworzą etap rozwoju procesu elektrostalowniczego "uczenia się tworząc" (ang. „doing by learning”) [6]. Rozwiązania te wymagały współpracy specjalistów z wielu dziedzin takich jak metalurgia, elektrotermia, automatyka, energetyka.

Należy podkreślić, że stabilność prowadzenia i efektywność tego procesu zależą od stabilnej pracy obwodu elektrycznego pieca łukowego.

### Modelowanie toru elektrycznego pieca łukowego

Piece łukowe o mocy pozornej większej niż 50 MVA zasilane są z sieci wysokiego napięcia poprzez dwa stopnie transformatorów: sieciowego – napięcie wysokie / średnie i piecowego - napięcie średnie / niskie. Według [7] do zasilania pieca łukowego zalecane jest po stronie niskiej napięcie międzyprzewodowe nawet do 1500 V AC. W celu ograniczenia prądu zwarcia w czasie inicjacji łuku stosowane są dławiki (reaktory) powietrzne umieszczone w każdej z faz obwodu po stronie napięć średnich. Schemat toru elektrycznego zasilania pieca łukowego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat toru elektrycznego pieca łukowego

Prądy łuku mierzone są po stronie pierwotnej transformatora piecowego za pomocą przekładników prądowych. Zazwyczaj stosowane są dwuwarstwowe układy przekładników prądowych o połączeniu odpowiadającym konfiguracji uzwojeń transformatora piecowego - Y/D lub D/D.

Napięcia są mierzone po stronie pierwotnej i po stronie wtórnej transformatora piecowego. W obu przypadkach mierzone napięcia nie są napięciami łuków elektrycznych. Uzwojenia pierwotne i wtórne transformatora piecowego są elektrycznie odizolowane. Stąd pomiary napięć po stronie pierwotnej nie reprezentują napięć fazowych w obwodzie wysokoprądowym.

Na parametry toru wieloprądowego składają się parametry zastępcze: systemu zasilania z transformatorem sieciowym, dławika (zainstalowanego po stronie napięć średnich), transformatora piecowego oraz toru wieloprądowego. Wszystkie indukcyjności i rezystancje z obwodów napięć średnich i wysokich przenoszone są na stronę wtórną, wieloprądową transformatora piecowego.

Elementy systemu zasilania mają bardzo wysoką sprawność energetyczną, sięgającą 98-99% i moc zwarcia ma w dominującym stopniu charakter indukcyjny [8]. Oznacza to, że schematy zastępcze elementów zawierają głównie reaktancję indukcyjną. Zakłada się, że reaktancje transformatorów i dławika są jednakowe we wszystkich fazach. Wyznaczane są one na podstawie danych producenta i wartości napięć z następujących zależności [9]:

$$(1) \quad \omega L_{dw} = \omega L_{dp} \cdot \left( \frac{U_{tw}}{U_{tp}} \right)^2, \quad \omega L_{tw} = X_t \cdot \frac{(U_{tw})^2}{S_t}$$

gdzie:

$\omega L_{dp}$ ,  $\omega L_{dw}$  - reaktancja dławika po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora piecowego,

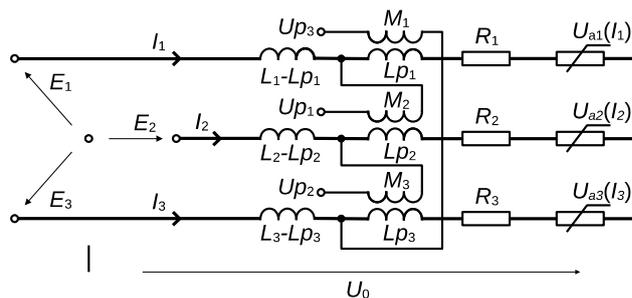
$U_{tp}$ ,  $U_{tw}$  - napięcie po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora piecowego,

$\omega L_{tw}$  - reaktancja transformatora przeniesiona na stronę wtórną transformatora,

$X_t$  - reaktancja względna transformatora dla danego odczepu,

$S_t$  - moc pozorna transformatora piecowego dla danego odczepu.

Uwzględniając wysoką sprawność transformatorów i dławików można pominąć ich rezystancje i uwzględnić tylko indukcyjności. Przenosząc wszystkie reaktancje i źródła zasilania na stronę wtórną transformatora piecowego można otrzymać schemat zastępczy obwodu wieloprądowego – rysunek 4.



Rys. 4. Schemat zastępczy obwodu pieca łukowego i układu pomiaru napięć łuków.

Pozostałe części indukcyjności wynikają z konfiguracji przestrzennej przewodów toru wieloprądowego, elektrod oraz ze sprzężenia indukcyjnościowego między obwodami wysokoprądowymi. Rezystancje obwodu wynikają głównie z rezystancji elektrod. Punkt połączenia obwodów faz stanowi wsad pieca. Uzwojenia wtórne transformatora piecowego połączone są w trójkąt. Dlatego przedstawione napięcia zasilania połączone w gwiazdę są napięciami zastępczymi, równoważnymi i punkty środkowe gwiazdy napięć systemu zasilania oraz odbiorników są izolowane, niepołączone. Obwód wieloprądowy wytwarza silne pole magnetyczne zakłócające pomiary napięć po stronie wtórnej transformatora. Mierzone napięcia są więc sumą napięć łukowych, spadków napięć na rezystancjach i reaktancjach własnych oraz napięć indukowanych w indukcyjnościach wzajemnych obwodu pomiarowego i toru wieloprądowego.

W  $k$ -tej fazie obwodu ( $k=1,2,3$ ) oznaczono: chwilowe wartości napięć prądu i łuku -  $I_{k(t)}$ ,  $U_{k(t)}$ , amplitudę napięcia zasilającego daną fazę obwodu -  $E_k$ , równoważne rezystancje i indukcyjności fazowe -  $R_k$ ,  $L_k$  a napięcie między punktami połączenia gwiazdy obciążen fazowych i gwiazdy napięć zasilania -  $U_{o(t)}$ . Przy takich oznaczeniach równania faz obwodu wysokoprądowego są następujące:

$$(2) \quad L_k \frac{dI_{k(t)}}{dt} + R_k \cdot I_{k(t)} + U_{ak}(I_{k(t)}) + U_{o(t)} = E_k \cdot \sin(\omega t - (k-1) \cdot 2\pi/3), \quad k = 1, 2, 3$$

$$(3) \quad I_{1(t)} + I_{2(t)} + I_{3(t)} = 0$$

Na podstawie badań łuku z katodą grafitową [10] oraz teoretycznie otrzymanego modelu [11], napięcie łuku można opisać następująco:

$$(4) \quad U_{ak(t)} = H_k \cdot |I_{k(t)}|^a \cdot \text{sign}(I_{k(t)})$$

Gdy  $a=1$  parametr  $H$ , jest zależny od długości łuku i może być interpretowany jako rezystancja łuku, dla  $a=0$  napięcie łuku jest falą prostokątną a  $H$  jest amplitudą łuku. Podczas roztopiania złomu obserwowano wzrost  $a$  od około 0 do około 0,2. Podczas rafinacji wartość  $a$  wynosiła około 0,5. Ogólnie napięcie łuku można przedstawić jako proporcjonalne do funkcji prądu, która jest nieparzysta i monotoniczna

Obwód pieca jest symetryczny, gdy indukcyjności, rezystancje, amplitudy zasilania oraz parametry  $H$  w poszczególnych fazach obwodu są jednakowe. W takim przypadku napięcie  $U_{o(t)}$  wynosi:

$$(4) \quad U_{o(t)} = -\frac{1}{3}(U_{a1(t)} + U_{a2(t)} + U_{a3(t)})$$

Napięcie to jest równe zero dla układu liniowego ( $a=1$ ). Dla  $a=0$  napięcie  $U_{o(t)}$  jest falą prostokątną o amplitudzie równej jednej trzeciej amplitudy napięcia łuku i o częstotliwości równej trzykrotnej częstotliwości napięcia zasilania. Napięcie to powoduje, że w prądach fazowych obwodu nie występują harmoniczne o częstotliwościach będących trzykrotnością napięcia zasilania.

Napięcia łuku nie są mierzone bezpośrednio, można je określić poprzez kompensację spadków napięć dodatkowych indukowanych w pętli pomiarowej oraz spadku napięcia na rezystancji. Taka metoda określania napięć łuków była proponowana przez prof. Bretthauera w [12]. Napięcia te można wyznaczyć stosując filtr Golaya-Sawitzkiego do wyznaczenia pochodnych prądów i wykorzystując następujące równanie:

$$(5) \quad U_{ak(t)} = U_{pk(t)} - R_k \cdot I_{k(t)} - L_{pk} \frac{dI_{k(t)}}{dt} - M_j \frac{dI_{j(t)}}{dt}$$

dla  $k = 1, 2, 3; j = (k+1) \bmod 3$

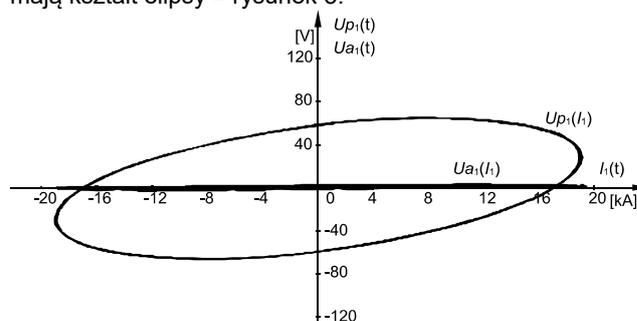
Biorąc pod uwagę modele równań obwodu elektroenergetycznego i układu pomiaru napięć dla opisanego tych obwodów wymagane jest 15 parametrów, przy czym 6 parametrów jest zależne od zaczepu transformatora. W większości nie są one mierzalne w trakcie realizacji procesu wytopu. Konieczne jest wykorzystywanie innych stanów instalacji pieca łukowego takich jak:

- bezpądowy
  - (dwie elektrody podniesione, jedna elektroda dotyka wsadu)
    - pomiar napięć przewodowych zasilania,
- zwarcia dwufazowe (3x)
  - (dwie elektrody zanurzone w metalu, jedna podniesiona)
    - pomiar parametrów obwodu wielkopądowego i parametrów układu pomiaru napięć,
- zwarcie trójfazowe
  - (trzy elektrody zanurzone w metalu)
    - sprawdzenie parametrów obwodu wielkopądowego i parametrów układu pomiaru napięć.

Problemy pomiarów parametrów przedstawiono szerzej w [13] wraz z wynikami pomiarów parametrów obwodu elektrycznego pieca o pojemności 12 Mg. Różnice między wartościami prądów zwarcia trójfazowego mierzonymi i obliczonymi na podstawie zwarć dwufazowych były mniejsze od 1% wartości mierzonych.

## Charakterystyki łuku elektrycznego pieca łukowego 12 Mg

W schemacie na rysunku 4 wyróżnić można schemat trójfazowego obwodu wielkopądowego i schematy obwodów pomiaru napięć. Należy podkreślić, że napięcia te nie są napięciami łuków. Napięcia łuku można wyznaczyć z (5) na podstawie zmierzonych napięć i prądów fazowych. Ale w tym celu potrzebne są parametry elementów obwodu pomiarowego, które można określić pomiarowo, na podstawie zwarć dwufazowych. W rezultacie można sprawdzić jak dokładne były te zwarcia, obserwując charakterystyki prądowo napięciowe. W przypadku elektrody zanurzonej w płynnym metalu charakterystyki mają kształt elipsy – rysunek 5.

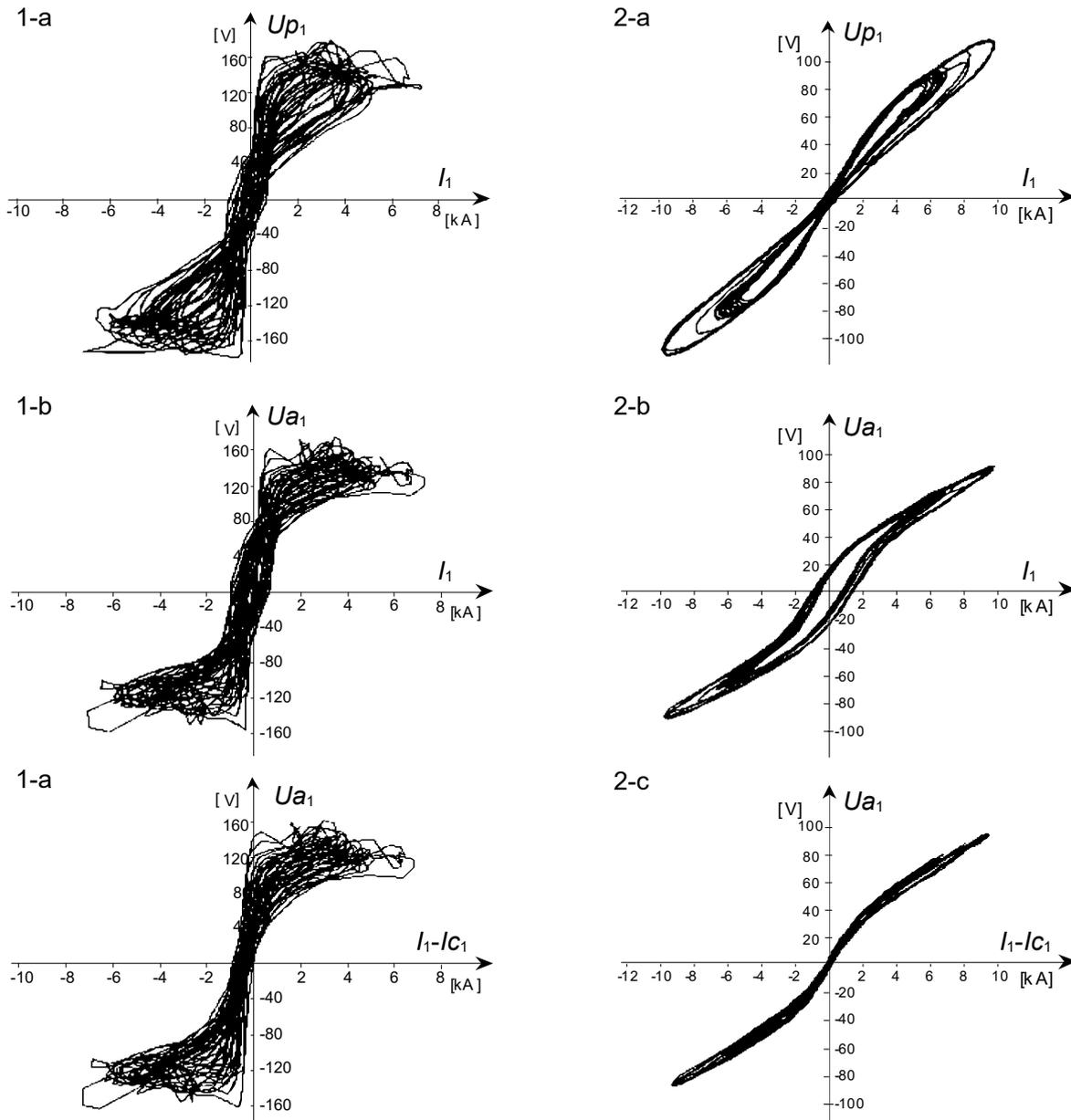


Rys.5. Charakterystyki prądowo-napięciowe układu pomiaru napięcia w stanie zwarcia elektroda-wsad pieca 12 Mg przed –  $U_{pk(t)}$  i po kompensacji –  $U_{ak(t)}$  [13]

Dla „niepełnego” zwarcia obserwuje się odchylenia od tego kształtu w postaci zwiększonego nachylenia przy przecięciu osi odciętych. Po zastosowaniu kompensacji parametrów obwodu pomiarowego, charakterystyki obserwowane są jako linie leżące w pobliżu osi prądów [13], z dokładnością ok. 3% w odniesieniu do zakresu pomiarów.

Charakterystyki prądowo-napięciowe wyładowań łukowych dla dwu etapów wytopu stali (roztopiania i wyrabiania) w piecu łukowym 12 Mg, zaprezentowano na rysunku 6 odpowiednio w dwu kolumnach. Charakterystyki bezpośrednio obserwowane oznaczono jako 1-a i 2-a.

Charakterystyki obserwowane w trakcie wyrabiania są mniej stabilne (bardziej zmienne) niż krzywe obserwowane w czasie wyrabiania. Zachowanie się łuków elektrycznych związane jest z temperaturą otoczenia i właściwościami, temperaturą wsadu, który stanowi drugą z elektrod wyładowania łukowego. Kompensując dodatkowe spadki napięcia otrzymuje się charakterystyki, które przedstawiono odpowiednio jako 1-b i 2-b. Dla dużych wartości prądu w obu przypadkach charakterystyki stają się bardziej jednoznaczne, ale istotne zjawisko występuje dla małych wartości napięć, przy zmianie polaryzacji. W [12] kompensację wpływu obwodu pomiarowego prowadzono zakładając, że dla prądu równego zero napięcie łuku jest również równe zero. Ale z pomiarów prezentowanych na rysunkach 1-b i 2-b wynika, że takie zjawisko nie występuje. Analizując zjawiska obserwowane na obiektach rzeczywistych można zauważyć, że dejonizacja plazmy łuku w otoczeniu o temperaturze kilkudziesięciu stopni trwa tylko 30  $\mu$ sek. Oznacza to, że przy przerwach w przepływie prądu dłuższych niż 0,2% okresu napięcia zasilania, łuk gaśnie. Zjawisko to nie występuje, gdy nastąpi zwarcie elektrody i wsadu, wydzielona energia w rezystancji styku podgrzewa lokalnie elektrodę i wsad. Powstaje plazma jako medium zachowywanej energii, zwłaszcza że przy przepływie prądu występuje skurcz plazmy (ang. pinch-effect).



Rys.6. Charakterystyki prądowo-napięciowe łuku w fazie 1 w piecu 12 Mg: 1 - w trakcie roztopiania; 2 - w trakcie wyrabiania;  
a) obserwowane bezpośrednio, b) po kompensacji wpływu parametrów obwodu pomiarowego,  
c) po kompensacji jak w b) i odjęciu prądu pojemnościowego

Gdy jako element zachowujący energię przyjmie się kondensator, przyłączony równolegle do obciążenia nieliniowego, można wyznaczyć pojemność tego kondensatora. Po odjęciu prądu tego kondensatora otrzymuje się charakterystyki obciążenia nieliniowego przedstawione na rysunku 1-c i 2-c. Pojemność wyznaczona dla tych charakterystyk wynosiła odpowiednio 4 mF i 21 mF. Należy dodać, że gdy łuki zgasną w trakcie roztopiania, powtarzany jest proces zapalania łuków. W trakcie wyrabiania wystarcza, że elektrody przybliżane są do płynnego wsadu. Aby w tym stanie przerwać przepływ prądu elektrody muszą być podniesione dość wysoko.

Na podstawie powyższych danych w [13] zaproponowano model

$$(6) \quad C_a \cdot \frac{dU(t)}{dt} + H_t \cdot |U(t)|^{1/a} \cdot \text{sign}(U(t)) = I(t)$$

Model ten jest układem dynamicznym nieliniowym, nawiązującym do modelu (4). Spotykane modele eksperymentalne [10] i [11] uzyskano dla zasilania tylko napięciem o jednej polaryzacji. Z kolei charakterystyki prądowo-napięciowe najstarszych modeli łuku (Cassiego i Mayra) przechodzą przez środek współrzędnych i nie ujmują zjawiska „omijania zera” przez te charakterystyki. Zjawisko to zaś było obserwowane na charakterystykach łuków w piecach łukowych oraz na charakterystykach prądowo-napięciowych wyładowania łukowego w kinowej lampie łukowej.

Unowocześnioną wersję systemu pomiarowego parametrów toru elektrycznego pieca łukowego przedstawiono w [14].

#### Podsumowanie

Układ elektroenergetyczny pieca łukowego prądu przemiennego należy rozpatrywać jako element instalacji

urządzenia łukowego do produkcji stali. W trakcie procesu stalowniczego zmieniają się warunki otoczenia wyładowań łukowych. Wraz ze wzrostem temperatury otoczenia charakterystyki wyładowań łukowych stają się stabilniejsze i bardziej liniowe. Granicznymi są charakterystyki prądowo-napięciowe: nieliniowa - opisana funkcją signum, występująca w trakcie roztopienia oraz liniowa w czasie wyrabiania. Kombinacja tych charakterystyk może być wykorzystywana w etapach pośrednich wytopu.

Należy pokreślić, że w piecu łukowym napięcia łuków nie są bezpośrednio obserwowalne. Wtedy napięcie łuku można wyznaczać z (5) stosując wcześniej wyznaczone parametry układu pomiaru napięć po stronie wtórnej transformatora piecowego. Według normy IEC 60676:2011 parametry obwodu wyznaczone są wykorzystując pomiary prądów, napięć i mocy czynnych po stronie pierwotnej transformatora piecowego w czasie zwarć dwu- i trójfazowych obwodu wielkopiętowego.

Analizując obwód wielkopiętowy pieca łukowego należy pamiętać, że jest to obwód bez przewodu zerowego i w związku z tym między punktami połączeń odbiorników fazowych oraz środkiem gwiazdy napięć może wystąpić różnica potencjałów.

Proponowany model prądowo-napięciowy łuku elektrycznego wyróżnia się tym, że zawiera równoległe przyłączoną pojemność, której wartość wzrasta wraz z temperaturą wsadu i wnętrza pieca. Ta pojemność reprezentuje istotną cechę łuków elektrycznych prądu przemiennego – akumulację energii w postaci plazmy, która zapewnia istnienie łuku po zmianie polaryzacji napięcia zasilania. Aby łuk zaistniał na początku procesu wytopu musi być „zapalony” poprzez przepływ prądu na styku elektroda-wsad. Gdy elektroda jest podnoszona – wytwarzana jest plazma.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Mirosław Wciślik, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: m.wcislik@tu.kielce.pl; dr inż. Robert Kazała, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Elektrotechniki i Automatyki Przemysłowej, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: r.kazala@tu.kielce.pl

#### LITERATURA

- [1] Pater Z.: Podstawy metalurgii i odlewnictwa, *Podręcznik, Politechnika Lubelska*, Lublin 2014.
- [2] World Steel in Figures, *IISI 2008*, ISSN 1379-9746.
- [3] Electric Arc Furnace – 1990, *IISI report*, Brussels 1991.
- [4] Kirchen M., Pfeifer H., Wahlers F.: Mass and energy balances of stainless steel EAF, *Proc. of 7-th Euro. Electric Steelmaking Conf.*, Venice, 26-29 May 2002, vol.2, pp. 2.3-2.12.
- [5] Wciślik M., Wtorek T.: Ewolucja procesu staowniczego w Hucie zawiercie, *Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej*, T.3-Z.2.1997, str. 71-76.
- [6] Grubler A., Nakicenovic N., Victor D.G.: Dynamics of energy technologies and global change, *Energy Policy* 27, 1999, pp.247-280.
- [7] PN EN 60519-4: Bezpieczeństwo urządzeń elektrotermicznych, Część 4: Wymagania szczegółowe dla pieców łukowych, A1:2000.
- [8] Kolcun M., Chladny V., Varga L., Beňa L., Ilenin S., Leščinský P., Mešter M.: Analiza elektrizačnej sústavy, *Technická Univerzita Košice 2005*, ISBN 80-89057-09-8.
- [9] EN60676: Test methods for furnaces with direct arc furnaces, *IEC*, A1:2000.
- [10] Strachan D.C.: High-current, steel-cathode, free-burning arcs, *J.Phys.D, Appl. Phys.* Vol. 10, 1977, pp. 361-370.
- [11] Lowke J.J.: A simple theory of free burning arc, *XIII ICPIG*, 0466, Berlin 1977, pp. 519-520.
- [12] Bretthauer K.: Optimierung von Lichtbogenöfen zur Stahlerzeugung, *Elektrowärme International*, 34(1976), B1, B21-25.
- [13] Wciślik M.: Metoda estymacji parametrów toru elektrycznego urządzenia łukowego dla potrzeb sterowania procesem elektrostalowniczym, *Z.N. Politechniki Świętokrzyskiej, Elektryka* 28, Kielce 1992.
- [14] Kazała R., Wciślik M.: System pomiarowy do monitorowania i wyznaczania parametrów toru elektrycznego pieca łukowego, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 11/2005, str. 54-57