

## EKSPERYMENTALNY POMIAR PARAMETRÓW I CHARAKTERYSTYK HYDRAULICZNEGO NAPĘDU ELEKTROD PIECA ŁUKOWEGO

Kazimierz JAGIEŁA<sup>1</sup>, Marek GAŁA<sup>2</sup>, Janusz RAK<sup>2</sup>, Marian KEPIŃSKI<sup>2</sup>

1. ATH Bielsko-Biała, SEP Oddział Częstochowski,  
kazimierz.jagiela@gmail.com
2. Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny  
m.gala@el.pcz.czest.pl, janer35@gmail.com, kepinski.pcz@gmail.com

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki pomiarów parametrów i charakterystyk regulacyjnych hydraulicznego napędu elektrod pieca łukowego AC dużej mocy. Opisano układ sterowania i regulacji położenia elektrod z siłownikami hydraulicznymi. Do bezpośredniego pomiaru położenia elektrod pieca użyto laserowych czujników odległości, podłączonych do komputera pomiarowego. Wyznaczono charakterystyki położenia i prędkości elektrod dla różnych stanów pracy oraz pokazano dynamiczne przebiegi czasowe ruchu elektrod w różnych fazach wytopu. Sformułowano wnioski dotyczące nastaw w układzie sterowania elektrod pieca.

**Słowa kluczowe:** piec łukowy AC, sterowanie pieca łukowego, napęd hydrauliczny elektrod.

### 1. WPROWADZENIE

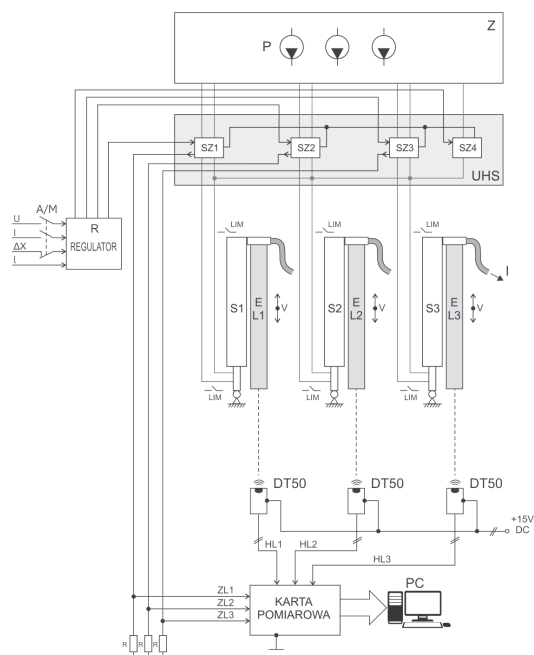
Piec łukowy AC jest odbiorem elektroenergetycznym dużej mocy o nieliniowej charakterystyce napięciowo-współprądowej oraz niespokojnym charakterze pracy. Istotny wpływ na poziom wskaźników energetycznych, stabilność pracy pieca i ograniczenie oddziaływania na sieć zasilającą mają parametry ruchu elektrod napędzanych przez siłowniki hydrauliczne. Zasadnicze znaczenie ma w tym przypadku określenie struktury oraz dobór nastaw regulatorów ruchu elektrod, tak by w trakcie wytopu utrzymywać stałą wartość impedancji łuku oraz pozostałych parametrów takich jak: szybkość zmian położenia przełącznika zaczerwów oraz wartość napięcia wtórnego transformatora piecowego. Ze względu na niespokojny charakter pracy pieca, zwłaszcza po jego załadowaniu, układ regulacji powinien nie tylko ograniczać chwilowe przetężenia, ale także tłumić pojawiające się wówczas fluktuacje prądu. Właściwości i parametry układu regulacji szybkości reakcji ruchu elektrod pieca mają decydujący wpływ na charakterystyki eksploatacyjne instalacji: wartość wskaźnika zużycia energii elektrycznej na tonę stali, skrócenie rzeczywistego czasu topienia złomu oraz zmniejszenie stopnia zużycia elektrod, a przez to wydłużenie czasu eksploatacji pieca.

Pierwsze instalacje pieców łukowych wyposażane były w napędy ruchu elektrod przy wykorzystaniu silników prądu stałego [1, 2, 3]. Obecnie budowane piece łukowe AC najczęściej wyposażone są w napędy hydrauliczne [3] regulujące położenie każdej elektrody zależnie od aktualnej wartości impedancji łuku, rezystancji lub napięcia łuku. Zasadniczymi elementami wykonawczymi w układzie

napędu hydraulicznego są serwozawory takich firm jak Moog [4] czy Rexroth [5]. W dostępnej literaturze brak jest opracowań dotyczących metodyki badań ruchu elektrod, są natomiast opracowania, w których prezentowane są modele matematyczne elektrycznych układów napędowych poparte wynikami badań symulacyjnych [6, 7].

### 2. SCHEMAT UKŁADU POMIARU I REGULACJI NAPĘDU HYDRAULICZNEGO RUCHU ELEKTROD

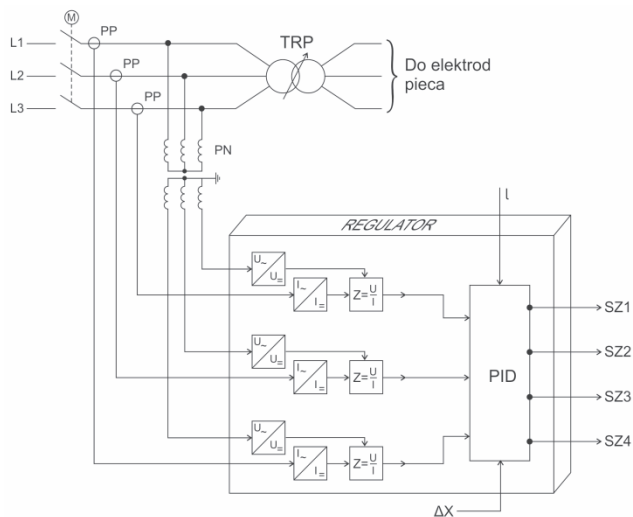
Piec łukowy AC wyposażony jest w trzy elektrody grafitowe przymocowane do ramion kolumn nośnych, które wykonują niezależne ruchy w górę (podnoszenie) i w dół (opuszczanie). Napęd elektrod realizowany jest w układzie hydraulicznym, który wyposażony jest w trzy siłowniki S1, S2 i S3 (rys. 1) sterowane poprzez serwozawory SZ1÷SZ3 działające w kierunku podnoszenia. Dla kierunku opadania elektrod, siła grawitacji kompensowana jest dodatkowym ciśnieniem sterowanym poprzez serwozawór SZ4 (układ UHS).



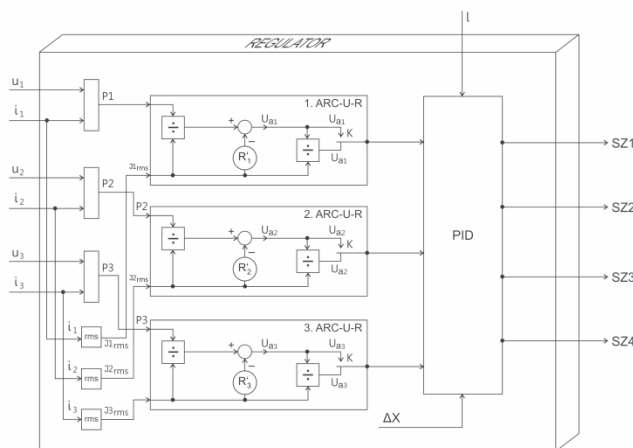
Rys. 1. Schemat pomiaru ruchu elektrod pieca łukowego AC

Sygnaly sterujace serwozaworami uzyskiwane sa z ukkladu regulacji – modul REGULATOR R (rys. 1). Regulator, oprócz regulacji ruchu elektrod, spełnia kilka innych funkcji - steruje przełaczniakiem zaczepów transformatora piecowego oraz monitoruje prace pieca łukowego z punktu widzenia parametrów łuku. Regulator polozenia elektrod jest czynny podczas pracy pieca łukowego. Jego szczegolową strukture przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Rozróznia się trzy sposoby regulacji, a dotyczą one:

- stalej wartosci impedancji  $Z=U/I = const$  (rys. 2),
- stalej wartosci napiecia łuku  $U_a = const$  (rys. 3),
- stalej wartosci rezystancji łuku  $R_a = const$  (rys. 3).



Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji  $Z=const$  pieca łukowego



Rys. 3. Schemat blokowy układu regulacji  $U_a=const$  i  $R_a=const$  pieca łukowego AC

Dla określenia parametrów łuku pomocne są zależności dotyczące:

- wartości skutecznych prądów fazowych  $I_{rms k}$ :

$$I_{rms k} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_k^2(t) dt} \quad (1)$$

- wartości fazowych mocy czynnych  $P_k$ :

$$P_k = \frac{1}{T} \int_0^T u_k(t) i_k(t) dt \quad (2)$$

- wartości fazowych napięć łuku  $U_{ak}$ :

$$U_{ak} = \frac{P_k - \frac{1}{3} \Delta P_{TRP}}{I_{rms k}} - R'_k I_{rms k} \quad (3)$$

- wartości fazowych rezystancji łuku  $R_{ak}$ :

$$R_{ak} = \frac{U_{ak}}{I_{rms k}} \quad (4)$$

gdzie:  $R'_k$  – sprowadzona na stronę SN fazowa rezystancja toru wieloprądowego,  $\Delta P_{TRP}$  – całkowite straty transformatora piecowego TRP (rys. 2),  $k \in \{1, 2, 3\}$ .

Algorytm wyznaczania wartości wielkości podanych według wzorów (1) do (4) zastosowany jest w układzie regulatora o strukturze przedstawionej na rysunku 3 z możliwością jej wyboru za pomocą przełącznika K znajdującego się w podukładach 1.ARC-U-R, 2.ARC-U-R i 3.ARC-U-R. Napięcie łuku może być wyznaczone jedynie przy zastosowaniu pomiaru pośredniego, realizowanego dwoma metodami: pierwsza na podstawie parametrów napięciowo-prądowych uzyskiwanych z przekładników zainstalowanych po stronie średniego napięcia (rys. 2) i druga z bezpośrednich pomiarów napięć i prądów strony dolnego napięcia transformatora piecowego TRP. Układ regulacji przystosowany jest pomiarów sygnałów napięciowo-prądowych realizowanych po stronie średniego napięcia (uzwojenie GN transformatora piecowego TRP) pokazanych na rysunkach 2 i 3. Metodę wyznaczania parametrów łuku dla pieca AC z zastosowaniem pomiarów w obwodzie silnoprądowym (wtórnym transformatora piecowego TRP) przy wykorzystaniu cewek Rogowskiego przedstawiono w publikacji [8]. Na rysunkach 2 i 3 sygnałem wejściowym jest również pozycja elektrod  $\ell$  poszczególnych faz. Prawidłowe działanie układu regulacji uzależnione jest od optymalizacji nastaw regulatora pozycjonowania elektrod. W tym celu istotne jest sprawdzenie ruchu elektrod pieca w kierunku podnoszenia i opuszczania, który realizowany jest w układzie hydraulicznym UHS o schematycznym połączeniu przepływów medium między serwozaworami a siłownikami elektrod pieca S1, S2 i S3 według rysunku 1.

Podstawowe parametry techniczne zastosowanych czujników laserowych typu DT50 przedstawiono w tabeli 1. Sposób rozmieszczenia czujników laserowych poniżej trzech siłowników pieca łukowego pokazano na rysunku 4.

Tabela 1. Parametry dalmierza średniego zasięgu DT50-P1114

Lp.	Parametr	Wartość
1	Zakres pomiarowy	200 mm do 10000 mm
2	Rozdzielczość	1 mm
3	Powtarzalność	5 mm
4	Dokładność	$\pm 10$ mm
5	Czas odpowiedzi	20 ms
6	Nadajnik światła	laser czerwony
7	Wyjście analogowe	$1x(0...10) V \geq 5k\Omega$
8	Napięcie zasilające	15 ... 30 V DC

Na rysunku 1 w obszarze schematu blokowego napędu hydraulicznego posuwu elektrod pieca zamieszczono również układ do pomiaru i rejestracji parametrów ruchu

składający się z czujników laserowych DT-50 podłączonych do karty pomiarowej typu NI USB-6210 współpracującej z komputerem PC. Do kolejnych trzech wejść karty pomiarowej podłączono sygnały wyjściowe z serwozaworów SZ1 ÷ SZ3 odpowiadające zadanym wartościom  $\Delta X$  ciśnienia siłowników elektrod pieca łukowego.



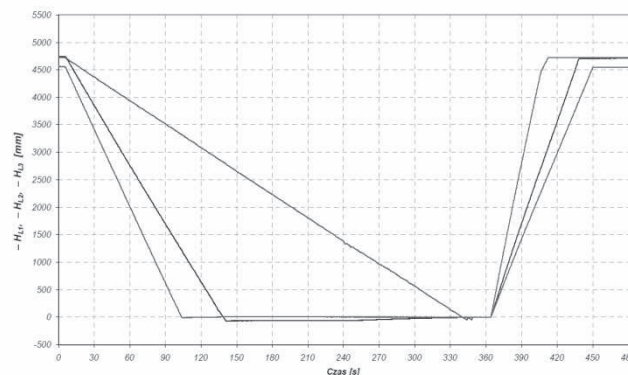
Rys. 4. Ustawienie czujników laserowych DT-50 pod siłownikami elektrod pieca łukowego

Do rejestracji sygnałów pochodzących z dalmierzy laserowych oraz z serwozaworów użyto oprogramowania DASYLab i utworzono bazę danych do wyznaczenia charakterystyk ruchu. Zebrane dane przetworzono za pomocą pakietu MATLAB uzyskując charakterystyki statyczne i dynamiczne ruchu elektrod pieca w czasie jego postoju oraz w poszczególnych fazach topienia złomu.

### 3. CHARAKTERYSTYKI RUCHU ELEKTROD PIECA ŁUKOWEGO AC

W czasie postoju pieca łukowego przy braku zasilania transformatora piecowego TRP (rys. 2) po wybraniu przełącznikiem A/M (rys. 1) opcji sterowania ręcznego, można przez zmianę wartości zadanej  $\Delta X$  regulować prędkość ruchu elektrod. W ten sposób uzyskuje się rodzinę charakterystyk dynamicznych  $H[\text{mm}]=f(t[\text{s}])$  dla trzech elektrod pieca w zależności od parametru  $\Delta X$ . Zdefiniowanie charakterystyk dynamicznych  $H=f(t)$  nie wymaga działania układu regulacji, bowiem wówczas piec łukowy pozbawiony jest napięcia zasilania oraz łuku elektrycznego.

Przykładowe charakterystyki dla skrajnych wartości parametru  $\Delta X$  dla określonych nastaw regulatora pozycji pokazano na rysunkach 5 i 8.



Rys. 5. Przebieg zmian położenia elektrod pieca w funkcji czasu dla opuszczania i podnoszenia dla wartości zadanej  $\Delta X=10\%$

Dodatkowo na rysunkach 6 i 7 zaprezentowano zmiany położenia elektrod wraz z sygnałami wyjściowymi z serwozaworów odpowiadające wartości zadanej  $\Delta X=20\%$ . Uwzględniając zarejestrowane zmiany położenia poszczególnych elektrod oraz uzyskane z pomiarów wartości czasów obliczono prędkości poruszania elektrod w kierunku opuszczania i podnoszenia, a ich wyniki zestawiono w tabelach 2 i 3.

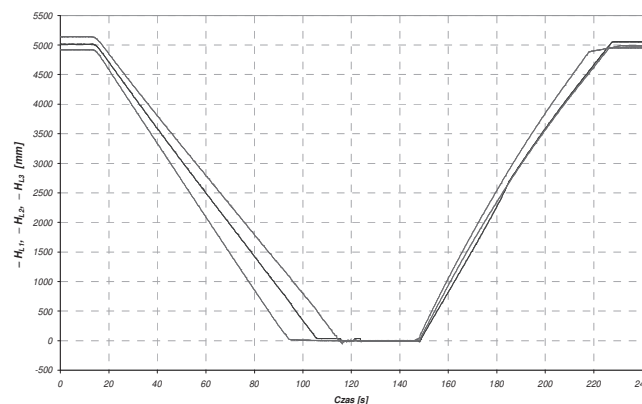
Tablica 2. Wartości czasów  $t_o$  oraz prędkości ruchu elektrod  $v_o$  dla cyklu opuszczania (indeks  $o$  - opuszczanie)

$\Delta X$	$t_{oL1}$	$t_{oL2}$	$t_{oL3}$	$v_{oL1}$	$v_{oL2}$	$v_{oL3}$
%	s	s	s	mm/s	mm/s	mm/s
10	133,0	97,8	334,3	35,6	46,4	14,1
20	66,4	49,9	82,9	73,2	92,3	56,9
30	52,8	39,9	54,1	92,5	115,7	87,0
40	49,5	39,6	46,9	99,7	118,0	100,9
50	49,5	39,0	45,6	99,3	119,3	103,1
60	50,3	39,3	44,7	98,4	118,4	104,1
70	51,2	38,9	44,7	96,3	119,1	104,2
80	48,6	38,8	44,5	101,9	119,8	105,3
90	48,3	39,2	44,2	101,7	119,4	105,8
100	48,3	39,2	44,7	102,2	119,2	105,9

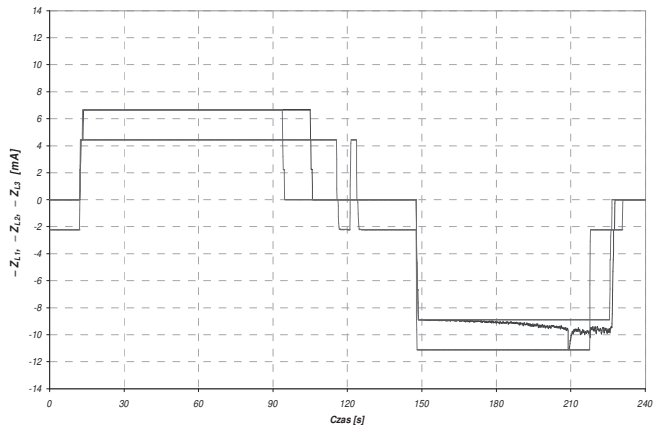
Tablica 3. Wartości czasów  $t_p$  oraz prędkości ruchu elektrod  $v_p$  dla cyklu podnoszenia (indeks  $p$  - podnoszenie)

$\Delta X$	$t_{pL1}$	$t_{pL2}$	$t_{pL3}$	$v_{pL1}$	$v_{pL2}$	$v_{pL3}$
%	s	s	s	mm/s	mm/s	mm/s
10	74,3	86,0	43,1	63,2	52,8	104,4
20	39,9	42,7	29,9	120,1	107,4	151,4
30	31,2	33,1	26,8	156,4	139,5	168,6
40	28,2	30,3	26,1	172,7	153,4	173,6
50	27,7	29,7	26,9	177,9	157,7	172,8
60	27,4	28,8	26,3	179,8	161,0	173,4
70	28,1	29,2	26,4	175,8	159,9	172,5
80	27,2	29,4	26,4	180,6	159,1	172,8
90	27,3	29,3	26,6	180,4	158,8	172,1
100	27,5	29,4	27,3	179,9	159,2	171,5

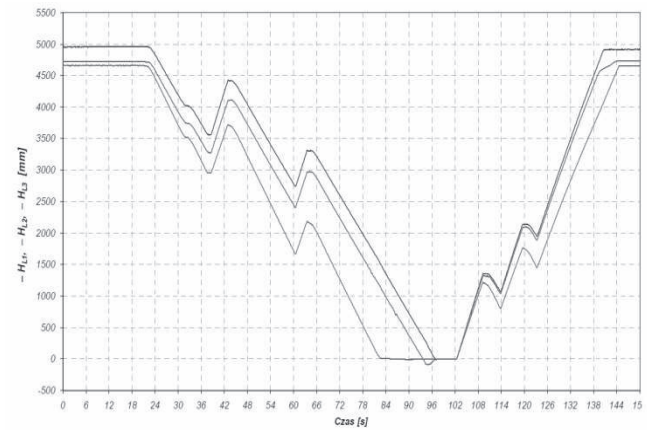
Wykorzystując obliczone wartości prędkości ruchu elektrod, zgodnie z danymi zawartymi w tabelach 2 i 3 wykreślono charakterystykę  $v=f(\Delta X)$  dla cyklu opuszczania i podnoszenia, a jej przebieg zilustrowano na rysunku 9.



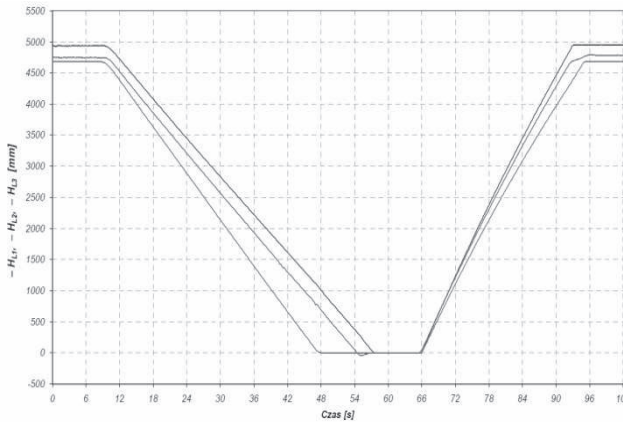
Rys. 6. Przebieg zmian położenia elektrod pieca w funkcji czasu dla opuszczania i podnoszenia dla wartości zadanej  $\Delta X=20\%$



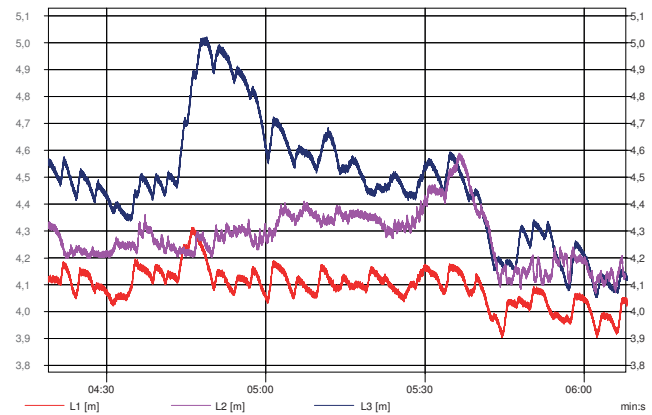
Rys. 7. Przebieg zmian wartości sygnałów zadających uzyskanych z serwowzorów w funkcji czasu dla opuszczania i podnoszenia dla wartości zadanej  $\Delta X=20\%$



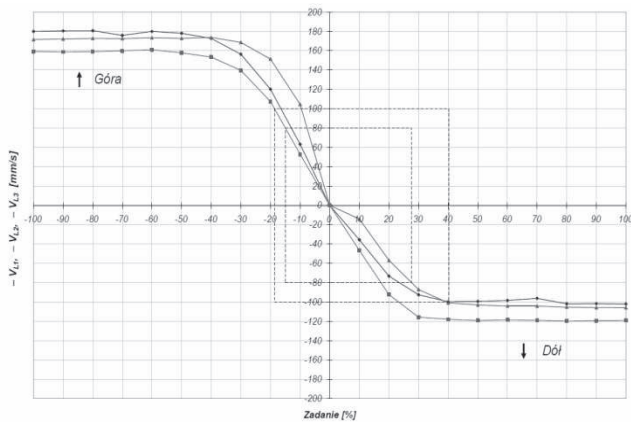
Rys. 10. Charakterystyka współbieżności ruchu elektrod pieca dla wartości zadanej  $\Delta X=50\%$  dla opuszczania i podnoszenia



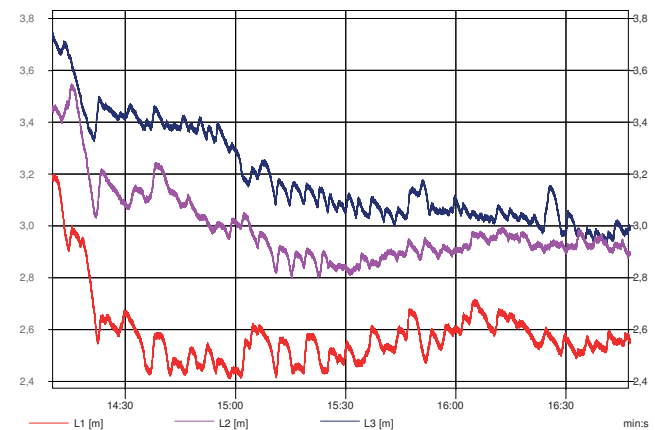
Rys. 8. Przebieg zmian położenia elektrod pieca w funkcji czasu dla opuszczania i podnoszenia dla wartości zadanej  $\Delta X=100\%$



Rys. 11. Przebiegi zmian położenia elektrod pieca łukowego podczas roztopienia żłomu (1. kosz żłomowy) dla regulacji  $Z=const$



Rys. 9. Charakterystyka prędkości ruchu elektrod pieca  $v$  w funkcji wartości zadanej  $\Delta X$  dla opuszczania i podnoszenia



Rys. 12. Przebiegi zmian położenia elektrod pieca łukowego podczas etapu rafinacji dla regulacji  $Z=const$

Na rysunku 10 wykreślono charakterystykę dynamiczną współbieżności ruchu elektrod z pokazaniem różnic pozycji  $\Delta l$  dla poszczególnych elektrod dla zadanej wartości wysterowania  $\Delta X=50\%$  symulując nieokreśloną wartość impedancji łuku poprzez kolejne opuszczanie i podnoszenie elektrod w kierunku ruchu w dół i do góry.

Kolejne dwie charakterystyki (rys. 11 i rys. 12) dotyczą rejestracji położenia elektrod pieca łukowego podczas procesu technologicznego topienia żłomu stalowego. Przykładowo dla nastaw regulatora  $Z=const$  według struktury pokazanej na rysunku 2 zarejestrowano przebiegi zmian położenia elektrod w czasie etapu roztopienia (rys. 10) i rafinacji (rys. 11) dla nastaw regulatora pozycji elektrod odpowiadających znacznemu rozsynchronizowaniu jednej elektrody dla małych wartości zadanych  $\Delta X=10\%$  pokazanych na rysunku 5.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule wyniki pomiarów zostały wykonane na rzeczywistym obiekcie przemysłowym w ekstremalnych warunkach procesu technologicznego wytopu stali. Przeprowadzone pomiary są szczególnie istotne z punktu widzenia wprowadzenia korekt do układów regulacji ruchu elektrod i prądu łuku w celu ograniczenia zużycia energii elektrycznej oraz zapewnienia ciągłości pracy pieca łukowego podczas wszystkich faz wytopu stali. Na podstawie wykonanych badań eksperymentalnych stwierdzono, że istnieją różnice w prędkościach posuwu elektrod, szczególnie widoczne dla małych wartości sygnału zadania dla określonych nie zoptymalizowanych nastaw regulatora pozycji. Dla takiego przypadku pokazano, że podczas zmian dynamicznych występuje asynchronizm współbieżności ruchu elektrod. Potwierdzają to przebiegi zmian położenia elektrod podczas pracy pieca (rys. 11 i rys. 12). Szczególnie widoczne jest to podczas roztapiania złomu w czasie pierwszych pięciu minut wytopu. Dane dotyczące prędkości ruchu elektrod wynikające z charakterystyk dynamicznych mają istotne znaczenie dla doboru nastaw regulatora. Uzyskane rezultaty zostały wykorzystane w procedurze doboru nastaw regulatora.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Hering M.: Podstawy elektrotermii cz. I. Wyd. WNT Warszawa 1992.
2. Kurbiel A.: Elektrotermiczne urządzenia łukowe. Wyd. WNT Warszawa 1988.
3. Karbowniczek M.: Stalowniczy piec łukowy. Wydawnictwa AGH, Kraków 2015.
4. www.moog.com (09.06.2017)
5. www.boschrexroth.com/pl/pl/ (09.06.2017)
6. Wciślik M., Wolski W.: Symulacyjna analiza układu regulacji posuwu elektrod pieca łukowego 140 Mg. Prace II Sympozjum - Symulacja Procesów Dynamicznych SPD-2, Warszawa 1985, s.153-160.
7. Peens M.: Modelling and Control of an Electrode System for a Three-Phase Electric Arc Furnace. Dissertation University of Pretoria, 2006.
8. Jagieła K., Rak J., Gała M., Kępiński M.: Identification of Electric Power parameters of AC Arc Furnace Low Voltage System. Proc. 14<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, Bergamo, Italy, 2010.

#### EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF THE ARC FURNACE ELECTRODES HYDRAULIC DRIVE

The article presents the results of measurements of the parameters and characteristics of the hydraulic control of electrodes of high power AC arc furnace. The control and positioning system of the electrodes with hydraulic actuators has been described. Laser distance sensors connected to the measuring computer were used for the direct measurement of the position of AC furnace electrodes. The control signals for the electromagnetic valves were also measured. DasyLab and Matlab software were used for the data acquisition and analysis. The position and speed characteristics of the electrodes for various operating states have been determined. Dynamic characteristics of the electrodes movement in the various melting phases are shown. Conclusions on settings in the furnace electrodes control system were formulated.

**Keywords:** AC arc furnace, arc furnace control, hydraulic drives, arc furnace drives.

