

Ocena asymetrii napięć i prądów w instalacji zasilania pieca łukowego AC

Janusz Rak, Marek Gała, Kazimierz Jagieła

1. Wstęp

Obecnie w procesach metalurgicznych do wytwarzania ciekłej stali powszechnie stosuje się elektryczne piece łukowe (EAF) zazwyczaj prądu przemiennego z dalszą wtórną obróbką stopu w piecach kadziowych (LF). Elektryczne piece łukowe mają szereg zalet w porównaniu z konwerterami tlenowymi i piecami martenowskimi, zarówno pod względem relacji kosztów do wydajności, jak i bezpieczeństwa dla środowiska [12]. Piec łukowy EAF jest odbiorem elektroenergetycznym dużej mocy o niespokojnym charakterze pracy ze względu na niestabilną i mocno nieliniową charakterystykę napięciowo-prądową łuku, zwłaszcza w początkowej fazie wytopu [1, 8, 9, 10]. Powoduje to negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą w postaci wahań napięcia, asymetrii oraz odkształcenia przebiegu napięcia od sinusoidy ze względu na generowanie wyższych harmonicznych prądu. Potwierdzają to przebiegi napięć i prądów w sieci średniego napięcia zarejestrowane podczas procesu wytopu stali [10, 13].

Elektryczny piec łukowy prądu przemiennego generuje ciągłe widmo harmonicznych prądu [11], przy czym największy wpływ mają harmoniczne rzędów 2, 3, 5 i 7 względem częstotliwości sieci zasilającej [1, 6, 10, 13, 18]. Ze względu na występujące odkształcenia przebiegów prądów, znaczny pobór mocy biernej i relatywnie niski współczynnik mocy PF (ang. *Power Factor*) w instalacjach zasilania pieców łukowych stosowane są pasywne filtry wyższych harmonicznych lub układy nadążnej kompensacji mocy biernej SVC (ang. *Static Var Compensator*), a także filtry aktywne typu STATCOM. Urządzenia te ograniczają zawartość wyższych harmonicznych prądu, a dla częstotliwości sieci zasilającej ($f_s = 50$ Hz) stanowią układ kompensacji mocy biernej dla podstawowej harmonicznej [6].

Właściwy dobór parametrów elektrycznych instalacji zasilania pieca łukowego wpływa na stopień jego oddziaływania na sieć elektroenergetyczną oraz charakterystyki eksploatacyjne: wskaźnik zużycia energii elektrycznej na tonę stali i efektywny czas topienia złomu [14]. Współczesny piec łukowy stanowi praktycznie zaawansowane urządzenie mechatroniczne, którego istotnym elementem strukturalnym jest system sterowania stanami elektrycznymi pieca. System ten odpowiada za działanie napędu hydraulicznego pozycjonowania elektrod, zmianę zaczerwotów transformatora piecowego i wybór krzywej wydajności podczas operacji topienia wsadu w celu utrzymania mocy łuku elektrycznego, która jest niezbędna dla efektywnego prowadzenia procesu technologicznego. Na rynku dostępnych jest szereg specjalistycznych systemów sterowania pracą pieca, znanych pod nazwami własnymi: EMPERE (Spie, Francja) ARCOS

Streszczenie: Elektryczny piec łukowy AC, ze względu na dynamiczny charakter pracy łuku elektrycznego, negatywnie oddziałuje na sieć zasilającą w postaci generowania wyższych harmonicznych, wahań napięcia oraz asymetrii. W artykule przedstawiono analizę asymetrii napięć i prądów w instalacji zasilania pieca łukowego AC. Na podstawie zarejestrowanych komputerowo danych pomiarowych obliczono za pomocą szybkiej transformaty Fouriera podstawowe harmoniczne przebiegów napięć i prądów w poszczególnych punktach toru zasilania. Następnie wyznaczono współczynniki asymetrii napięć i prądów oraz średnie wartości impedancji fazowych na poziomie niskiego i średniego napięcia dla stanów roztopiania i rafinacji.

Słowa kluczowe: piec łukowy AC, nieliniowe obciążenie, składowe symetryczne, współczynniki asymetrii

🇬🇧 EVALUATION OF VOLTAGE AND CURRENT ASYMMETRY IN THE AC ARC FURNACE POWER SUPPLY INSTALLATION

Abstract: The electric AC arc furnace, due to the dynamic nature of the electric arc operation, has a negative impact on the supply network in the form of generating higher harmonics, voltage fluctuations and asymmetry. The paper presents the analysis of asymmetry of voltages and currents in the power supply installation of an AC arc furnace. The basic harmonics of voltage and current waveforms at individual points of the power line were calculated using the Fast Fourier Transform on the basis of computer-recorded measurement data. Next, the voltage and current asymmetry coefficients as well as mean values of phase impedances at the low and medium voltage levels were determined for the melting and refining states.

Keywords: AC arc furnace, nonlinear load, symmetrical components, asymmetry coefficients

(Siemens), HIREG (Danieli, Włochy), DECTEQ (Ferrotron, Niemcy) [12]. Podstawowym zadaniem systemu sterowania jest utrzymanie odpowiednich parametrów łuku, przy czym wyróżnia się następujące sposoby regulacji dotyczące [7]:

- stałej wartości impedancji $Z = U/I = const$;
- stałej wartości napięcia łuku $U_{arc} = const$;
- stałej wartości rezystancji łuku $R_{arc} = const$.

2. Instalacja pieca łukowego AC

Piece łukowe AC należą do grupy nieliniowych odbiorów elektroenergetycznych dużej mocy, charakteryzujących się zmiennym poborem mocy czynnej i biernej. Z uwagi na istotę i rodzaj pracy pieca trzeba go analizować jako obiekt będący ciągle w stanie nieustalonym, w dodatku chaotycznym, zwłaszcza w fazie roztopienia wsadu. Z tych względów układ zasilania pieca łukowego z zasady jest autonomiczną instalacją o przykładowym schemacie pokazanym na rysunku 1. Tor zasilania pieca łukowego rozpoczyna się od transformatora sieciowego (TS) przyłączonego do sieci elektroenergetycznej wysokiego napięcia o mocy zwarcia SPCC. Z pola rozdzielni SN 30 kV poprzez dławik liniowy (Dł) wyprowadzony jest tor kablowy (K) zasilający transformator piecowy (TP). Dzięki specjalnej konstrukcji transformator (TP) umożliwia w szerokim zakresie regulację napięcia i prądu strony wtórnej, podawanego do elektrod. Regulacja mocy czynnej dostarczanej do pieca realizowana jest przez specjalny układ kontroli stanów pracy pieca (FCS), który steruje przełącznikiem zacze- pów oraz hydraulicznym układem napędowym elektrod, ustawiając je w odpowiednim położeniu [7, 9, 12].

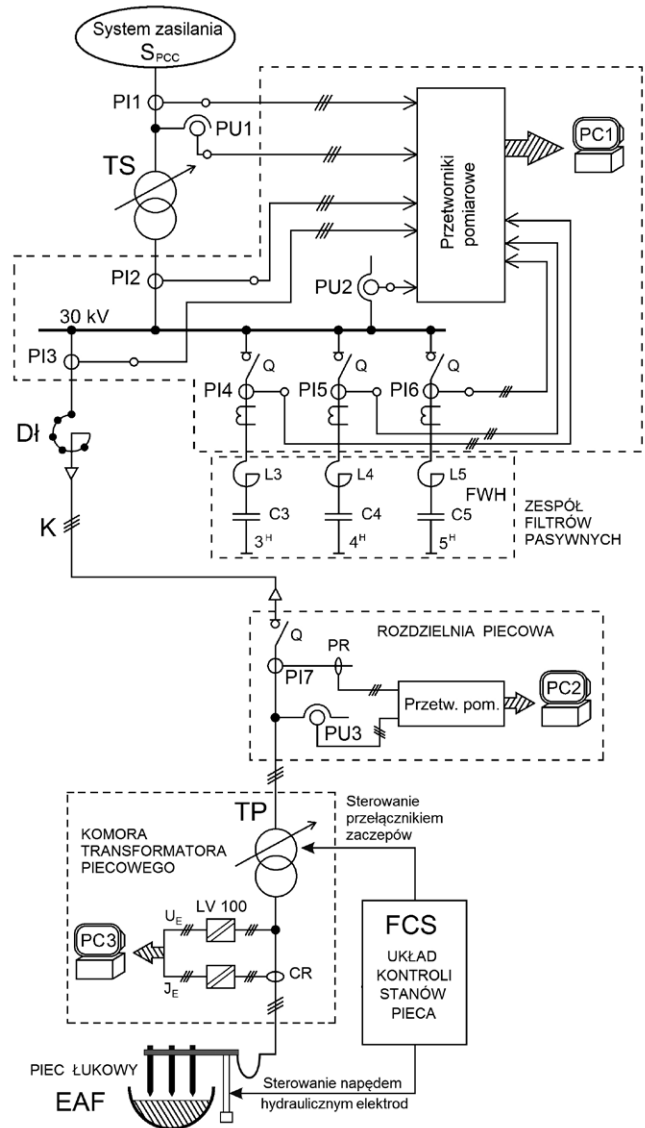
W celu ograniczenia oddziaływania wyższych harmonicznych prądów na system elektroenergetyczny zastosowano trójgałęziowy zespół filtrów pasywnych FWH (rys. 1) z obwodami L-C dostrojonymi do częstotliwości rezonansu szeregowego. Filtry wyższych harmonicznych zostały zestrojone na częstotliwości rezonansowe o rzędach $r = 3$, $r = 4$ i $r = 5$. Piec łukowy EAF zasilany jest z transformatora piecowego (TP), wyposażonego w przełącznik zacze- pów umożliwiający regulację napięcia strony wtórnej, czemu towarzyszy zmiana reaktancji transformatora (TP). Długość łuku, która jest uzależniona od napięcia i położenia elektrod, wpływa na nieliniowo zmienną wartość impedancji łuku $Z_L = R_L + jX_L$.

3. Metody pomiaru parametrów toru zasilania pieca łukowego AC

Układ pomiarowy do rejestracji przebiegów napięć i prądów w instalacji zasilania pieca łukowego AC (EAF) na poziomie wysokiego, średniego i niskiego napięcia pokazano na rysunku 1. Do pomiaru wartości chwilowych zastosowano komputery PC1, PC2 i PC3 wyposażone w karty DAQ oraz oprogramowanie aplikacyjne DasyLab, umożliwiające emulację wielokanałowego oscyloskopu cyfrowego i rejestrację danych pomiarowych.

Ze względu na niezbędną separację galwaniczną komputerowego systemu pomiarowego od sieci elektroenergetycznej do obwodów wtórnych przekładników napięciowych i prądowych dołączono przetworniki prądowe i napięciowe LEM typu LA i LV o gwarantowanej liniowości przetwarzania $\pm 0,2\%$.

Zgodnie ze schematem podanym na rysunku 1 zarejestrowano jednocześnie przebiegi napięcia w trzech fazach na poziomie WN i SN, prądów pierwotnego i wtórnego transformatora sieciowego TS, prądu pierwotnego transformatora piecowego TP oraz prądów filtrów wyższych harmonicznych [6]. W obwodzie niskiego napięcia zmierzono napięcia fazowe oraz za pomocą cewek Rogowskiego [8] prąd elektrod pieca łukowego. Do wyznaczenia wskaźników charakteryzujących



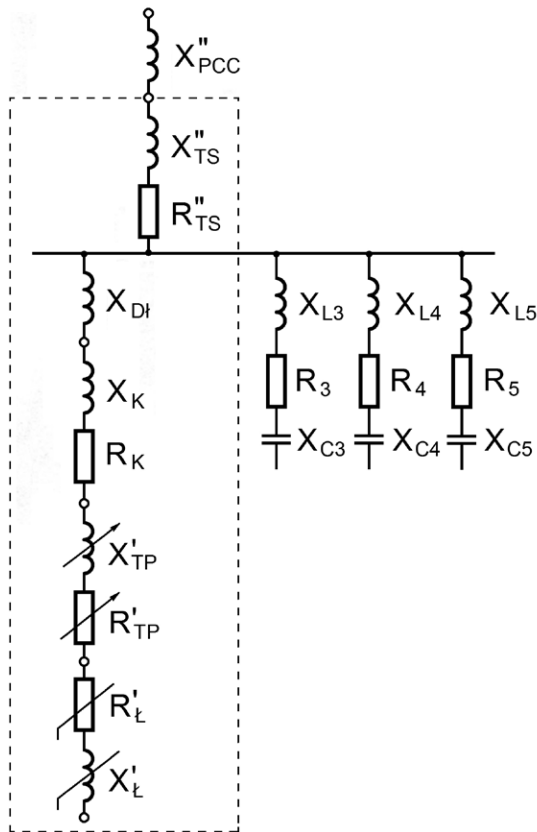
Rys. 1. Schemat instalacji zasilania pieca łukowego AC oraz rozmieszczenia elementów układu pomiarowego

jakość parametrów zasilania konieczne jest określenie zawartości harmonicznych w przebiegach napięć i prądów [2, 3]. Analiza harmoniczna odkształconych przebiegów pozwala wyznaczyć podstawowe harmoniczne, na bazie których oblicza się składowe symetryczne, a następnie współczynniki asymetrii napięciowej i prądowej.

4. Parametry toru prądowego pieca łukowego AC

Na bazie schematu przedstawionego na rysunku 1 dla potrzeb analizy asymetrii napięciowo-prądowej utworzono schemat impedancyjny instalacji zasilania pieca łukowego AC (rys. 2).

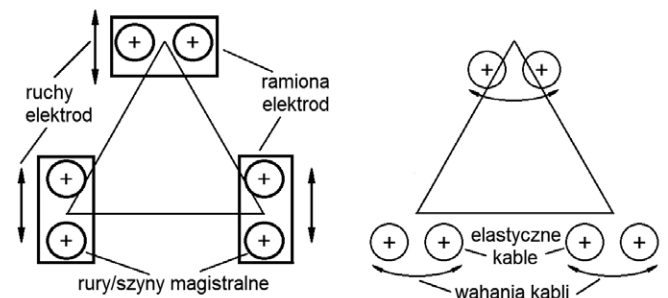
Główny tor prądowy tworzy pięć podstawowych elementów składowych: system elektroenergetyczny (PCC), transformator sieciowy (TS), kabel średniego napięcia (K) wraz z dławikiem liniowym (Dł), transformator piecowy (TP) oraz odbiornik, w postaci łuku elektrycznego. Drugą grupę stanowi zespół filtrów wyższych harmonicznych FWH złożony z trzech gałęzi



Rys. 2. Tor impedancyjny instalacji pieca łukowego AC

Tabela 1. Wartości impedancji schematu z rysunku 2

Elementy obwodu	Z [Ω]
System elektroenergetyczny X''_{PCC}	$j 0,1165$
Transformator sieciowy R''_{TS}, X''_{TS}	$0,039 + j 1,557$
Dławik szeregowy X_{D1}	$j 2,624$
Kabel R_K, X_K	$0,0652 + j 0,167$
Transformator piecowy R'_{TP}, X'_{TP}	$0,0269 \div 0,0671 + j (0,68 \div 2,44)$
Łuk elektryczny $R_Ł, X_Ł$	$ Z_Ł - \text{rys. 13}$
Filtr $3^H (R_3, X_{L3}, X_{C3})$	$0,084 + j (8,1 - 68,1)$
Filtr $4^H (R_4, X_{L4}, X_{C4})$	$0,055 + j (4,3 - 66,4)$
Filtr $5^H (R_5, X_{L5}, X_{C5})$	$0,072 + j (4,55 - 110,6)$



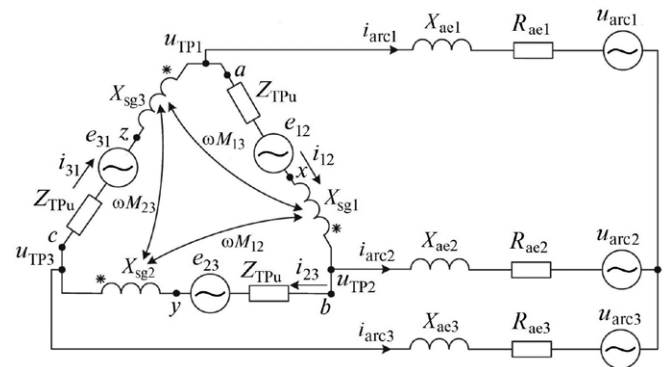
Rys. 3. Schemat triangulacji wtórnego obwodu elektrycznego transformatora piecowego [15]

R-L-C dla trzeciej, czwartej i piątej harmonicznej. Wartości impedancji poszczególnych elementów schematu zamieszczonego na rysunku 2 przeliczone na poziom średniego napięcia zestawiono w tabeli 1.

Dane zestawione w tabeli 1 wskazują, że tor zasilania łącznie z transformatorem piecowym (TP) jest symetryczny, tzn. impedancje poszczególnych faz są równe. Asymetria impedancji fazowych pojawia się dopiero po stronie wtórnej transformatora piecowego i wynika z nieliniowości łuku (asymetria eksploatacyjna) oraz budowy toru wieloprądowego (asymetria konstrukcyjna). Obwód wtórny nowoczesnego pieca łukowego jest zazwyczaj triangulowany w całości, przy czym dąży się do triangulacji równobocznej (rys. 3) [15].

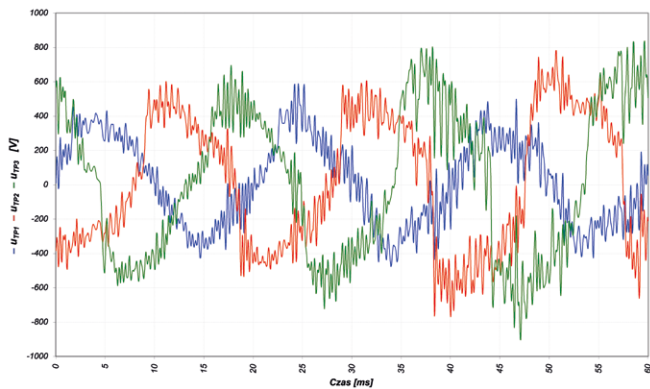
Każda z faz toru wieloprądowego pieca jest utworzona z szeregowo połączonych odcinków przewodu sztywnego umieszczonego w ramieniu elektrody, odcinka przewodu elastycznego i elektrody połączonej z przewodem sztywnym za pomocą specjalnego uchwyty. Równoważny obwód wtórny pieca łukowego z trójkątną konfiguracją elektrod i toru wieloprądowego (wg rys. 3) przy założeniu, że impedancje faz transformatora są równe (symetria), pokazano na rysunku 4 (konfiguracja ta odpowiada badanej instalacji zasilania).

Brak równowagi w reaktancjach faz obwodu wtórnego wynika z faktu, że środkowe ramie elektrody jest krótsze. Natomiast podczas pracy pieca triangulacja nie może być utrzymywana w całym obwodzie wtórnym z uwagi na różny stopień zużycia elektrod, nierównomierność poziomów wsadu pod elektrodami

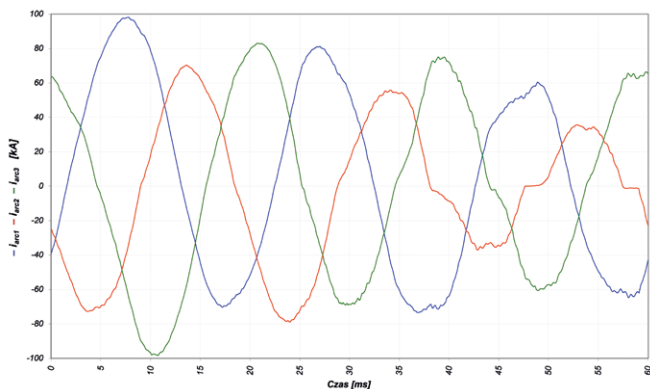


Rys. 4. Obwód wtórny transformatora piecowego (TP) z trójkątną konfiguracją toru wieloprądowego i elektrod (oprac. wg [9, 15, 16]):

- $X_{sg1}, X_{sg2}, X_{sg3}$ – reaktancje indukcyjne dwóch kabli elastycznych (połączenie szeregowo);
- $\omega M_{12}, \omega M_{13}, \omega M_{23}$ – reaktancje indukcyjne wzajemne kabli elastycznych;
- Z_{TPu} – impedancja uzwojeń transformatora piecowego składająca się z rezystancji R_{TPu} i reaktancji X_{TPu} ;
- e_{12}, e_{23}, e_{31} – sem (na biegu jałowym) uzwojeń wtórnych transformatora piecowego;
- $X_{ae1}, X_{ae2}, X_{ae3}$ – reaktancje indukcyjne szyn magistralnych;
- $R_{ae1}, R_{ae2}, R_{ae3}$ – rezystancje szyn magistralnych z uwzględnieniem rezystancji elektrod;
- $u_{arc1}, u_{arc2}, u_{arc3}$ – napięcia łuku poszczególnych faz;
- $u_{TP1}, u_{TP2}, u_{TP3}$ – napięcia faz strony wtórnej TP



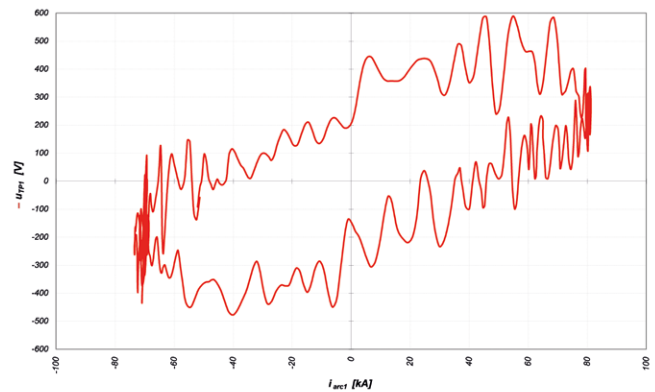
Rys. 5. Wartości chwilowe napięć fazowych strony wtórnej TP podczas roztapiania wsadu



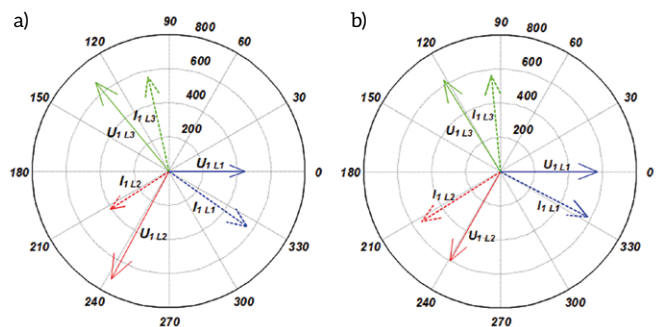
Rys. 6. Wartości chwilowe prądów fazowych strony wtórnej TP podczas roztapiania wsadu

oraz konieczność ciągłej regulacji długości łuku, zwłaszcza podczas roztapiania wsadu [9]. Wymusza to ruchy pionowe (rys. 3) i przesunięcie ramion elektrod z pożądanej konfiguracji trójkąta, co wpływa na indukcyjności wzajemne między fazami [15] i zmianę reaktancji X_{ae} poszczególnych faz. Ruchy pionowe elektrod powodują przemieszczenie elastycznych kabli zasilających, a występujące podczas pracy pieca znaczne prądy fazowe wytwarzają siły elektrodynamiczne, powodujące wahania elastycznych kabli [9, 15]. Zmiana konfiguracji elastycznych kabli i prądów fazowych powoduje nierówność reaktancji indukcyjnych wzajemnych ωM_{12} , ωM_{13} , ωM_{23} . Powoduje to asymetrię całkowitej impedancji każdej gałęzi w trójkącie (rys. 4). W konsekwencji praca pieca łukowego jest związana z nierównymi napięciami fazowymi U_{TP1} , U_{TP2} , U_{TP3} transformatora piecowego [16].

Pomimo opisanych zjawisk w nowoczesnych piecach łukowych budowanych z triangularem torem wieloprądowym decydujący wpływ na stany asymetryczne ma nieliniowość i zmienność łuków [17]. Ilustrują to przebiegi wartości chwilowych napięć i prądów oraz charakterystyka U-I zarejestrowane podczas roztapiania wsadu, pokazane na rysunkach od 5 do 7.



Rys. 7. Charakterystyka U-I w fazie roztapiania



Rys. 8. Diagramy fazowe pierwszej harmonicznej napięć i prądów: a) topienie; b) rafinacja

Z analizy licznych pomiarów prowadzonych w stalowniach wynika, że w miarę postępu procesu roztapiania złomu prąd łuku ma przebieg coraz bardziej stabilny i zbliżony do przebiegu sinusoidalnego [8]. Maleje także stopień asymetrii napięć i prądów, co ilustrują diagramy fazowe zamieszczone na rysunku 8.

Wskaźy napięć i prądów pokazane na rysunku 8 dowodzą, że podczas roztapiania złomu i rafinacji stali prąd łuku opóźnia się za napięciem [8]. Przesunięcie fazowe wynika w głównej mierze z wytwarzanego przez łuk pola elektromagnetycznego. Mniejsze znaczenie ma pole elektryczne wytwarzane przez ładunek przestrzenny obecny przy elektrodach (składowa pojemnościowa prądu łuku) [17].

5. Wskaźniki asymetrii napięć i prądów

Wskaźniki asymetrii dla napięć i prądów należy rozpatrywać dla przebiegów sinusoidalnych, bowiem zgodnie z definicją podlegają one obrotom o wersor $\pm 120^\circ$ el. Piec łukowy AC z uwagi na charakterystykę łuku elektrycznego należy do kategorii odbiorników nieliniowych, co oznacza, że z sieci elektroenergetycznej pobiera prąd odkształcony. Powoduje to tym samym odkształcenia napięć w poszczególnych punktach jego

toru zasilania. W przypadku przebiegów odkształconych układ trójfazowych napięć fazowych można zapisać w formie przedstawionej zależnością (1):

$$\begin{aligned} u_{L1}(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} U_{L1(v)} \sin(v\omega t + \xi_{1(v)}) \\ u_{L2}(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} U_{L2(v)} \sin\left[v\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \xi_{2(v)}\right] \\ u_{L3}(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} U_{L3(v)} \sin\left[v\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \xi_{3(v)}\right] \end{aligned} \quad (1)$$

Niesymetryczny układ trójfazowych napięć podstawowych harmonicznymi $u_{L1(1)}(t)$, $u_{L2(1)}(t)$, $u_{L3(1)}(t)$, zapisanych w postaci zespolonej $\{\underline{U}_{L1(1)}, \underline{U}_{L2(1)}, \underline{U}_{L3(1)}\}$, można zgodnie z metodą składowych symetrycznych rozłożyć na trzy układy składowych: zerowej $\underline{U}_{0(1)}$, zgodnej $\underline{U}_{1(1)}$ i przeciwnej $\underline{U}_{2(1)}$, stosując transformację (2):

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{0(1)} \\ \underline{U}_{1(1)} \\ \underline{U}_{2(1)} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_{L1(1)} \\ \underline{U}_{L2(1)} \\ \underline{U}_{L3(1)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3)$$

Zespolony współczynnik asymetrii napięć fazowych definiuje się jako:

$$\underline{\alpha}_u = \frac{\underline{U}_{2(1)}}{\underline{U}_{1(1)}} \quad (4)$$

gdzie:

- $\underline{U}_{1(1)}$ – składowa symetryczna kolejności zgodnej napięć fazowych dla pierwszej harmonicznej (1);
- $\underline{U}_{2(1)}$ – składowa symetryczna kolejności przeciwnej napięć fazowych dla pierwszej harmonicznej $n = 1$.

Współczynnik asymetrii napięć fazowych wyrażany jest jako moduł zespolonego współczynnika asymetrii (4):

$$\alpha_u = |\underline{\alpha}_u| \cdot 100\% = \left| \frac{\underline{U}_{2(1)}}{\underline{U}_{1(1)}} \right| \cdot 100\% \quad (5)$$

Norma IEC 61000-4-30 [4], jak również publikacja [5] podają, że stopień asymetrii napięć międzyprzewodowych można wyznaczyć z zależności (6):

$$\alpha_{um} = \frac{U_{m2(1)}}{U_{m1(1)}} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (6)$$

gdzie:

$$\beta = \frac{U_{12(1)}^4 + U_{23(1)}^4 + U_{31(1)}^4}{(U_{12(1)}^2 + U_{23(1)}^2 + U_{31(1)}^2)^2} \quad (7)$$

W publikacji [5] wykazano, że $\alpha_u = \alpha_{um}$.

Podobne przekształcenia dotyczą współczynnika asymetrii prądów fazowych podanego jako:

$$\alpha_I = |\underline{\alpha}_I| \cdot 100\% = \left| \frac{I_{2(1)}}{I_{1(1)}} \right| \cdot 100\% \quad (8)$$

gdzie składowe $I_{1(1)}$ oraz $I_{2(1)}$ są określone:

$$\begin{pmatrix} I_{0(1)} \\ I_{1(1)} \\ I_{2(1)} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{L1(1)} \\ I_{L2(1)} \\ I_{L3(1)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

6. Wyniki eksperymentu pomiarowego

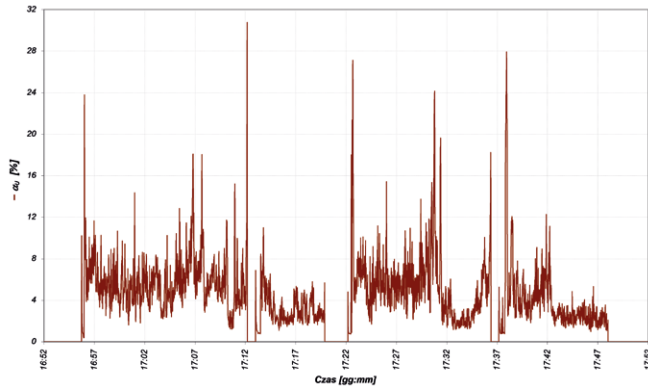
Celem analizy zarejestrowanych danych pomiarowych było określenie współczynników asymetrii napięć i prądów według wzorów (5) i (8), w wybranych punktach toru zasilania na poszczególnych poziomach napięć toru zasilania pieca łukowego, oddalonych od źródła zaburzeń, tj. łuku. W badanej instalacji pieca rozróżnia się trzy poziomy:

- poziom napięcia niskiego – strona dolna transformatora piecowego (elektrody pieca);
- poziom średniego napięcia – strona górna transformatora piecowego i strona dolna transformatora sieciowego;
- poziom wysokiego napięcia – strona górna transformatora sieciowego, punkt wspólnego przyłączenia do systemu.

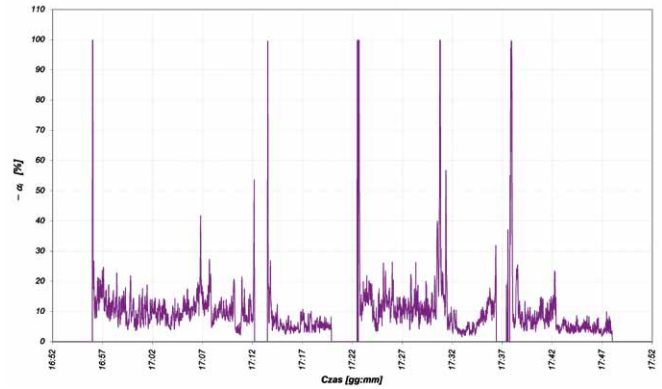
Dla tych trzech poziomów wyznaczono zmienności współczynników asymetrii napięć dla pełnego cyklu wytopu, tj. pierwszego i drugiego kosza złomowego. Odpowiednie wykresy dla poziomu niskiego napięcia (strona wtórna TP) i wysokiego napięcia (strona pierwotna TS) zamieszczono na rysunkach 9 i 10. Największe wartości współczynnika asymetrii napięć widoczne są dla stanu załączenia pieca i zmian pozycji przełącznika zaczeptów transformatora piecowego. Źródłem zaburzeń jest łuk elektryczny, który w obwodzie niskiego napięcia powoduje, że maksymalne wartości asymetrii napięciowej α_u mieszczą się w przedziale od 18% do 31% (rys. 9), przy wartości średniej dla I kosza ~6% i dla II kosza ~4,5% (tabela 2).

Zakres zmian współczynnika asymetrii α_u na poziomie średniego napięcia (strona pierwotna TP) odpowiada w zasadzie profilowi przedstawionemu na rysunku 3. Jednak wartości tych współczynników są nieco mniejsze, bowiem α_{umax} mieszczą się w przedziale 14–21,5%.

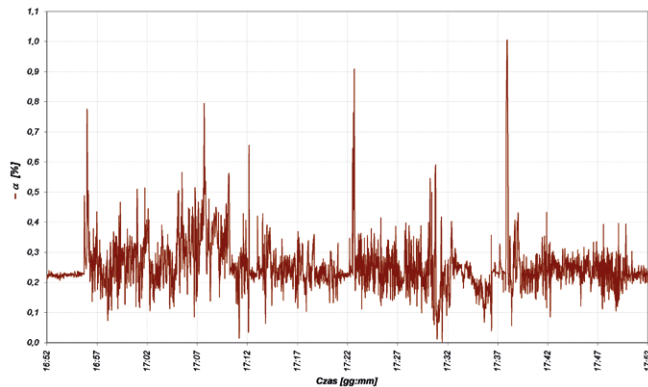
Najniższe wartości maksymalnych wskaźników asymetrii napięć występują na poziomie przyłączenia instalacji pieca łukowego do systemu elektroenergetycznego. Ich wartości w zasadzie nie przekraczają 1% (rys. 10).



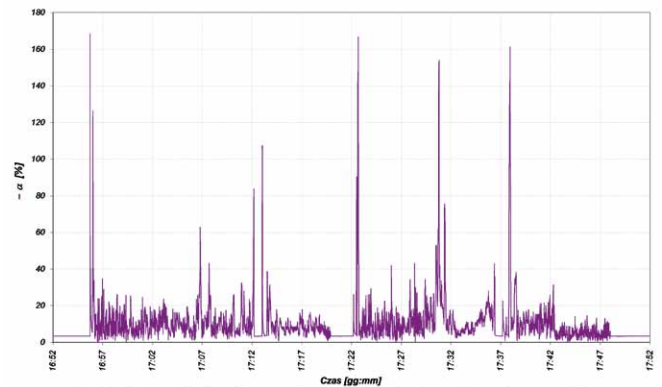
Rys. 9. Współczynnik asymetrii napięć strony wtórnej transformatora piecowego (TP-w)



Rys. 11. Współczynnik asymetrii prądów strony wtórnej transformatora piecowego (TP-w)



Rys. 10. Współczynnik asymetrii napięć strony pierwotnej transformatora sieciowego (TS-p)



Rys. 12. Współczynnik asymetrii prądów strony pierwotnej transformatora sieciowego (TS-p)

W celach porównawczych w tabeli 2 zestawiono wartości współczynników asymetrii α_u dla trzech miejsc pomiaru: TP-w (strona wtórna transformatora TP – elektrody pieca), TP-p (strona pierwotna transformatora TP – średnie napięcie) i TS-p (strona pierwotna transformatora TS – punkt wspólnego przyłączenia).

Podobną analizę przeprowadzono dla prądów fazowych w torze prądowym pieca łukowego, wyznaczając współczynniki asymetrii prądowej α_I dla trzech miejsc pomiarowych. Wykresy zmian współczynników asymetrii prądowych α_I przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

W zasadzie można stwierdzić, iż ich profile są niemal identyczne, a wartości w przybliżeniu porównywalne. W chwili załączenia pieca podczas I i II kosza, jak również po ponownym załączeniu pieca do pracy po zadziałaniu zabezpieczeń, asymetria prądów α_I osiąga wartość 100% (rys. 11). W przebiegu zmian α_I na poziomie średniego napięcia, w którym występuje węzeł prądowy z filtrami wyższych harmonicznych, w stanach załączenia pieca asymetria prądów wzrasta do wartości 135% i 130%.

Podobny charakter zauważalny jest w wykresie zaprezentowanym na rysunku 12. Na poziomie systemu elektroenergetycznego asymetria prądów podczas załączenia pieca łukowego

Tabela 2. Wartości współczynników asymetrii napięć α_u

Miejsce pomiaru	I kosz			II kosz		
	$\alpha_{u\max}$ [%]	$\alpha_{u\min}$ [%]	α_{uav} [%]	$\alpha_{u\max}$ [%]	$\alpha_{u\min}$ [%]	α_{uav} [%]
TP-w	31	2	6	28	2	4,5
TP-p	21,5	1	3	18	1	2,5
TS-p	0,8	0,05	0,2	1,0	0,05	0,2

Tabela 3. Wartości współczynników asymetrii prądów α_I

Miejsce pomiaru	I kosz			II kosz		
	$\alpha_{I\max}$ [%]	$\alpha_{I\min}$ [%]	α_{Iav} [%]	$\alpha_{I\max}$ [%]	$\alpha_{I\min}$ [%]	α_{Iav} [%]
TP-w	100	5	10	100	5	10
TP-p	135	5	10	130	5	10
TS-p	170	4	8	170	4	8

do pracy osiąga wartości ok. 170%, natomiast w stanie quasi-ustalonym ma średnią wartość ok. 8% (tabela 3).

W tabeli 3 zestawiono wartości maksymalne, minimalne i średnie współczynników asymetrii prądowych wyznaczone dla trzech miejsc toru zasilania pieca na podstawie analizy

zarejestrowanych przebiegów prądów oraz wskaźników obliczonych według wzorów (8) i (9).

Konsekwencją niesymetrii prądów fazowych pieca łukowego jest asymetria mocy w piecu. Prowadzi to do nierównomiernego obciążenia cieplnego wewnętrznych ścian pieca (zużycia okładziny) i szybszego zużywania się elektrod faz bardziej obciążonych [12].

7. Impedancje fazowe toru zasilania

Przyczyną asymetrii prądów w instalacji zasilania pieca łukowego jest nierównomierność impedancji toru wielkopiędowego oraz zmienne dynamicznie nieliniowe impedancje łuków w poszczególnych fazach. Impedancje fazowe (moduł impedancji w postaci zespolonej) w wybranych punktach toru zasilania, jako wielkości uśrednione (w przedziałach jednosekundowych) ilorazu napięcia i prądu podstawowej harmonicznej, uzyskanych w wyniku transformaty FFT przebiegów odkształconych, wyznaczono według zależności (10):

$$|Z_{x(1)}| = |R_{x(1)} + jX_{x(1)}| = \frac{1}{50} \sum_{k=1}^{50} \left| \frac{U_{x(1)}^{(k)}}{I_{x(1)}^{(k)}} \right| \quad (10)$$

gdzie:

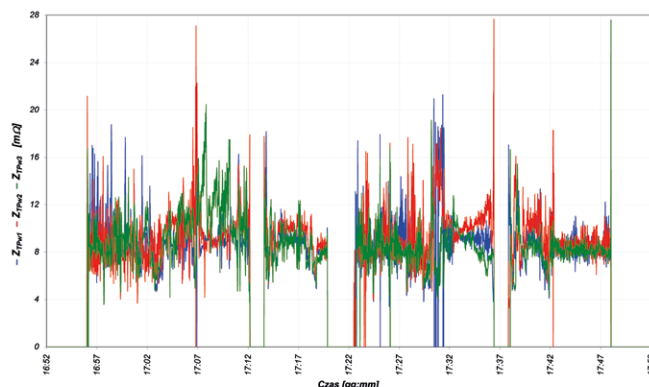
- k – nr okresu w przedziale jednosekundowym;
- $x \in \{L1, L2, L3\}$ – faza toru zasilania.

Na podstawie wzoru (10) dla pełnego cyklu wytopu wyznaczono wartości impedancji po stronie wtórnej i pierwotnej transformatora piecowego TP. Wyniki przedstawiono w formie wykresów na rysunkach 13 i 14.

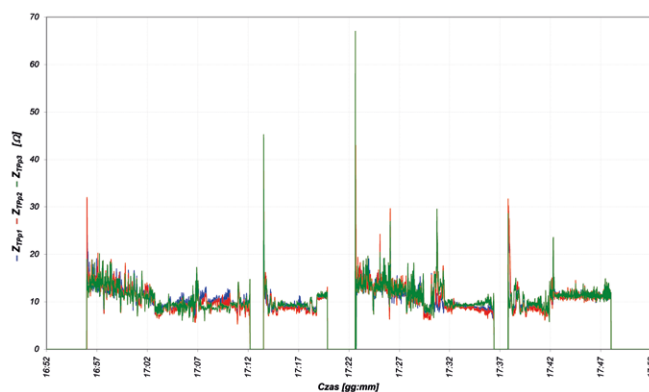
Uzupełnieniem wykresów są dane zestawione w tabeli 4, obejmujące średnie, maksymalne i minimalne wartości impedancji poszczególnych faz wyznaczone dla trzech charakterystycznych etapów cyklu wytopu (roztapianie I kosz złomu, roztapianie II kosz złomu i faza rafinacji – koniec wytopu), reprezentatywne 4-minutowe przedziały czasu. Wartości średnie impedancji przedstawiono również w postaci zespolonej z podziałem na część rzeczywistą (rezystancja) i urojona (reaktancja).

Można stwierdzić, że wartości średnie impedancji fazowych różnią się nieznacznie, jeśli rozpatruje się dany etap cyklu wytopu. Dotyczy to zarówno strony pierwotnej, jak i wtórnej transformatora piecowego. Natomiast odchylenia od średniej wartości impedancji fazowej są największe podczas roztapiania II kosza złomu, a najmniejsze w trakcie rafinacji stali pod koniec wytopu, gdy piec pracuje spokojnie.

Zmiany impedancji wyznaczone po stronie średniego napięcia transformatora piecowego (rys. 14) są mniej burzliwe niż zmiany impedancji po stronie toru wielkopiędowego pieca. Wynika to z wygładzającego wpływu reaktancji zwarcia



Rys. 13. Wykres zmian impedancji fazowych strony wtórnej transformatora piecowego



Rys. 14. Wykres zmian impedancji fazowych strony pierwotnej transformatora piecowego

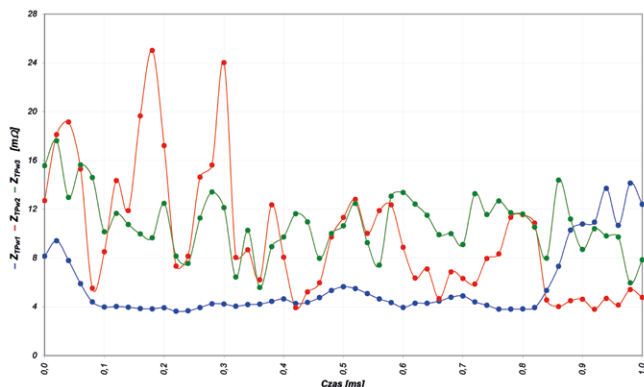
transformatora piecowego, która przy pracy na danym zaczepie jest stała. Szczególnie interesujące są natomiast przebiegi zmian modułu impedancji fazowych strony wtórnej transformatora piecowego (rys. 13). Impedancja ta zawiera bowiem dwie składowe: impedancję toru wielkopiędowego pieca wraz z elektrodami oraz impedancję łuku $|Z_L| = R_L + jX_L$. Znając parametry zwarcia trójfazowego elektrod pieca oraz rezystancję elektrod, można oszacować impedancję łuku. Jak wynika z analizy dokonanej w pracy [8] oraz danych zamieszczonych w tabeli 4, reaktancja indukcyjna łuku jest niewielka, a decydujące znaczenie ma rezystancja łuku wynikająca z jego długości i związana z napięciem. Dlatego przy roztapianiu wsadu i zmianie jego geometrii dynamicznie zmiany długości i rezystancji łuku, korygowane ze zwłoką przez napęd hydrauliczny elektrod, skutkują wahaniami i odkształceniem prądów pieca, co ilustruje rysunek 6. O asymetrii obwodu wtórnego na zasilaniu toru wielkopiędowego pieca i dynamice zmian w początkowym

reklama

reklama

Tabela 4. Wartości impedancji fazowych

Strona wtórna TP				
Cykl pracy pieca		Wartości średnie impedancji fazowych [mΩ]		
Faza		L1	L2	L3
Roztapianie I kosz	średnia	9,19 8,09 + j4,37	8,53 7,34 + j4,35	8,75 7,69 + j4,18
	min ÷ max	3,83 ÷ 16,61	4,04 ÷ 15,86	3,58 ÷ 16,59
Roztapianie II kosz	średnia	8,94 7,82 + j4,34	8,99 7,79 + j4,5	8,74 7,54 + j4,42
	min ÷ max	3,40 ÷ 17,76	3,95 ÷ 18,15	4,39 ÷ 19,24
Rafinacja	średnia	8,37 7,51 + j3,7	8,57 7,53 + j4,09	8,17 7,13 + j4,0
	min ÷ max	6,38 ÷ 11,03	7,0 ÷ 10,27	7,03 ÷ 9,52
Strona pierwotna TP				
Cykl pracy pieca		Wartości średnie impedancji [Ω]		
Faza		L1	L2	L3
Roztapianie I kosz	średnia	13,52 10,8 + j8,13	13,72 11,0 + j8,2	13,43 10,9 + j7,85
	min ÷ max	7,54 ÷ 23,2	7,56 ÷ 20,3	7,77 ÷ 20,2
Roztapianie II kosz	średnia	13,76 11,1 + j8,15	13,79 11,0 + j8,33	13,77 11,05 + j8,2
	min ÷ max	7,93 ÷ 27,9	6,43 ÷ 29,6	7,47 ÷ 26,9
Rafinacja	średnia	11,36 9,37 + j6,42	11,29 9,17 + j6,6	11,48 9,44 + j6,54
	min ÷ max	10,29 ÷ 12,9	9,91 ÷ 14,55	10,36 ÷ 13,9



Rys. 15. Wykres zmian impedancji fazowych strony wtórnej transformatora piecowego w przedziale 1-sekundowym na początku procesu roztopienia wsadu

etapie procesu wytopu świadczą przebiegi impedancji fazowych (co okres $T = 20$ ms), w przedziale 1-sekundowym pokazane na rysunku 15.

8. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań asymetrii napięć i prądów w wybranych miejscach toru zasilania pieca łukowego AC. Punkty pomiarowe dobrane zostały dla trzech poziomów napięć od niskiego, podłączonego do toru wieloprądowego pieca, po wysoki w punkcie wspólnego przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. W badanej instalacji źródłem zaburzeń jest łuk elektryczny będący elementem nieliniowym z chaotycznie zmienną rezystancją, zależnie od długości łuku oraz


pozycji przełącznika zaczeów transformatora piecowego determinującego wartość napięcia strony wtórnej. Przedstawione na rysunkach 9 i 10 zmiany współczynników asymetrii napięć α_u pokazują, iż największa asymetria występuje u źródła zaburzeń, tj. na poziomie niskiego napięcia w czasie roztopienia złomu. W miarę wzrostu poziomu napięcia wzdłuż toru zasilania pieca asymetria napięć maleje, uzyskując wartości poniżej 1% w punkcie przyłączenia do sieci wysokiego napięcia. Natomiast asymetria prądów fazowych α_i w instalacji zasilania pieca łukowego AC utrzymuje się na stałym poziomie, a w węzle średniego napięcia, gdzie przyłączone są trzy gałęzie pasywnych filtrów wyższych harmonicznych (rys. 1), następuje nawet wzrost asymetrii, szczególnie w stanach przejściowych podczas załączenia pieca łukowego (rys. 11 i 12). Świadczy to o pogorszeniu się warunku symetryzacji prądów fazowych. Do uzyskania pełnej symetrii prądów fazowych z jednoczesnym wyeliminowaniem wyższych harmonicznych najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie filtru aktywnego.

Obliczenie impedancji zastępczej, szczególnie dla obwodu wtórnego transformatora piecowego, jest bardzo istotne z uwagi na identyfikację parametrów R i X łuku elektrycznego. Znajomość wartości tych parametrów jest niezbędna do wprowadzenia właściwych nastaw układu kontroli stanów pieca FCS. Ponadto jest przydatna do modelowania, z wykorzystaniem narzędzi komputerowych, wpływu pracy pieca łukowego AC na elektroenergetyczną sieć wysokiego napięcia.

Literatura

- [1] ALONSO M.A.P., DONSIÓN M.P.: *An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis*. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 19, Issue 1, January 2004.
- [2] BAGGINI A. (EDITOR): *Handbook of Power Quality*. University of Bergamo-Italy, John Wiley & Sons, Ltd, USA 2008.
- [3] CZARNECKI L.S.: *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [4] IEC 61000-4-30: *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*.
- [5] JAGIEŁA K., GAŁA M.: *Nomograficzna metoda wyznaczania współczynnika asymetrii w trójfazowych sieciach elektroenergetycznych*. „Przegląd Elektrotechniczny” 1(80)/2004.
- [6] JAGIEŁA K., GAŁA M., KĘPIŃSKI M., RAK J.: *Influence of Harmonic Filters on the Operation of AC Arc Furnace Power Installation* (in:) Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS), 12–14 Nov. 2018, Kielce, Poland.
- [7] JAGIEŁA K., GAŁA M., RAK J., KĘPIŃSKI M.: *Eksperymentalny pomiar parametrów i charakterystyk hydraulicznego napędu elektrod pieca łukowego*. „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej” 54/2017.
- [8] JAGIEŁA K., RAK J., GAŁA M., KĘPIŃSKI M.: *Identification of Electric Power Parameters of AC Arc Furnace Low Voltage System*. 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP 2010, 26–29 Sept. 2010, Bergamo.

- [9] KHOSHKHOO H., SADEGHI S.H.H., MOINI R., TALEBI H.A.: *An efficient power control scheme for electric arc furnaces using online estimation of flexible cable inductance*. „Computers and Mathematics with Applications” Vol. 62, Issue 12, December 2011.
- [10] LIU Y.J., CHANG G.W., HONG R.C.: *Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an ac electric arc furnace*. „Electric Power Systems Research” 80/2010.
- [11] MONTANARI G.C., LOGGINI M., CAVALLINI A., PITTI L., ZANINELLI D.: *Arc-model furnace for study of flicker compensation in electrical networks*. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, Issue 4, October 1994.
- [12] NIKOLAEV A.A., TULUPOV P.G.: *Method of Setting Optimum Asymmetric Mode of Operation of Electric Arc Furnace*. Proceedings 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)/17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), 15–17 June 2016, Compiègne, France.
- [13] RAK J.: *Influence of AC arc furnace on parameters of industrial medium-voltage network*. Proceedings 5th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU'99, Cracow, Poland, 1999.
- [14] RAK J., GAŁA M., JAGIEŁA K., KĘPIŃSKI M.: *Wpływ parametrów instalacji zasilania pieca łukowego na wskaźniki elektroenergetyczne procesu wytopu stali*. „Przegląd Elektrotechniczny” 1(93)/2017.
- [15] RYFF P.F.: *Calculation of arc-circuit asymmetry in electric-arc furnaces*. Electrical and Computer Engineering Publications and Research. Paper 16, 1983. <http://digitalcommons.ryerson.ca/ee/16>.
- [16] SHURYGIN Y.A.: *Symmetry of Arc Furnace Operation*. Steel in Translation, Vol. 47, Issue 11, 2017.
- [17] WĄSOWSKI A.: *Wpływ rzeczywistych warunków eksploatacyjnych trójfazowego pieca łukowego na kryterium maksymalnej wydajności oraz sprawność ogólną*. „Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej” Tom VI, Zeszyt 1, 2000.
- [18] VERVENNE I., VAN REUSEL K., BELMANS R.: *Electric arc furnace modeling from a „power quality” point of view*. Proceedings 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU 2007, 9–11 Oct. 2007, Barcelona, Spain.

 dr hab. inż. Kazimierz Jagieła, prof. ATH,
e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com
Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki;
dr inż. Janusz Rak, e-mail: jrak@el.pcz.czyst.pl
dr inż. Marek Gała, e-mail: m.gala@el.pcz.czyst.pl
Politechnika Częstochowska Wydział Elektryczny

artykuł recenzowany

reklama

reklama