ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1979

Seria: HUTNICTWO z. 18 Nr kol. 606

Aleksy KURBIEL

Instytut Automatyki Napędu
i Urządzeń Przemysłowych AGH

POMIARY ELEKTRYCZNE PIECÓW ŁUKOWYCH DLA USTALENIA NAJKORZYSTNIEJSZEGO PRĄDU ROZTAPIANIA WSADU

Streszczenie. Prąd roztapiania wsadu powinien być mniejszy od prądu I_c maksymalnej mocy łuków oraz większy od prądu I_e, przy którym energia zużyta na roztopienie 1 tony wsadu jest najmniejsza. Dla obliczenia tych prądów należy zmierzyć odpowiednie parametry elektryczne toru wielkoprądowego oraz wyznaczyć moc strat cieplnych pieca. Parametry toru najlepiej jest zmierzyć metodą 2-fazowych zwarć eksploatacyjnych, zaś moc strat cieplnych można wyznaczyć na podstawie odpowiednich pomiarów licznikowych.

Podano przykład liczbowy wyznaczania najkorzystniejszego prądu roztapiania wsadu.

1. WSTĘP

Jakość pracy pieca łukowego ocenia się na podstawie jego wskaźników. Jednym z podstawowych wskaźników jest wydajność roztapiania zwana przelotnością pieca g [t/h], określona jako stosunek masy wsadu m [t] do czasu τ [h] jego roztapiania:

$$g = \frac{m}{\tau}. \tag{1}$$

Drugim ważnym wskaźnikiem jest zużycie jednostkowe (właściwe) energii elektrycznej e [kWh/t] na roztopienie wsadu, określone jako stosunek energii elektrycznej E [kWh] zużytej na roztopienie do masy roztopionego wsadu:

$$e = \frac{E}{m}. \tag{2}$$

Piec łukowy osiąga największą przelotność g, gdy czas roztapiania wsadu τ jest najkrótszy. Czas τ można wyznaczyć z zależności

$$\tau = \frac{e_u m}{P_\Sigma - P_{sc}}, \tag{3}$$

przy czym:

e_u - teoretyczne zużycie jednostkowe energii elektrycznej na roztopienie wsadu, wynoszące około 340 kWh/t [5],

$P_ł$ - moc łuków,

P_{sc} - moc strat cieplnych pieca. W dalszych rozważaniach przyjmuje się że moc P_{sc} jest stała w okresie roztapiania wsadu.

Z zależności (3) wynika, że minimalny czas roztapiania wsadu, a więc i maksymalna przelotność występują przy maksymalnej mocy łuków $P_{łg}$, wynoszącej

$$P_{łg} = \frac{U_p^2}{2(R + \sqrt{R^2 + X^2})}, \tag{4}$$

przy czym:

U_p - napięcie międzyprzewodowe w rozdzielni piecowej,

R, X - rezystancja i reaktancja układu zasilającego piec.

Moc ta występuje przy prądzie

$$I_g = \frac{U_p}{\sqrt{6(R^2 + X^2 + R\sqrt{R^2 + X^2})}}. \tag{5}$$

Najmniejsze jednostkowe zużycie energii zachodzi wtedy, gdy sprawność elektrotermiczna η_{et} urządzenia łukowego, określona zależnością

$$\eta_{et} = \frac{e_u m}{E}, \tag{6}$$

osiąga maksimum. Wynika to z zależności

$$e = \frac{e_u}{\eta_{et}}. \tag{7}$$

Największa sprawność η_{et} i najmniejsza wartość e występują przy prądzie

$$I_e = \frac{U_p}{\sqrt{\frac{3U_p^2}{P_{sc}} R + 6X^2}}, \tag{8}$$

Prąd $I_e \leq I_g$, gdy zachodzi nierówność $P_{sc} \leq P_{łg}$, która zawsze jest spełniona.

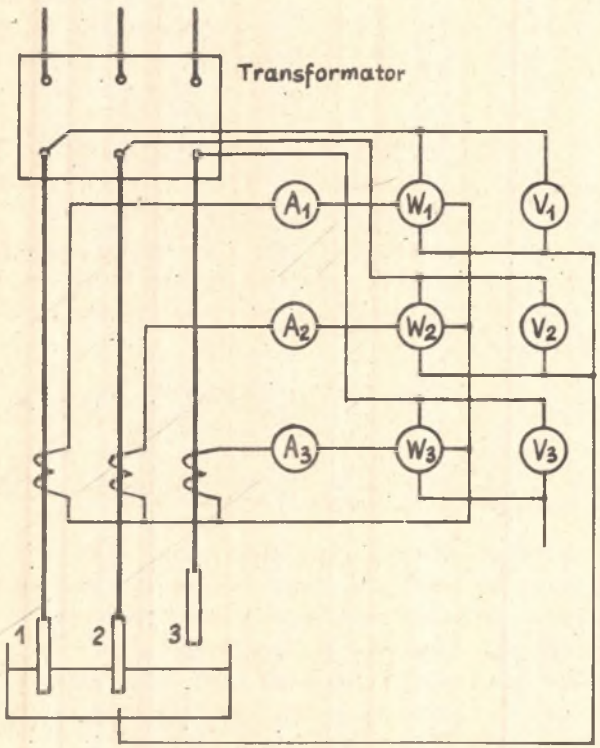
Korzystnie jest roztapiać wsad przy prądzie I spełniającym nierówności

$$I_e < I < I_g. \tag{9}$$

Zmiana prądu roboczego w przedziale $[I_e, I_g]$ powoduje pogorszenie jednego z omawianych wskaźników a polepszenie drugiego. Gdy natomiast $I < I_e$ lub $I > I_g$, to następuje pogorszenie obu wskaźników.

2. POMIARY PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH TORU WIELKOPRĄDOWEGO

Dla obliczenia prądu I_g potrzebna jest znajomość rezystancji R i reaktancji X układu zasilającego piec. Oporności transformatora i dławika można obliczyć na podstawie wyników badań tych urządzeń, podanych przez wytwórcę. Natomiast oporności toru wielkoprądowego należy zmierzyć odpowiednią metodą.



Rys. 1. Układ pomiarowy toru wielkoprądowego

Opracowanych jest wiele metod pomiarowych toru. Przedstawiona zostanie wielokrotnie sprawdzona metoda dwufazowych zwarć eksploatacyjnych. Układ pomiarowy pokazano na rys. 1. Pomiaru dokonuje się po przełączeniu transformatora na najniższe napięcie wtórne oraz po zanurzeniu do płynnego metalu dwóch elektrod, np. pierwszej i drugiej, a podniesienie ponad metal trzeciej elektrody, aby łuk nie płonął. Mierząc w tym przypadku prądy $I_1 = I_2$, moc strat P_1, P_2 i napięcia U_1, U_2 na fazach toru, można obliczyć rezystancje zwartych faz

$$R_{t1} = \frac{P_1}{I_1^2}; \quad R_{t2} = \frac{P_2}{I_2^2},$$

oraz reaktancje

$$X_{12} = \omega(L_{t1} - M_{12}) = \sqrt{\left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2 - R_{t1}^2};$$

$$X_{21} = \omega(L_{t2} - M_{12}) = \sqrt{\left(\frac{U_2}{I_2}\right)^2 - R_{t2}^2},$$

przy czym:

L_{ti} $(i = 1, 2, 3)$ - indukcyjność własna i-tej fazy toru;

M_{12}, M_{23}, M_{13} - indukcyjności wzajemne pomiędzy fazami toru; pierwszą i drugą, drugą i trzecią, pierwszą i trzecią.

Podobne pomiary i obliczenia należy wykonać dla dwóch pozostałych przypadków zwarć 2-fazowych toru: przy zwarciu elektrody drugiej z trzecią oraz pierwszej z trzecią. W ten sposób otrzymuje się więc wartości pozostałych parametrów toru

$$R_{t3}; \quad X_{23} = \omega(L_{t2} - M_{23}); \quad X_{32} = \omega(L_{t3} - M_{23})$$

$$X_{13} = \omega(L_{t1} - M_{13}); \quad X_{31} = \omega(L_{t3} - M_{13}).$$

W czasie pomiarów należy utrzymywać uchwyty zwartych elektrod na jednakowym poziomie, gdyż takie wzajemne położenie tych uchwytów występuje najczęściej przy normalnej pracy pieca. Poza tym przewody napięciowe należy ułożyć w dużej odległości od toru.

Na podstawie powyższych parametrów toru można badać dowolne stany pracy pieca. Na przykład przy założeniu symetrii prądów pieca rezystancje uogólnione i reaktancje toru wyznaczają zależności

$$R_{u1} = R_{t1} + \frac{\sqrt{3}}{2}(x_{13} - x_{12}); \quad x_1 = \frac{1}{2}(x_{13} + x_{12})$$

$$R_{u2} = R_{t2} + \frac{\sqrt{3}}{2}(x_{21} - x_{23}); \quad x_2 = \frac{1}{2}(x_{21} + x_{23}) \tag{10}$$

$$R_{u3} = R_{t3} + \frac{\sqrt{3}}{2}(x_{32} - x_{31}); \quad x_3 = \frac{1}{2}(x_{32} + x_{31})$$

Nierówności tych rezystancji i reaktancji powodują występowanie niekorzystnego zjawiska fazy mocnej i słabej pieca. W celu wyeliminowania tego zjawiska stosuje się tory triangulacyjne, którego fazy ułożone są tak, że w przekroju poprzecznym wyznaczają w przybliżeniu trójkąt równoboczny.

3. WYZNACZENIE STRAT CIEPLNYCH PIECA

Dla obliczenia prądu I_e (wzór (8)) konieczna jest znajomość mocy strat cieplnych pieca P_{sc}. Moc tę można wyznaczyć na podstawie odpowiednich pomiarów licznikowych.

Energia E pobrana przez urządzenie piecowe w czasie τ roztapiania wsadu składa się z energii użytkowej E_u, strat elektrycznych E_{se} i strat cieplnych pieca E_{sc}:

$$E = E_u + E_{se} + E_{sc}. \tag{11}$$

Energia E jest mierzona w każdym urządzeniu łukowym, zaś energię użyteczną można wyznaczyć ze wzoru

$$E_u = e_u m. \tag{12}$$

Straty elektryczne wyznacza zależność

$$E_{se} = R_1 \int_0^{\tau} I_1^2 d\tau + R_2 \int_0^{\tau} I_2^2 d\tau + R_3 \int_0^{\tau} I_3^2 \, d\tau, \tag{13}$$

w której $R_i = R_{ti} + R_T + R_D$; R_T, R_D - rezystancja transformatora i dławika. Wartość $\int_0^{\tau} I_1^2 d\tau$ można zmierzyć licznikami amperkwadratgodzin, a następnie znając wartości R_i - obliczyć straty E_{se}.

Straty cieplne można wyznaczyć z zależności:

$$E_{sc} = E - E_u - E_{se}. \tag{14}$$

Wartość średnia mocy strat cieplnych pieca P_{sc} za okres τ roztapiania wsadu wynosi

$$P_{sc} = \frac{E - E_u - E_{se}}{\tau}. \tag{15}$$

Przedstawiony sposób wyznaczania mocy P_{sc} jest bardzo prosty. Konieczne jest przy tym zainstalowanie w układzie pomiarowym urządzenia łukowego dodatkowo trzech liczników amperkwadratgodzin oraz zmierzenie poprzednio podaną metodą rezystancji fazowych R_i.

Należy zaznaczyć, że jakkolwiek moc strat cieplnych P_{sc} przyjęto jako wartość stałą w czasie jednego roztapiania wsadu, to jednak moc ta zmienia się po wielu wytopach i to tym więcej, im bardziej zużyte zostanie wymurowanie i sklepienie pieca. Z tego powodu moc P_{sc} należy wyznaczać w czasie wielu wytopów prowadzonych w różnych warunkach, a następnie obliczyć wartość średnią.

4. PRZYKŁAD LICZBOWY

Dla pieca łukowego o pojemności wsadowej 15 t zostaną wyznaczone prądy I_g oraz I_e. Piec ten zasilany jest przez transformator o następujących danych odpowiadających najwyższemu napięciu wtórnemu:

$$S = 9000 \text{ kVa}$$

$$U_1 = 6000 \text{ V} \qquad I_1 = 866 \text{ A}$$

$$U_2 = 270 \text{ V} \qquad I_2 = 19245 \text{ A}$$

Rezystancja i reaktancja transformatora przeliczone na stronę wtórną wynoszą

$$R_T = 0{,}09 \text{ m}\Omega; \quad X_T = 0{,}46 \text{ m}\Omega$$

Do układu zasilającego jest włączony dławik o trzech zaczepach i odpowiadających im reaktancjach:

$$X_{D1} = 0{,}889\Omega; \quad X_{D2} = 0{,}666\Omega; \quad X_{D3} = 0{,}577\Omega.$$

Przy piecu zastosowano triangulacyjny tor wielkoprądowy. Jego parametry elektryczne, zmierzone opisaną metodą zwarć 2-fazowych, wynoszą

$$R_{t1} = 0{,}51\ m\Omega; \quad R_{t2} = 0{,}48\ m\Omega; \quad R_{t3} = 0{,}65\ m\Omega,$$

$$X_{12} = 2{,}36\ m\Omega; \quad X_{13} = 2{,}46\ m\Omega; \quad X_{21} = 2{,}50\ m\Omega,$$

$$X_{23} = 2{,}40\ m\Omega; \quad X_{32} = 2{,}43\ m\Omega; \quad X_{31} = 2{,}51\ m\Omega.$$

Tor ten odznacza się małą asymetrią konstrukcyjną. W dalszych obliczeniach posłużono się wartościami średnimi jego rezystancji i reaktancji:

$$R_t = \frac{1}{3}(R_{t1} + R_{t2} + R_{t3}) = 0{,}55\ m\Omega,$$

$$X_t = \frac{1}{6}(X_{12} + X_{13} + X_{21} + X_{23} + X_{32} + X_{31}) = 2{,}44\ m\Omega.$$

Układ zasilający przy zwartym dławiku odznacza się więc rezystancją $R = R_T + R_t = 0{,}64\ m\Omega$ i reaktancją $X = X_T + X_t = 2{,}90\ m\Omega$, zaś prąd 3-fazowego zwarcia eksploatacyjnego osiąga wartość

$$I_{zw} = \frac{U_2}{\sqrt{3(R^2 + X^2)}} = 52{,}5\ kA.$$

Ponieważ prąd ten jest mniejszy od 3-krotnej wartości prądu znamionowego, dlatego dławik w układzie zasilającym jest niepotrzebny.

Prąd maksymalnej mocy łuków, obliczony ze wzoru (5), wynosi

$$I_g = 33{,}7\ kA.$$

Jest on 1,75-krotnie większy od prądu znamionowego. Przy prądzie I_g występuje moc łuków

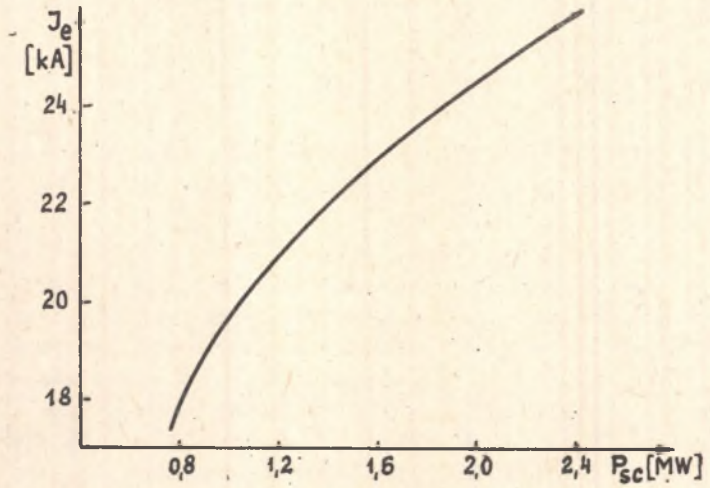
$$P_{łg} = 10{,}1\ MW.$$

Dla podanych parametrów elektrycznych układu zasilającego piec przedstawiono na rys. 2 zależność prądu I_e minimalnego zużycia jednostkowego energii od mocy strat cieplnych pieca P_{sc}. Widać z niej, że przy wzroście mocy P_{sc} rośnie również prąd I_e, czyli zawęża się przedział prądów $[I_e, I_g]$. Na przykład przy mocy $P_{sc} = 1{,}6$ MW prąd I_e ma wartość

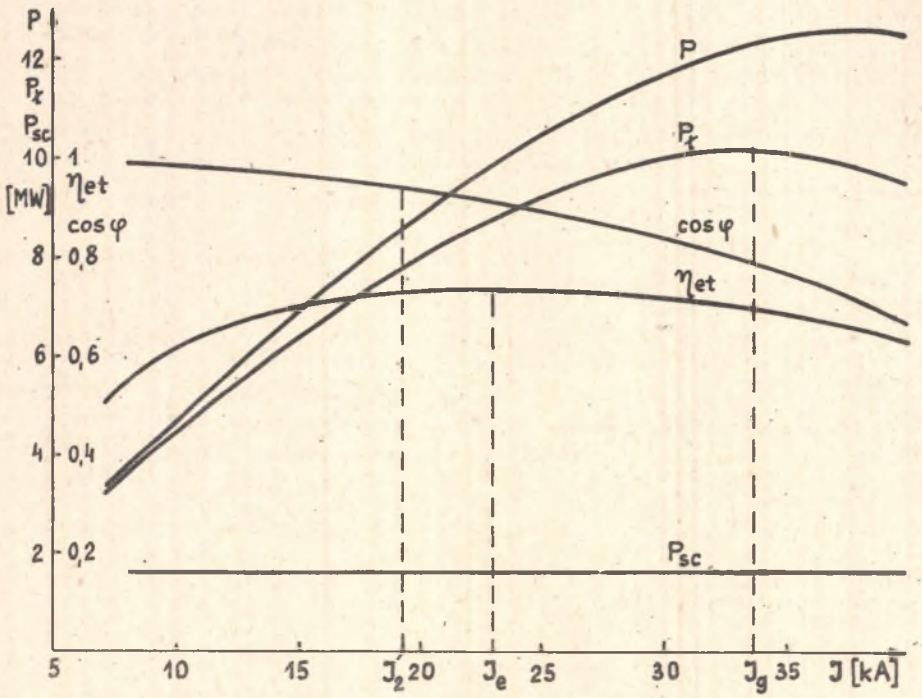
$$I_e = 23{,}0\ kA,$$

zaś odpowiadająca mu moc łuków

$$P_{łe} = 8{,}71\ MW.$$



Rys. 2. Zależność prądu I_e od mocy P_{sc} strat cieplnych pieca



Rys. 3. Charakterystyki robocze pieca

Charakterystyki robocze pieca z zaznaczonymi prądami I_2, I_e oraz I_g podano na rys. 3. Z przebiegu tych charakterystyk widać, że korzystne jest przeciążanie prądowe pieca w czasie roztapiania wsadu. Wartość prądu roboczego zależeć będzie w takim przypadku od dopuszczalnej temperatury nagrzania transformatora i toru wielkoprądowego.

5. WNIOSKI

1. Na podstawie dokładnej znajomości parametrów elektrycznych toru wielkoprądowego można ustalić, czy wymagany jest dławik w układzie zasilającym piec i ewentualnie, na którym zaczepie należy go włączyć do układu.

2. Przy najwyższych napięciach wtórnych transformatora piecowego prąd I_g maksymalnej mocy łuków, przy którym osiąga się największą wydajność roztapiania, jest na ogół dużo większy od prądu znamionowego, zaś prąd I_e, przy którym występuje najmniejsze jednostkowe zużycie energii, maleje wraz ze zmniejszaniem się mocy strat cieplnych pieca.

3. W rozpatrywanym przypadku pieca celowe jest jego przeciążanie prądowe, tak aby prąd roztapiania wsadu był równy lub większy od prądu I_e, o ile zezwala na to układ zasilający. Praca pieca przy dużym prądzie jest korzystna również ze względu na małe długości łuków, dzięki czemu zmniejsza się ich wpływ na niszczenie wymurowania i sklepienia pieca.

4. Przy ograniczeniach mocy w elektrostalowni niekorzystne jest odciążanie prądowe pieców. Należy wtedy część pieców wyłączyć, a pozostałe eksploatować przy prądach optymalnych.

LITERATURA

[1] Bartman Ch., Kułow P.: Objem i rezultaty issledowanij po racjonalizacii dugowych stalepławilnych elektropieczej. Wsjemirnyj Elektrotechniczeskij Kongress, Moskwa 1977.

[2] Bowman B.: Electrical characteristics of arc furnaces allowing for current swings. Union Internationale D'Electrothermie, VIII^e Congres, Liege 1976.

[3] Bulajić R.P.: Mesure des parametrès électriques d'un four à arc. Union Internationale D'Electrothermie, VIII^e Congrès, Liege 1976.

[4] Kurbiel A.: Zarys teorii stanów pracy elektrycznych urządzeń łukowych. AGH, Elektryfikacja i Mechanizacja Górn. i Hutn., z. 42, 1971.

[5] Schwartz T.: Wyznaczanie wielkości charakteryzujących stalownicze urządzenia łukowe. Rozprawy Elektrotechniczne, z. 2, 1961.

[6] Stojanow S.D.: Elektriczeskije charakteristiki i parametry elektrodugowych stalepławilnych pieczej w Bołgarii. Wsjemirnyj Elektrotechniczeskij Kongress, Moskwa 1977.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ САМЫХ ПОЛЕЗНЫХ ТОКОВ РАСПЛАВЛЕНИЯ ШИХТЫ

Р е з ю м е

Ток расплавления шихты должен быть меньше чем ток I_g максимальной мощности дуг, а также больше чем ток I_e, при котором расход энергии на расплавление I тонны шихты являтся меньшей. Для вычисления этих токов следует произвести измерение соответствующие электрические параметры большого тока пути, а также определить мощность расхода тепла печи. Параметры пути измерить наилучше методом 2-фазных эксплуатационных замыканий, мощность расхода тепла можно определить на основе соответствующих счётчиковых измерений.

Приводится численный пример определения самого полезного тока расплавления шихты.

THE ELECTRIC MEASURMENTS OF ARC FURNACES AIMING AT DEFINING THE MOST APPROPRIATE CURRENT OF MELTING DOWN THE CHARGE

S u m m a r y

The current of melting down the charge should be smaller than I_g - the current of maximum arc power, at which the energy used for melting down 1 ton of ingot is the smallest. In aim to calculate the values of these currents the appropriate parameters of electric high-current lead should be measured, and the powe of the furnace heat losses should be determined. The best method of measurment of the electric parameters of the high-current lead is the two-phase exploitation faults method, and the appropriate meter indications are the most reasonable basis of heat parameters (heat losses) determination.

. The numerical example of determination of the optimum current of melting down the charge.