

Zbigniew DMOCHOWSKI

Wojciech KOWALSKI

PROBLEMATYKA POMIARU NAPIĘCIA ŁUKU W STALOWNICZYCH PIECACH ŁUKOWYCH

Streszczenie. W referacie omówiono specyfikę pomiaru napięcia łuku w stalowniczych piecach łukowych, scharakteryzowano warunki pomiaru oraz czynniki wywierające wpływ na dokładność pomiaru. Przedstawiono przykłady obliczeń numerycznych wartości SEM indukowanych w obwodzie pomiarowym napięć łuku w wyniku oddziaływania elektromagnetycznego toru wielkoprądowego dla różnych konfiguracji obwodu pomiarowego a także wyniki pomiarów przeprowadzonych bezpośrednio na obiekcie. Sprecyzowano model matematyczny odwzorowujący pośrednią metodę pomiaru napięcia łuku oraz przedstawiono strukturę blokową opartego na tym modelu skompensowanego układu pomiarowego, rozwiązania funkcjonalne wybranych podzespołów i parametry eksploatacyjne przyrządu. Zamieszczono wreszcie wyniki pomiarów napięć łuku przeprowadzone na piecu łukowym jednej z hut. Zaprezentowano liczne oscylogramy wartości chwilowych napięcia łuku i prądu łuku oraz przykłady charakterystyk napięciowo-prądowych łuku zarejestrowane w różnych fazach wytopu. Dla porównania zamieszczono oscylogramy tych samych wielkości uzyskane przy użyciu konwencjonalnego układu pomiarowego napięcia łuku. Referat zamyka podsumowanie uzyskanych wyników oraz omówienie możliwości rozwoju konstrukcji układów pomiarowych napięcia łuku w kontekście mikroprocesorowego sterowania pracą pieca łukowego.

1. WSTĘP

Od szeregu lat dużo uwagi przywiązuje się do problemu pomiaru napięć łuku w stalowniczych piecach łukowych. Bezpośredni pomiar napięcia łuku nie jest możliwy technicznie. Z konieczności należy się decydować na pomiar napięcia pomiędzy wanną pieca a wybranym, dostępnym punktem toru wielkoprądowego. Powstaje wtedy pętla pomiarowa, zawierająca napięciowe przewody pomiarowe, odcinek toru wielkoprądowego objęty pomiarem oraz elektrodę i łuk, którą przenika silne pole magnetyczne istniejące w przestrzeni otaczającej tor. W wyniku oddziaływania pola magnetycznego w pętli indukuje się SEM, która w zasadniczy sposób wpływa na wartość mierzonego napięcia łuku. Napięcie pomierzone w danej fazie stanowi sumę wektorową spadków napięć na rezystancji i reaktancji wewnętrznej odcinka przewodu fazowego objętego po-

miarem, wspomnianej wyżej SEM oraz spadku napięcia na rezystancji łuku. Ten ostatni składnik stanowi właściwą wielkość pomiarową. Napięcie łuku mierzy się zatem metodą pośrednią, przy czym dla określenia wartości tego napięcia niezbędna jest znajomość czynnych i biernych napięć wywołujących błąd napięciowy. Analiza wartości napięć, zwłaszcza wartości dominujących napięć biernych, omówienie struktury skompensowanego układu pomiarowego napięć łuku, wyniki pomiarów i rejestracji przebiegów czasowych napięcia łuku uzyskane w warunkach eksploatacji układu skompensowanego na obiekcie oraz różnorodne wnioski stanowią treść niniejszego referatu.

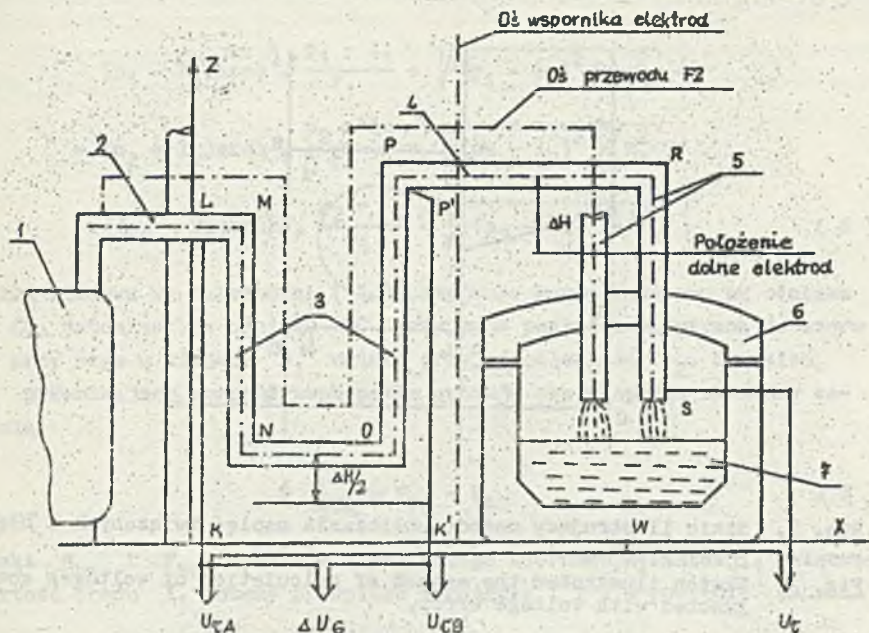
2. ANALIZA BŁĘDÓW POMIARU NAPIĘCIA ŁUKU

W celu wyznaczenia wartości biernych napięć dla konkretnej instalacji pomiarowej napięcia łuku pieca łukowego o pojemności 55 Mg pracującego w jednej z hut krajowych, zdecydowano się na przyjęcie szeregu założeń upraszczających. Dokładne wyznaczenie wartości tych napięć z uwzględnieniem rzeczywistej konfiguracji toru, skomplikowanego rozkładu pola elektromagnetycznego w przestrzeni, nierównomiernego rozplywu prądów w poszczególnych fazach czy wiązkach przewodów jednej fazy, odkształconych przebiegów prądów łuku i innych czynników, stanowi zagadnienie niezwykle złożone. W związku z tym przyjęto uproszczony model toru wieloprądowego, przedstawiony na rys. 1a, b. Na rysunku oznaczono podstawowe elementy toru, przestrzenne rozmieszczenie przewodów fazowych oraz ich numerację. Odnośnie toru rzeczywistego przyjęto następujące założenia upraszczające:

- odcinek połączeń giętkich toru, stanowiący wiązki przewodów giętkich, zastąpiono jednolitymi przewodami cylindrycznymi o średnicy zastępczej wynikającej z obwiedni wiązki. Przyjęto prostokątny kształt tego odcinka toru w miejsce rzeczywistej krzywej łańcuchowej;
- w podobny sposób zastąpiono przewodem cylindrycznym odcinek połączeń rurowych i pakiet szyn wyprowadzonych z komory transformatora wieloprądowego na zewnątrz;
- w analizie błędów nie uwzględnia się odcinka połączeń szynowych w komorze transformatora oraz części obwodu zamykającego się poprzez wsad;
- nie uwzględnia się nieznacznego skręcenia części giętkiej toru, co pozwala na rozmieszczenie przewodów fazowych wraz z pętlami pomiarowymi napięć łuku w trzech płaszczyznach równoległych.

Na rys. 1a zaznaczono przyjęte w analizie dwa warianty układu pomiarowego napięć łuku:

- A - wariant ten odpowiada pomiarom napięć łuku U_A między szynoprzewodami i wanną pieca. Obwód pomiarowy tworzą przewody pomiarowe LK i WK oraz przewód fazowy, łuk i wsad;
- B - wariant dotyczy pomiaru napięć łuku U_B między wanną pieca i początkiem ruroprowadzów. Pętlę pomiarową tworzy obwód KP RSWK.



Rys. 1. Układ pomiarów napięć na piecu łukowym: 1 - transformator piecowy, 2 - przewody szynowe, 3 - przewody giętkie, 4 - ruroprzewody, 5 - elektrody, 6 - sklepienie pieca, 7 - wsad.

Fig. 1. System of voltages measurement at arc furnace: 1 - furnace transformer, 2 - bus conductors, 3 - cables, 4 - bus tube, 5 - electrodes, 6 - furnace roof, 7 - charge.

Sposób obliczania wartości napięć związanych z błędem napięciowym przy uproszczonej konfiguracji toru wyjaśnia następujący przykład zilustrowany na rys. 2.

Zakłada się na osi p odcinek przewodu prądowego o współrzędnych p_1, p_2 oraz pętlę prostokątną ABCD. Poszukuje się wartości strumienia magnetycznego wzbudzonego przez odcinek prądowy, przenikającego powierzchnię ABCD. Wartość tego strumienia określona jest przez cyrkulację wektora potencjału pola magnetycznego A wzdłuż pętli zamkniętej

$$\oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (1)$$

gdzie:

- l - długość pętli;
- d \vec{l} - element długości.

Wektor potencjału \vec{A} ma kierunek zgodny z kierunkiem prądu. Przyjęto punkt K o współrzędnej bieżącej l oraz liniowy element prądowy dp odległy od punktu K o odległość r .

$$\begin{aligned}
 & - (p_1 - l_1) \operatorname{arsh} \cdot \frac{p_1 - l_1}{r_1} + \sqrt{(p_1 - l_1)^2 + r_1^2} - \\
 & - (p_2 - l_2) \operatorname{arsh} \cdot \frac{p_2 - l_2}{r_1} + \sqrt{(p_2 - l_2)^2 + r_1^2} + \\
 & + (p_2 - l_1) \operatorname{arsh} \cdot \frac{p_2 - l_1}{r_1} - \sqrt{(p_2 - l_1)^2 + r_1^2} \Big] \quad (6)
 \end{aligned}$$

Całka liniowa wg zależności (1) przyjmuje wartość zerową na odcinku AB i CD, natomiast na odcinku BC przyjmuje postać analogiczną do wzoru (6), przy czym w miejsce r_1 należy przyjąć odległość r_2 . Strumień Φ_{ABCD} przenikający rozpatrywaną pętlę opisuje się w sposób skrócony zależnością:

$$\Phi_{ABCD} = F_{DA} - F_{BC} \quad (7)$$

Znaki F_{DA} i F_{BC} wynikają z przyjętego kierunku cyrkulacji. Wyłączając wartość prądu I , możemy przepisać wyrażenie (7) w postaci:

$$\Phi_{ABCD} = M \cdot I \quad (8)$$

M oznacza formalnie współczynnik indukcyjności wzajemnej odcinka przewodu prądowego i pętli. Przy sinusoidalnym przebiegu prądu w pętli zaindukuje się napięcie U_1 o wartości skutecznej:

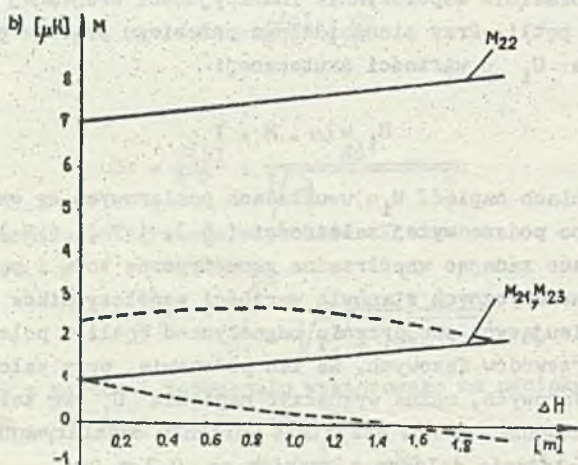
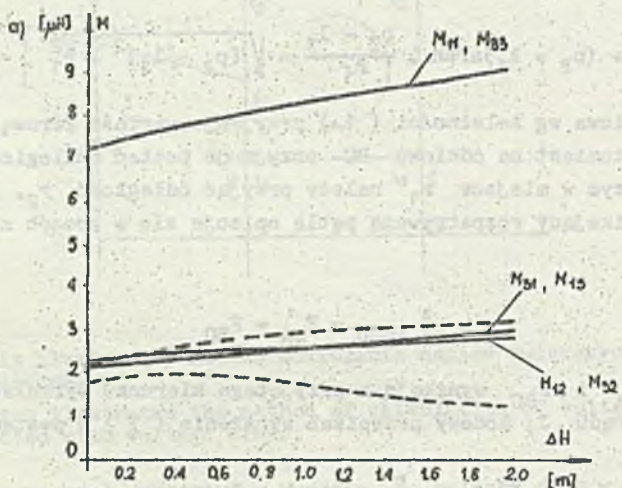
$$U_1 = \omega \cdot M \cdot I \quad (9)$$

Przy obliczeniach napięć U_1 w układach pomiarowych wg wariantów A i B wykorzystano podane wyżej zależności (6), (7), (8), (9). Obliczenia zrealizowano zadając współrzędne geometryczne toru i pętli. Końcowe wyniki obliczeń numerycznych stanowią wartości współczynników indukcyjności wzajemnej M opisujących skojarzenie magnetyczne pętli z polem magnetycznym poszczególnych przewodów fazowych. Na ich podstawie, przy założeniu typowych wartości prądów fazowych, można wyznaczyć napięcia U_1 wg zależności (9).

W programie przeanalizowano wszystkie warianty oddziaływania elektrod o $\Delta H = 2 \text{ m}$ od położenia dolnego z krokiem co $0,2 \text{ m}$.

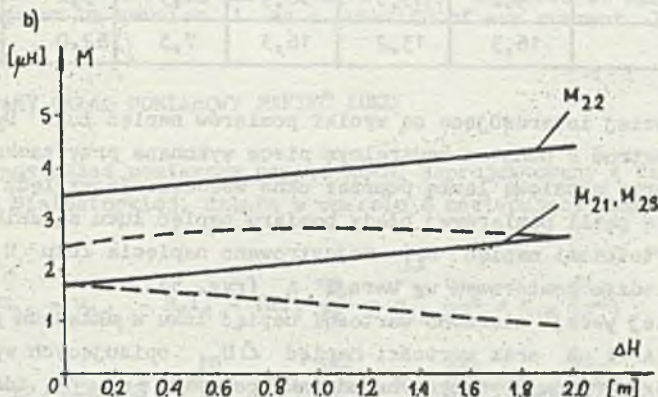
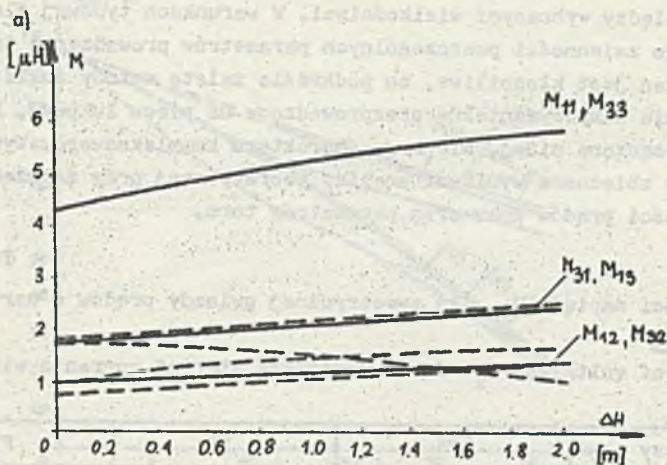
Wartości współczynników M w funkcji wysokości elektrod dla obu wariantów układu pomiarowego przedstawiono w formie wykresów na rys. 3a, b i 4a, b. Pętle pomiaru napięć łuku w fazach F_1, F_2, F_3 (rys. 1b) oznaczone są kolejno P_1, P_2, P_3 . Współczynniki indukcyjności wzajemnej opisuje się ogólnym symbolem $M_{i,k}$, przy czym indeks "i" wskazuje numer pętli pomiarowej, natomiast "k" numer fazy skojarzonej z tą pętlą. Linia ciągłą zaznaczono zmienność współczynników M przy jednoczesnych zmianach wysokości elektrod z zachowaniem regularnej, trójkątnej konfiguracji toru. Zakres moż-

liwych zmian wartości M przy różnych wysokościach poszczególnych elektrod wyznaczają linie przerywane. Wyniki obliczeń dla pętli pomiarowej P3 przyporządkowanej do przewodu fazowego F3 są identyczne z wynikami dla pętli P1 w fazie F1.



Rys. 3. Zależność wartości indukcyjności wzajemnej $M_{i,k}$ od wysokości elektrod ΔH dla: a) pętli P1, P3 oraz b) pętli P2 w przypadku wersji A układu pomiarowego.

Fig. 3. Values of mutual inductance $M_{i,k}$ as a function of electrodes height ΔH for: a) loop P1, P3 and b) loop P2 in the case of version A of measurement system.



Rys. 4. Zależność wartości indukcyjności wzajemnej M_{ij} od wysokości elektrod ΔH dla: a) pętli P1, P3 oraz b) pętli P2 w przypadku wersji B układu pomiarowego.

Fig. 4. Values of mutual inductance M_{ij} as a function of electrodes height ΔH for: a) loop P1, P3 and b) loop P2 in the case of version B of measurement system.

W tabeli 1 zestawiono wartości napięć U_1 obliczone dla przypadku symetrycznej gwiazdy prądów fazowych o przebiegu sinusoidalnym i wartości skutecznej 20 kA. Założono położenie elektrod odpowiadające wysokości $H = 1$ m oraz regularną trójkątną konfigurację toru.

Doświadczalna weryfikacja wyników analizy teoretycznej powinna obejmować wyznaczenie rezystancji i fazowych reaktancji wewnętrznych toru oraz

rejestrację wartości napięć i prądów fazowych toru oraz kątów przesunięcia fazowego między wybranymi wielkościami. W warunkach typowej dla pracy pieca łukowego zmienności poszczególnych parametrów prowadzenie tak rozbudowanych badań jest kłopotliwe, co podkreśla zaletę metody analizy numerycznej. Badania eksperymentalne przeprowadzone na piecu łukowym, których wyniki zamieszczone niżej, nie mają charakteru kompleksowego. Wyniki badań są generalnie zbieżne z wynikami analizy teoretycznej przy założeniu przeciętnych wartości prądów łuku oraz parametrów toru.

Tabela 1

Wartości napięć U_1 dla symetrycznej gwiazdy prądów o wartości 20 kA

Table 1

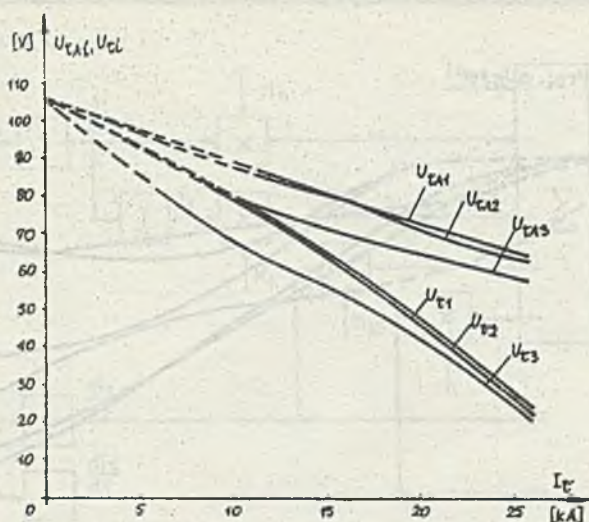
Value of voltages U_1 for symmetrical star of currents with value 20 kA

Nr fazy	F1		F2		F3	
	U_A	U_B	U_A	U_B	U_A	U_B
	V	V	V	V	V	V
Pętla P1	52,0	32,6	16,3	7,3	16,3	13,2
Pętla P2	9,2	13,3	50,9	24,5	9,2	13,3
Pętla P3	16,3	13,2	16,3	7,3	52,0	32,6

Najbardziej interesujące są wyniki pomiarów napięć łuku U_{L1} między końcami elektrod a punktem neutralnym pieca wykonane przy zamknięciu obwodu woltomierza metalową lancą poprzez okno wsadowe. Ze względu na niewielką powierzchnię pętli pomiarowej błędy pomiaru napięć łuku są znikome. Równolegle z wartościami napięć U_{L1} rejestrowano napięcia łuku U_{1A1} pomierzone w układzie pomiarowym wg wersji A (rys. 5).

W drugiej wersji mierzono wartości napięć łuku w układach pomiarowych wg wersji A i B oraz wartości napięć ΔU_{G1} opisujących wpływ pola magnetycznego prądów płynących na odcinku połączeń giętkich toru (rys. 6).

Kolejne pomiary miały na celu ocenę stosowanego w praktyce układu pomiarowego napięć łuku U_{1S1} , w którym przewody pomiarowe mocowano w punkcie P' toru (rys. 1), a następnie prowadzono wzdłuż połączeń giętkich toru do punktu L, a następnie K i dalej, analogicznie do poprzednich układów. Wyniki pomiarów zilustrowane na rys. 7 wykazują małą efektywność tego rozwiązania w porównaniu z układem w wersji A, ponieważ nie eliminuje się w nim zasadniczych wartości składowych biernych napięć U_1 . Wyniki wykazują również niewielki udział wartości spadków napięć na rezystancji i reaktancji wewnętrznej toru w ogólnym bilansie napięć U_1 .



Rys. 5. Charakterystyki napięć łuku U_{i1} mierzone z wykorzystaniem lancy (przewodu) pomiarowej oraz napięć U_{i11} mierzonych w układzie pomiarowym wg wersji A w funkcji prądu łuku I_T .

Fig. 5. Characteristics of arc voltages U_{i1} measured with measuring lance (conductor) and voltages U_{i11} measured at measuring system by version A as a function of arc current I_T .

3. SKOMPENSOWANY UKŁAD POMIAROWY NAPIĘĆ ŁUKU

Skompensowany układ pomiarowy napięć łuku, zaprojektowany i zbudowany w Politechnice Białostockiej, działa w oparciu o następujący układ równań [1]:

$$u_{i1} = u_{ip1} - R_1 i_1 - (M_{11} \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt}) \quad (10)$$

$$u_{i2} = u_{ip2} - R_2 i_2 - (M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{22} \frac{di_2}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt}) \quad (11)$$

$$u_{i3} = u_{ip3} - R_3 i_3 - (M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} + M_{33} \frac{di_3}{dt}) \quad (12)$$

gdzie:

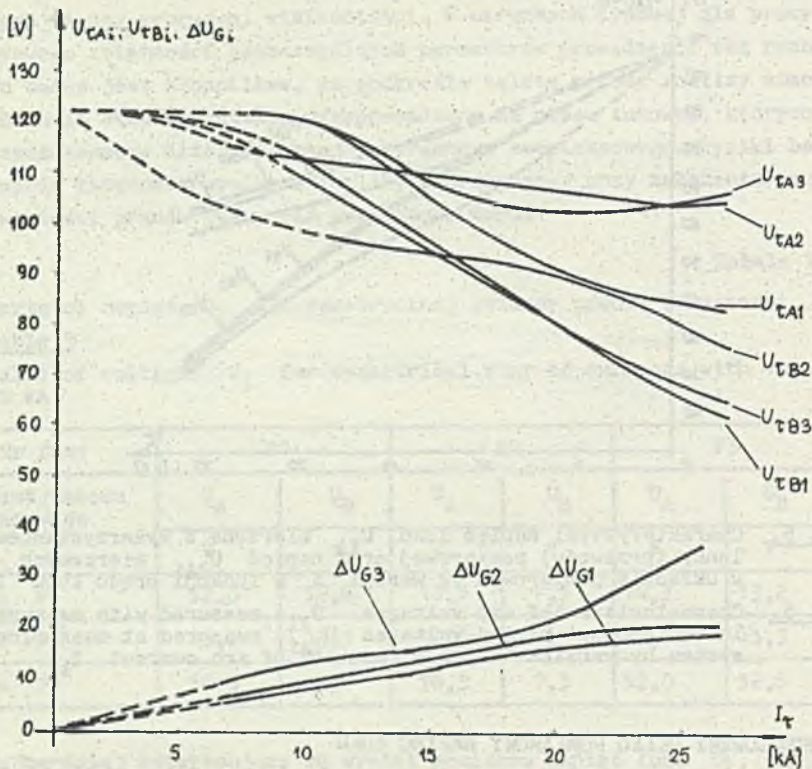
R_1, R_2, R_3 - rezystancje fazowe toru;

i_1, i_2, i_3 - prądy fazowe;

$u_{ip1}, u_{ip2}, u_{ip3}$ - napięcia łuku pomierzone w konwencjonalnym układzie pomiarowym;

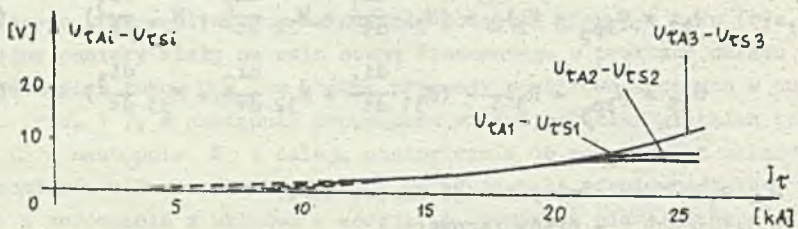
u_{i1}, u_{i2}, u_{i3} - rzeczywiste napięcia łuku.

Zasadę pracy skompensowanego układu pomiarowego wyjaśnia na przykładzie jednej fazy, schemat blokowy z rys. 8.



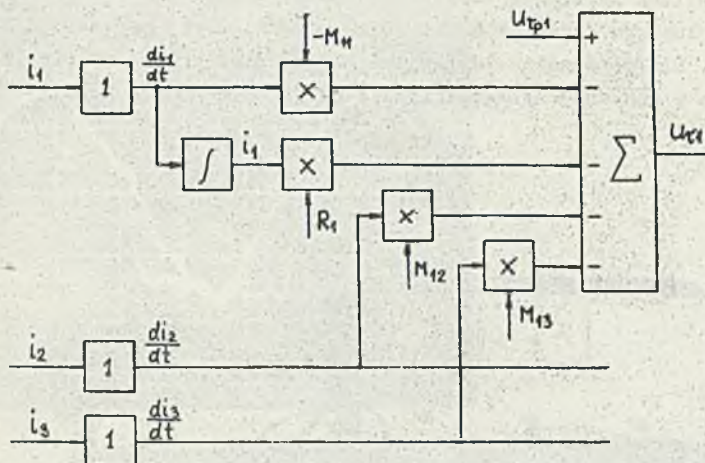
Rys. 6. Charakterystyki napięć $U_{\tau A i}$ i $U_{\tau B i}$ mierzonych w układzie pomiarowym wg wersji A i B oraz napięć $\Delta U_{G i}$ w funkcji prądu łuku I_{τ} .

Fig. 6. Characteristics of voltages $U_{\tau A i}$ and $U_{\tau B i}$ measured at measuring system by version A and B and voltages $\Delta U_{G i}$ as a function of arc current I_{τ} .



Rys. 7. Charakterystyki różnicy wartości skutecznych napięć $U_{\tau A i} - U_{\tau S i}$ w funkcji prądu łuku I_{τ} .

Fig. 7. Characteristics of difference of rms values of voltages $U_{\tau A i} - U_{\tau S i}$ as a function of arc current I_{τ} .



Rys. 8. Zasada pomiaru napięcia łuku na przykładzie 1- fazy: 1 - przetworniki pomiarowe typu Rogowskiego.

Fig. 8. Principle of measurement of arc current at example of first phase: 1 - measuring transducers Rogovskii type.

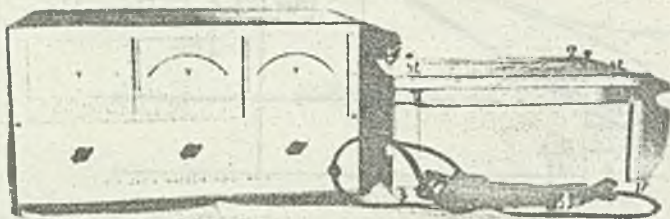
W charakterze przetworników pomiarowych prądu wykorzystano przetworniki liniowe typu Rogowskiego wykonane jako rozwarte. Zastosowanie tych przetworników przynosi wyraźne korzyści, między innymi zapewnia dokładne modelowanie oddziaływania elektromagnetycznego, wysoki poziom napięciowych sygnałów wyjściowych, eliminację układów różniczkujących, a także pozwala uniknąć dodatkowego obciążenia przekładników prądowych.

Zasada pracy układu skompensowanego polega na wytworzeniu napięć proporcjonalnych do napięć składowych związanych z błędem pomiarowym i ich wektorowym zsumowaniu z napięciami konwencjonalnego układu pomiarowego. W wyniku sumowania otrzymuje się wartości napięć łuku. Wszystkie operacje matematyczne realizuje się w układzie elektronicznym. Układ pomiarowy, zwany analizatorem napięć łuku AN-2 oraz zastosowany w torze pomiaru napięć U_{ipj} blok przekładników napięciowych PN-1 ilustruje rys. 9. Urządzenie zostało zgłoszone w Urzędzie Patentowym PRL i uzyskało patent tymczasowy nr 119837 a następnie patent stały [3]. Podstawowe parametry techniczne analizatora podane są w tabeli 2.

WYNIKI PRÓBNEJ EKSPLOATACJI SKOMPENSOWANEGO UKŁADU POMIAROWEGO NAPIĘĆ ŁUKU

Próbna eksploatacja skompensowanych układów pomiarowych napięć łuku prowadzone na piecach łukowych różnych typów pozwoliła na zebranie obszernego materiału doświadczalnego. Poniżej prezentuje się przykłady oscylogramów wartości chwilowych napięcia i prądu łuku oraz charakterystyk napięcio-

wo-prądowych łuku zarejestrowanych na wyjściu układu AN-2 zainstalowanego na piecu łukowym firmy SWINDELL (USA) o znamionowej pojemności wsadowej $20 \cdot 10^3$ kg. Dla porównania zestawiono analogiczne przykłady oscylogramów rejestrowane w konwencjonalnym układzie pomiarowym napięć łuku.



Rys. 9. Analizator napięć łuku typu AN-2 wraz z blokiem przekładników napięciowych typu PN1.

Fig. 9. Analyser of arc voltage AN-2 type with a block of voltage transformer PN1 type.

Tabela 2

Podstawowe parametry techniczne analizatora napięć typu AN-2

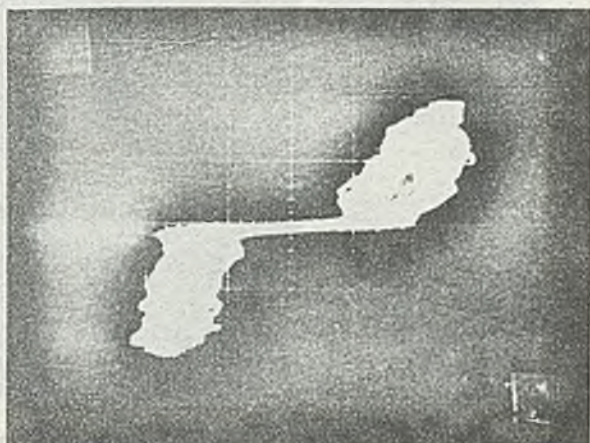
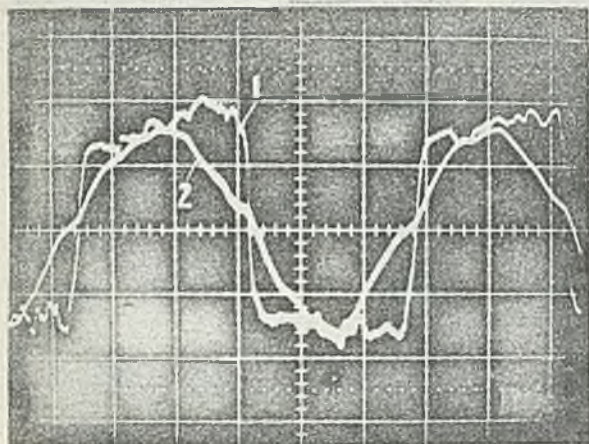
Table 2

Basic technical parameters of voltages analyser type AN-2

Zakres pomiaru napięć	V	(10 - 1000)
Zakres prądów łuku	kA	(1 - 100)
Maksymalny błąd pomiaru	%	± 3
Czułość przetworników liniowych	$\frac{mV}{kA}$	200 ± 40
Masa analizatora i przetworników pomiarowych	kg	15

Typowy przebieg czasowy napięcia i prądu łuku zarejestrowany na wyjściu układu pomiarowego AN-2 w początkowej fazie wytopu (około 5 min. po a-łączeniu pieca) oraz przykład charakterystyki napięciowo-prądowej ilustrują rys. 10a i b.

Oscylogramy analogicznych wielkości rejestrowane w środkowej fazie wytopu (około 40 min. po załączeniu pieca) prezentuje rys. 11a, b.



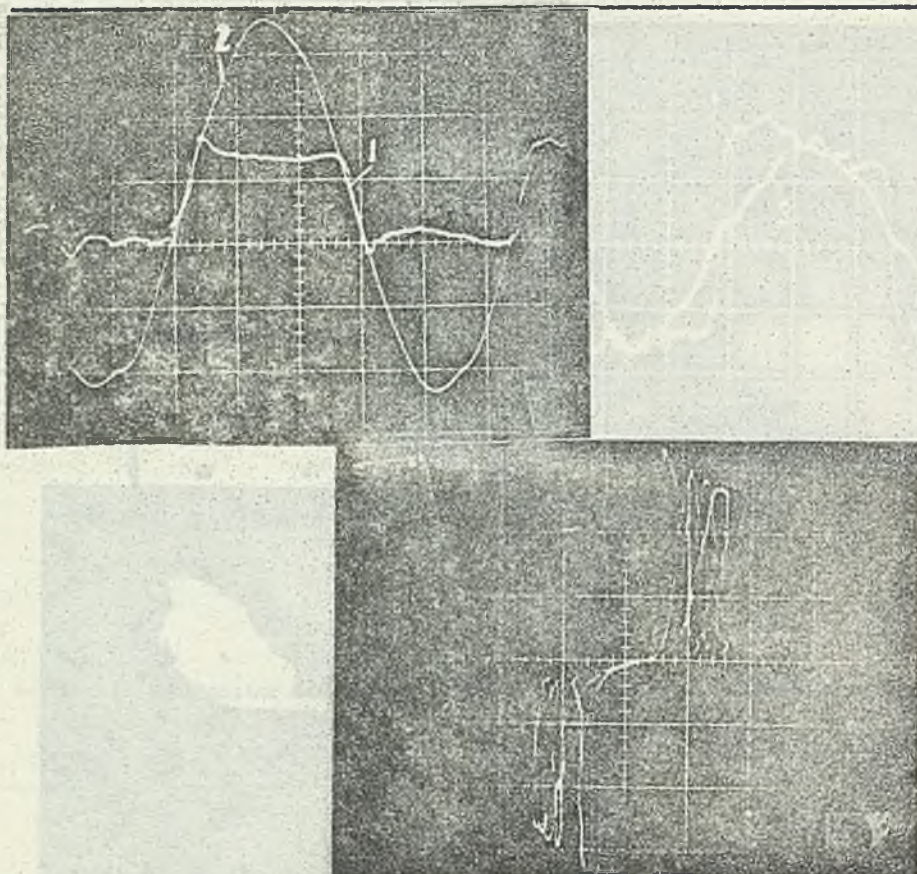
Rys. 10. Przykłady oscylogramów zarejestrowanych w początkowej fazie wytopu na wyjściu układu pomiarowego AN-2: a) zmienność w czasie napięcia u_2 (1) i prądu łuku i_2 (2) oraz b) charakterystyka napięciowo-prądowa łuku - czas naswietlania 1 s.

Fig. 10. Examples of oscillograph records recorded at initial phase of melt by output of measuring system AN-2 type: a) variation by time of arc voltage u_2 (1) and arc current i_2 (2) and b) characteristic of arc voltage current - time of exposure - 1 s.

Oscylogramy tych wielkości zarejestrowane w układzie pomiarowym przy wyłączonych podzespołach kompensacji czynnych i biernych napięć, a zatem w warunkach konwencjonalnego układu pomiarowego napięć łuku przedstawia rys. 12a, b.

Przebiegi napięcia i prądu łuku uzyskane w skompensowanym układzie pomiarowym w końcowej fazie wytopu ilustruje rys. 13.

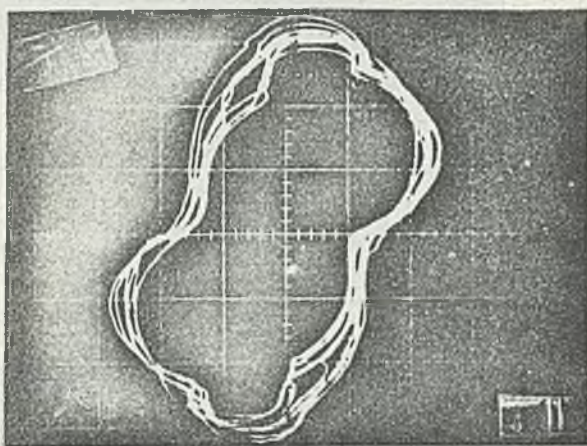
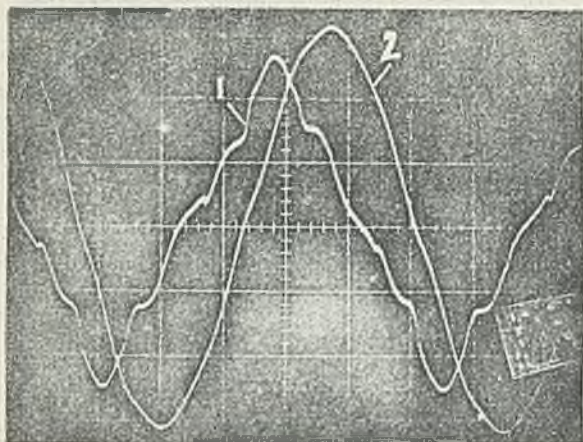
Oscylogram z rys. 14 przedstawia interesujący stan przejściowy - początek zwarcia eksploatacyjnego, zarejestrowany w środkowej fazie wytopu w układzie skompensowanym.



Rys. 11. Oscylogramy: a) wartości chwilowych napięcia u_1 (1) i prądu łuku i_2 (2) oraz b) charakterystyka napięciowo-prądowa łuku (czas naświetlania 0,2 s) rejestrowane na wyjściu skompensowanego układu AN-2 w 40-ej minucie wytopu.

Fig. 11. Oscillograph records: a) instantaneous values of arc voltage u_1 (1) and arc current i_2 (2) and b) characteristics of arc voltage-current (time of exposure - 0,2 s) recorded by output of compensated system type AN-2 after 40 minutes of melt.

Przebiegi czasowe napięcia i prądu łuku otrzymane w środkowej fazie wytopu w stanie zwarcia 3-fazowego przy użyciu układu skompensowanego oraz w konwencjonalnym układzie pomiarowym ilustruje rys. 15a, b. Rejestracja przebiegów napięcia i prądu łuku w stanie zwarcia jest szczególnie istotna, gdyż stanowi ważne kryterium oceny doboru wartości współczynników R_1 oraz $M_{1, k}$ przyjętych w podzespołach kompensacji. Oscylogramy z rys. 14 i 15a wykazują, że w układzie osiągnięto pełną kompensację. Pozostałe oscylogramy mierzonych wielkości, a także przykłady charakterystyk napięciowo-prądowych łuku, rejestrowane w dość różnorodnych warunkach pracy pieca łukowego, wy-



Rys. 12. Oscylogramy: a) wartości chwilowych napięcia u_2 (1) i prądu łuku i_2 (2) oraz b) charakterystyka napięciowo-prądowa łuku (czas naświetlania 0,2 s) rejestrowane w konwencjonalnym układzie pomiarowym w 40- minucie wytopu.

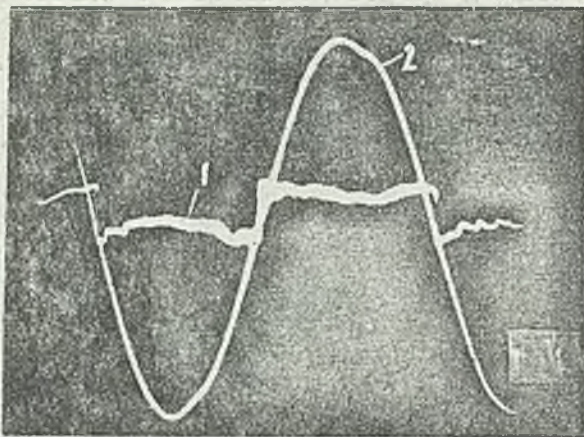
Fig. 12. Oscillograph records: a) instantaneous values of arc voltage u_2 (1) and arc current i_2 (2) and b) characteristic of arc voltage current (time of exposure - 0,2 s) recorded by conventional measuring system after 40 minutes of melt.

kazują w przybliżeniu zgodność fazową napięcia i prądu łuku, która również stanowi istotne kryterium jakości układu pomiarowego.

5. PODSUMOWANIE

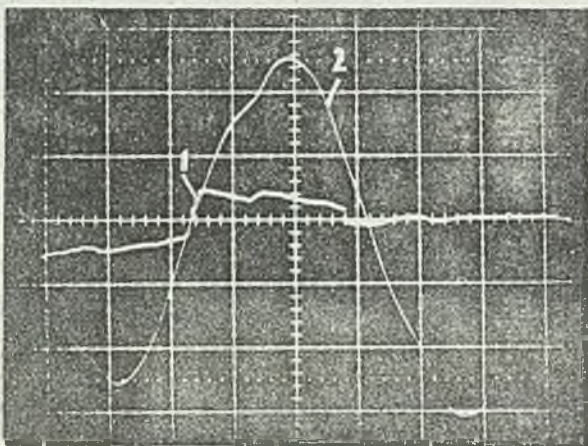
Przedstawiony wyżej materiał analityczny i doświadczalny pozwala na wyciągnięcie szeregu różnorodnych wniosków. Wydaje się również istotna ocena przydatności zaproponowanych rozwiązań z punktu widzenia wymogów nowoczes-

nej techniki grzejnictwa łukowego, zwłaszcza obiektów sterowanych programowo.



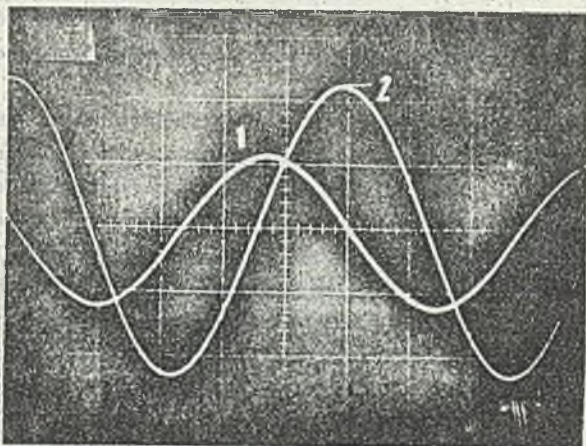
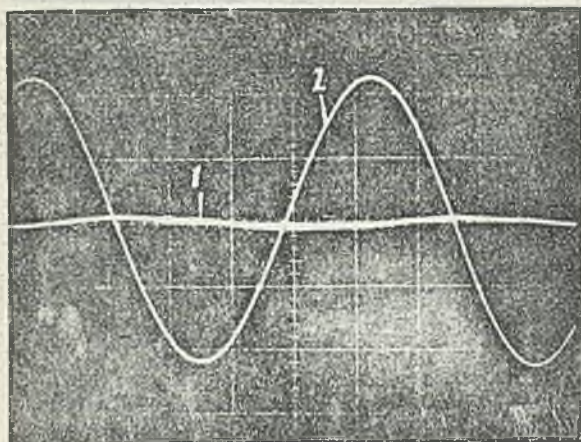
Rys. 13. Przebiegi wartości chwilowych napięcia $u_a(1)$ i prądu łuku $i_a(2)$ rejestrowane w układzie pomiarowym AN-2 w końcowej fazie wtopu.

Fig. 13. Course of instantaneous values of arc voltage $u_a(1)$ and arc current $i_a(2)$ recorded by measuring system AN-2 type in final phase of melt.



Rys. 14. Stan przejściowy - początek zwarcia eksploatacyjnego zarejestrowany na wyjściu skompensowanego układu pomiarowego AN-2 w środkowej fazie wtopu. Oznaczenia: 1 - napięcie łuku; 2 - prąd łuku.

Fig. 14. Transient state - start of exploitation recorded at output of compensated measuring system type AN-2 in middle phase of melt. Designation: 1 - arc voltage; 2 - arc current.



Rys. 15. Przebiegi czasowe napięcia u_a (1) i prądu łuku i_p (2) otrzymane w środkowej fazie wytopu w stanie zwarcia 3-fazowego przy użyciu: a) skompensowanego układu pomiarowego AN-2; b) konwencjonalnego układu pomiarowego.

Fig. 15. Time course of arc voltage u_a (1) and arc current i_p (2) received in middle of melt by 3 phase state short-circuit by using: a) compensated measuring system type AN-2; b) conventional measuring system.

Jako punkt wyjścia przyjęć należy stwierdzenie, że współczesne układy pomiarowe napięć łuku muszą być wyposażone w podzespoły kompensacji. Zestawienie wyników pomiarów napięcia łuku uzyskanych w układach pomiarowych, konwencjonalnym i skompensowanym wykazuje bardzo istotne różnice na korzyść tego ostatniego. Jednocześnie próby eksploatacyjne skompensowanych układów pomiarowych napięć łuku pozwalają stwierdzić, że w chwili obecnej nie ma żadnych przeszkód dla szerokiego wdrożenia omawianych rozwiązań w praktyce przemysłowej. Efekty pomiarowe uzyskane w układach skompensowanych są zawsze korzystne niezależnie od istniejących jeszcze pewnych wad tych układów.

Jednym z założeń przyjętych przy projektowaniu układów skompensowanych jest założenie stałych wartości współczynników związanych z rezystancją R_1 i indukcyjnością $M_{1,k}$. Wartości R_1 można korygować o ile znane są wartości rezystancji toru, zwłaszcza wartość zmiennej rezystancji elektrod. Porównanie wartości $M_{1,k}$ dla wersji A i B układu pomiarowego pozwala zauważyć, że w wersji B stosunkowo większy jest udział wpływu faz sąsiednich w indukowaniu biernych napięć. Stąd celowe wydaje się stosowanie jako układu podstawowego wersji A i zadanie w podzespołach kompensacji stałych nastaw wartości $M_{1,k}$ opisujących wpływ faz sąsiednich, np. obliczanych analitycznie lub zmierzonych. Indukcyjność fazy własnej może być korygowana w odniesieniu do przyjętych wstępnie wartości obliczonych lub pomierzonych w oparciu o wspomniane wyżej kryteria, zwłaszcza o pomiary wykonane w stanie zwarcia. Zabiegi powyższe pozwalają w praktyce uzyskać zadowalający efekt pomiarowy we wszystkich stanach pracy pieca łukowego przy założeniu rozbieżności wysokości poszczególnych elektrod w stosunku do zadanej konfiguracji na poziomie $\pm (0,4 - 0,6)$ m.

Sygnal pomiarowy uzyskiwany w układach skompensowanych jest użyteczny dla stosowanych obecnie komputerowych systemów sterowania pracą pieców łukowych. Należy tu podkreślić fakt, że zasadniczym ograniczeniem w dalszym rozwoju grzejnictwa łukowego jest brak pełnego modelu matematycznego łuku elektrycznego. Z punktu widzenia pomiaru napięcia łuku istotne jest zbadanie poziomu i odpowiednich zależności warunkujących wartości spadków napięcia łuku: anodowego i katodowego, wartości mało istotnych w bilansie mocy ale mających duży wpływ na poziom wartości skutecznej napięcia łuku.

Wykorzystując opisany w referacie skompensowany układ pomiarowy napięcia łuku, w Politechnice Białostockiej we współpracy z Instytutem Elektrotechniki w Warszawie, opracowano i wykonano szereg układów pomiarowych dla pieców łukowych, w tym tzw. analizatory współczynnika promieniowania i analizatory mocy czynnej łuku. Układy takie pracujące w sposób ciągły, w wersji stacjonarnej mogą być wykorzystane także w systemach sterowania pracą pieców łukowych.

LITERATURA

- [1] Dmochowski Z., Kowalski W., Sądel A.: Układ do pomiaru napięcia na piecach łukowych. Konferencja naukowo-techniczna, Politechnika Białostocka, 35 lat Wydziału Elektrycznego, tom II Elektrodynamika, Metrologia, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1984 r., str. 133 - 142.
- [2] Kowalski W.: Analiza pracy przetworników pomiarowych w urządzeniach wielkopiędowych zwłaszcza w stalowniczych piecach łukowych. Praca doktorska, Łódź 1988.
- [3] Brański M., Dmochowski Z., Gwardys Z., Kowalski W., Walkowicz G.: Układ do pomiaru napięć w piecach łukowych. Patent UFPRL Nr 119837 z dnia 31.12.1979 r.

PROBLEMATICS OF MEASURING ARC VOLTAGE IN STEELMAKING ARC FURNACES

S u m m a r y. The paper presents the specific considerations of arc voltage measurement in steelmaking arc furnaces. The measurement conditions as well as the factors contributing to the measurement accuracy are discussed. The results of calculations of the EMF induced in the arc voltage measurement circuit due to electromagnetic interference of high current chain are discussed for the cases of different measurement circuit configurations and compared with the in situ measurement results. A mathematical model for the indirect method of arc voltage measurement has been formulated and the block diagram of the model of compensated measurement circuit has been discussed. Also the design examples of selected units and the technical specifications of the instruments has been presented. The results of arc voltage measurements performed in a real furnace in steelworks are discussed. Several oscillograms of instantaneous values of arc current and voltage as well as the U/I curves of the arc taken at different melting stages are shown. The results are discussed and the conclusions are drawn with respect to possible applications in microprocessor controlled arc-furnace systems.

ПРОБЛЕМАТИКА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДУГИ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

Резюме. В реферате оговаривается специфика измерения напряжения дуги в сталеплавильных дуговых печах, охарактеризовываются условия измерений, а также факторы, влияющие на точность измерения. Представлены примеры числовых расчетов значений индицированных в измерительной цепи напряжений дуги в результате электромагнитного взаимодействия вторичной сети для разных конфигураций измерительных цепей, а также результаты измерений, проведенных непосредственно на объекте. Уточнена математическая модель, отображающая косвенный метод измерения напряжений дуги, представлена блочная структура, основанная на этой модели комплексированной системы измерений, функциональное решение избранных подузлов и эксплуатационные параметры прибора. Помещены наконец результаты измерений напряжений дуги, проведенные на дуговой печи одного из металлургических заводов. Представлено большое количество осциллограмм мгновенных значений напряжения дуги и тока дуги, а также примеры характеристик тока и напряжения дуги, зарегистрированные в разных фазах плавки. Для сравнения помещены осциллограммы величин, полученных при использовании конвенциональной системы измерений напряжения дуги. В конце реферата подытоживаются полученные результаты и оговаривается возможность развития конструкции системы измерений напряжения дуги с применением микропроцессорного управления работой дуговой печи.