ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989

Seria : AUTOMATYKA z.98 Nr kol.1042

Zbigniew LMOCHOWSKI
Kazimierz KIERUS

PROBLEMATYKA POMIARU MOCY CZYNNEJ ŁUKU W STALOWNICZYCH PIECACH ŁUKOWYCH

Streszczenie. W referacie omówiono specyfikę pomiaru mocy czynnej łuku w stalowniczych piecach łukowych, scharakteryzowano warunki pomiaru oraz czynniki wywierające wpływ na dokładność pomiaru. Przedstawiono model matematyczny odwzorowujący pośrednią metodę pomiaru mocy czynnej łuków oraz strukturę blokową opartego na tym modelu układu pomiarowego zawierającego przetworniki pomiarowe liniowe typu Rogowskiego, specjalne przekładniki napięciowe oraz podzespoły elektroniczne pozwalające na otrzymanie wartości chwilowych prądu i napięcia łuku a następnie chwilowych mocy łuku oraz w efekcie mocy czynnej łuków. Podano podstawowe parametry techniczne opracowanego układu do pomiaru mocy czynnej łuków typu 3PP+ PN + AM oraz wyniki jego badań w warunkach przemysłowych. Podano również parametry techniczne opracowanego i wykonanego układu stacjonarnego do pomiaru mocy czynnej łuków dla stalowniczego pieca łukowego o pojemności $140 \cdot 10^3$ kg. Przedstawiono korzyści techniczno-ekonomiczne z wykorzystania tych układów przy prowadzeniu procesu technologiczno energetycznego w stalowniczych i odlewniczych piecach łukowych.

1. WSTĘP

Badania mocy łuku elektrycznego wiąże się ściśle z wykonywanymi badaniami teoretycznymi i eksperymentalnymi dotyczącymi pomiaru prądu łuku, jak również pomiaru napięcia łuku [1, 2].
Fazową mocą łuku elektrycznego w piecu elektrycznym nazywa się ilość energii elektrycznej w jednostce czasu, jaka zostaje wydzielona na rezystancji łuku palącego się pomiędzy końcami elektrod grafitowych znajdujących się w wannie pieca a wsadem /złomem lub roztopionym wsadem, kąpielą/.

Moc chwilowa łuku elektrycznego jest funkcją wartości chwilowej napięcia łuku $u_ł$ i prądu łuku $i_ł$ zgodnie z zależnością

$$p_ł = u_ł \cdot i_ł \qquad /1/$$

Moc czynna łuku jest równa

$$P_ł = \frac{1}{T} \int_0^T u_ł \, i_ł \, dt \qquad /2/$$

przy czym w zależności od rezystancji łuku $R_ł$ można zapisać

$$P_ł = I_ł^2 \, R_ł \qquad /3/$$

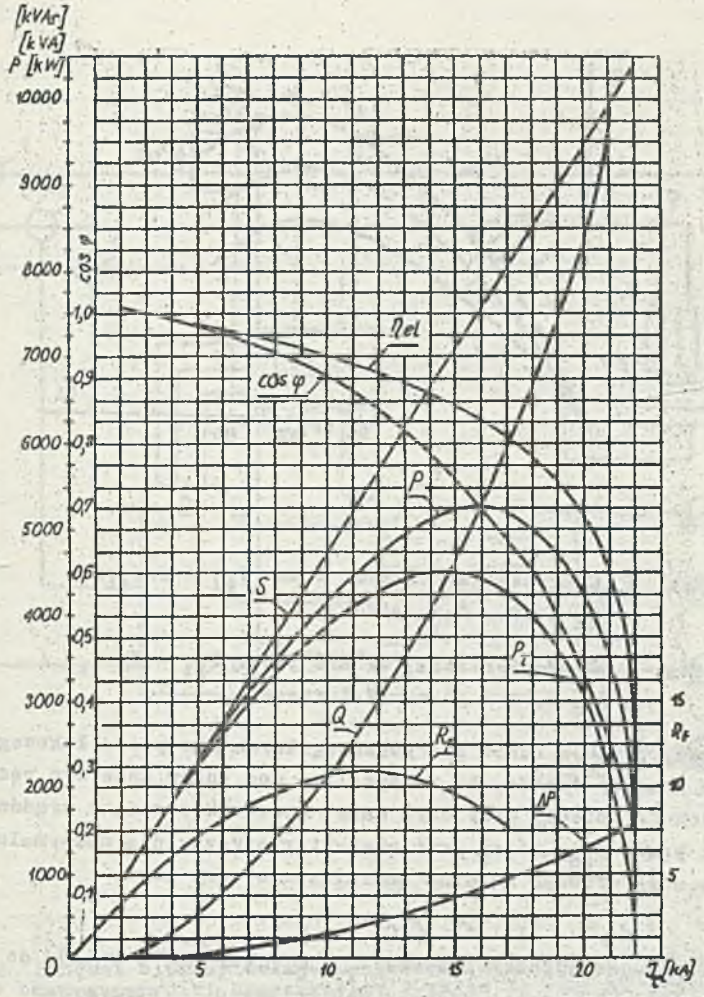
gdzie: $I_ł$ - wartość skuteczna prądu łuku.

W przypadku urządzeń łukowych posiadających asymetrię impedancji fazowych a ściślej reaktancji fazowych powstałych na skutek asymetrii geometrycznej konstrukcji układu trójfazowego, zachodzi bardzo szkodliwe zjawisko tzw. przenoszenie mocy. Zjawisko to prowadzi do niejednorodnego rozkładu pola temperatury w elektrycznym piecu łukowym oraz do nierównomiernego zużywania się wymurówki ogniotrwałej pieca. Aby zapobiegać powstawaniu tak dalece szkodliwych zjawisk konieczna jest kontrola i znajomość poszczególnych wartości fazowych mocy łuków. Informacje te mogą posłużyć jako dane wyjściowe w celu dokonania doraźnego dosymetryzowania elektrycznego urządzenia łukowego.

2. TEORETYCZNE PODSTAWY POMIARU MOCY ŁUKÓW

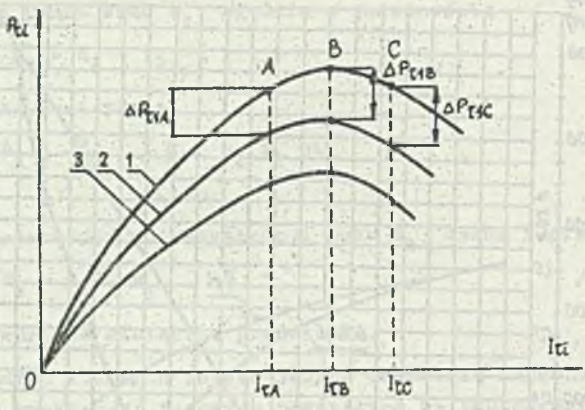
Ponieważ rezystancje poszczególnych łuków elektrycznych $R_{łi}$ w piecach łukowych są trudne do określenia, metoda pomiaru mocy łuków nie może być oparta na zależności (3).

Natomiast powinna bazować na znajomości chwilowych wartości napięć łuków $u_{łi}$ i prądów łuków $i_{łi}$ zgodnie z zależnością (2). Moc łuku badanego urządzenia łukowego można także obliczać na podstawie znajomości fazowego napięcia wtórnego transformatora piecowego / U_{2fi} / oraz parametrów elektrycznych toru wielkoprądowego, a mianowicie jego rezystancji fazowych R_{fi} i reaktancji fazowych X_{fi}. Wiadomo jednak, że zarówno rezystancje R_{fi}, a tym bardziej reaktancje X_{fi} nie są stałe i zmieniają się w funkcji położenia toru wielkoprądowego, składu harmonicznych prądu łuku itp przez co wyznaczone moce są obarczone znacznymi błędami. Do tego dochodzą jeszcze wahania napięcia U_{2fi}, co w efekcie daje całą gamę charakterystyk mocy łuku, obowiązujących dla różnych warunków pracy pieca. Przykładowy zestaw charakterystyk mocy czynnej łuku oraz mocy strat, jak też mocy pobranej przez jedną fazę urządzenia łukowego przy założeniu sinusoidalnych przebiegów prądów łuku przedstawiono na rys.1. Na rys.2 przedstawiono charakterystyki mocy łuków /$P_{łi} = f/I_{łi}$ //



Rys.1 Przykładowe charakterystyki mocy P pobieranej przez jedną fazę urządzenia łukowego, mocy fazowej łuku $P_ł$ oraz mocy fazowej strat ΔP w funkcji prądu łuku $I_ł$.

Fig. 1 Example characteristics of power P consuming in one phase of arc installation, phase arc power $P_ł$ and phase power losses ΔP as a function of arc current $I_ł$



Rys. 2 Charakterystyki mocy łuków $P_{łi} = f/I_{łi}/$:
1, 2, 3 - fazy pieca.

Fig. 2 Characteristics of arc power $P_{łi} = f/ I_{łi} /$
1, 2, 3 - phase of furnace.

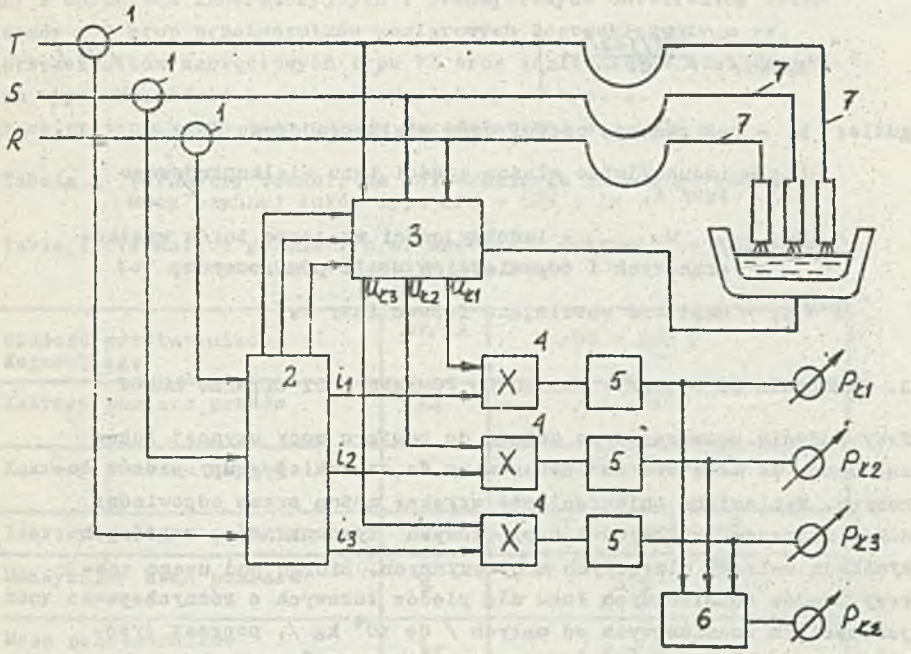
w funkcji prądów łuków dla poszczególnych faz pieca łukowego. Z ich analizy wynika, że maksymalna moc łuków może być różna dla różnych faz pieca, przy czym nawet niewielkie zmiany prądów łuku wokół prądu $I_{łB}$, który jest charakterystyczny dla maksymalnych mocy łuków mogą wywołać znaczne zmniejszenie mocy łuku:

$$/ \quad P_{łA} < P_{łB} > P_{łC} \quad /$$

Wykorzystując sygnały prądowe $i_{łi}$ otrzymywane z układu do pomiaru prądu łuku [1], jak i sygnały napięciowe $u_{łi}$ otrzymywane z układu do pomiaru napięcia łuku [2] można uzyskać poprzez zastosowanie układów mnożących moce czynne fazowe poszczególnych łuków $P_{łi}$ zgodne z zależnością (2), a także sumaryczną moc czynną tych łuków $P_{łΣ}$ zgodnie z zależnością

$$P_{łΣ} = \sum_{i=1}^{3} P_{łi} \qquad / 4 /$$

Schemat blokowy układu do pomiaru mocy łuków przedstawiono na rys. 3. Układy 2 i 3 pozwalają na wyznaczenie wartości chwilowych prądów łuków $i_{łi}$ i napięć łuków $u_{łi}$ poszczególnych faz, przy czym pomiar napięć łuków dokonywany jest metodą pośrednią, natomiast



Rys. 3 Schemat blokowy układu do pomiaru mocy czynnej łuków: 1-przetworniki Rogowskiego, 2-układ do pomiaru prądu łuku, 3-układ do pomiaru napięcia łuku, 4-układy mnożące, 5-filtry aktywne niskiej częstotliwości, 6-sumator, 7-tory wielkoprądowe

Fig. 3 Block diagram of system for measurement of active power of arcs: 1-Rogowski transducer, 2-system for measurement of arc current, 3-system for measurement of arc voltage, 4-multiplier device, 5-active filter low frequency, 6-adder, 7-high current circuits

układy mnożące 4 pozwalają na wyznaczenie mocy chwilowej $p_{łi}$ z iloczynu tych wielkości [2]. Błąd pomiaru mocy czynnych łuków zależeć będzie od dokładności odwzorowania przebiegu prądu łuku oraz napięcia łuku danej fazy. Zagwarantowanie wymaganej dokładności pomiaru mocy czynnej łuków narzuca konieczność zastosowania kompensacji spadków napięć towarzyszących pomiarom napięcia

łuku zgodnie z zależnością [2]

$$u_{łi} = u_{fi} - \left[R_i i_{łi} + L_{ii} \frac{di_{łi}}{dt} + M_{i/i+1/} \frac{di_{łi/i+1/}}{dt} + M_{i/i+2/} \frac{di_{łi/i+2/}}{dt} \right] \qquad /5/$$

gdzie: R_i - rezystancja części toru wielkoprądowego fazy i,

L_{ii} - indukcyjność własna części toru wielkoprądowego fazy i,

$M_{i/i+1/}$, $M_{i/i+2/}$ - indukcyjności wzajemne torów wielkoprądowych i odpowiednich pętli pomiarowych,

u_{fi} - napięcie zasilające fazowe fazy i.

3. ZAŁOŻENIA DO PROJEKTU UKŁADU DO POMIARU MOCY CZYNNEJ ŁUKÓW

Przy budowie uniwersalnego układu do pomiaru mocy czynnej łuków założono, że może być on zastosowany do szerokiej grupy pieców łukowych. Wymienioną uniwersalność uzyskać można przez odpowiedni dobór zakresów prądowych i napięciowych tych układów, z których wynikają zakresy mierzonych mocy czynnych. Biorąc pod uwagę zakresy prądów znamionowych łuku dla pieców łukowych o różnych pojemnościach znamionowych od małych / do 10^4 kg /, poprzez średnie / do $5 \cdot 10^4$ kg / do największych /do $4 \cdot 10^5$ kg / można wybrać trzy charakterystyczne wartości prądów znamionowych: 20 kA dla pieców małych, 50 kA dla pieców średnich oraz 100 kA dla pieców dużych [1]. Zakresy te uwzględniają również aktualną tendencję światową do stosowania pieców łukowych dużej mocy /HP/ oraz bardzo dużej mocy /UHP/.
Biorąc pod uwagę zakresy napięć znamionowych wtórnych dla pieców łukowych o wymienionych wyżej pojemnościach znamionowych można wybrać cztery charakterystyczne wartości napięć: 200 V dla pieców małych, 400 V i 600 V dla pieców średnich oraz 800 V dla pieców dużych [2]. Zakresy mocy czynnych układów wynikają bezpośrednio z zakresów prądowych i napięciowych. Dla pieców małych otrzymuje się zakres mocy czynnych 4MW dla pieców średnich 20 MW i 30 MW oraz dla pieców dużych 80 MW. Dla umożliwienia pomiarów mocy czynnej nie tylko łuków, ale również mocy sumarycznej wraz ze stratami mocy czynnej na elementach rezystancyjnych oraz uwzględniając duży rozrzut parametrów torów wielkoprądowych przewidziano możliwość uczulenia układów pomiarowych w stosunku 1-2-4.

4. UKŁADY DO POMIARU MOCY CZYNNYCH ŁUKÓW W STALOWNICZYCH PIECACH ŁUKOWYCH

Przy współpracy zespołów Politechniki Białostockiej i Instytutu Elektrotechniki w Warszawie został zaprojektowany, wykonany i zbadany w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych uniwersalny układ złożony z 3 grup przetworników pomiarowych Rogowskiego typu PP, 3 przekładników napięciowych typu PN oraz analizatorów elektronicznych typu AM zgodnie ze schematem blokowym z rys. 3.
Parametry techniczne tego układu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Parametry techniczne uniwersalnego układu do pomiaru mocy czynnej łuków typu 3PP + 3PN + AM

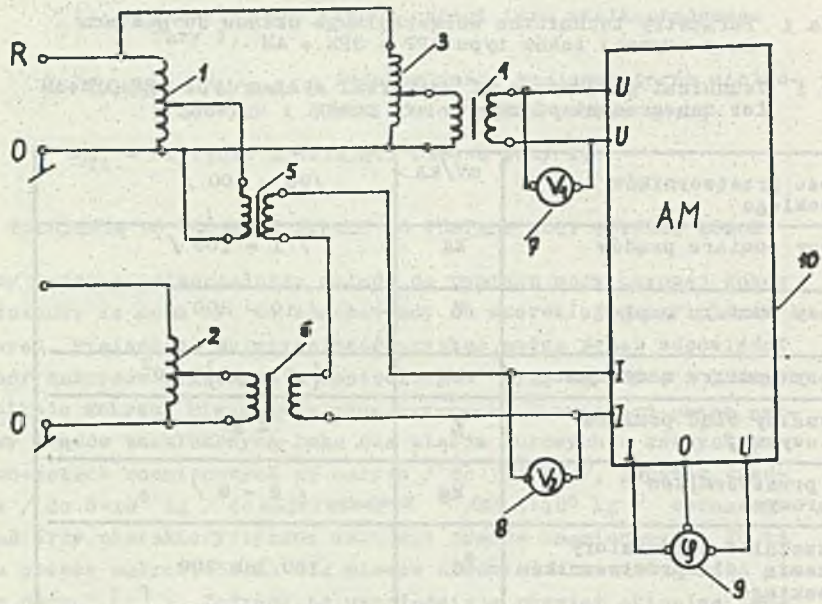
Table 1 Technical parameters of universal system type 3PP+3PN+AM for measurement of active arc power

Czułość przetworników Rogowskiego	mV/kA	/90 - 200 /
Zakresy pomiaru prądów	kA	/ 1 - 100 /
Zakresy pomiaru napięć	V	/ 10 - 800 /
Zakresy pomiaru mocy czynnej	kW	$(10 - 80) \cdot 10^3$
Maksymalny błąd pomiaru mocy czynnej	%	± 5
Masa przetworników pomiarowych	kg	/ 2 - 6 /
Dopuszczalne temperatury otoczenia dla przetworników Rogowskiego	°C	100 lub 200
Dopuszczalne temperatury otoczenia dla analizatora	°C	50

Zakresy kompensacji spadków napięć przewidziano dla indukcyjności własnej L - 80 % od nastawionego zakresu napięcia, dla rezystancji R i indukcyjności wzajemnej M - 40 % od nastawionego zakresu napięcia. Układy mnożące zastosowane w układzie do pomiaru mocy czynnej są układami hybrydowymi typu AM1 o błędzie nie większym niż 1%. Są to układy mnożenia dwućwiartkowego, tzn. jeden z sygnałów wejściowych powinien się mieścić w zakresie 0- + 10 V, drugi - - 10 V - 0 + 10 V.

Na wyjściu układu mnożącego otrzymuje się wartość chwilową mocy. Do celów pomiarowych interesująca jest moc czynna, czyli moc średnia, którą otrzymuje się przez odfiltrowanie składowych zmiennych mocy. Do tego celu służą dolno-przepustowe filtry aktywne drugiego

rzędu o częstotliwości odcięcia 3 Hz. Tłumienie składowej zmiennej o częstotliwości f = 100 Hz wynosi 50 dB /rys. 3 /. Wykonano dwie wersje analizatorów elektronicznych w wersji analogowej typu AM1 i cyfrowej AM2. Oba układy zbadano w warunkach laboratoryjnych symulując napięcie otrzymywane z przetworników Rogowskiego typu PP i przekładników napięciowych typu PN w postaci sygnałów napięciowych sinusoidalnych zgodnie z rys. 4.



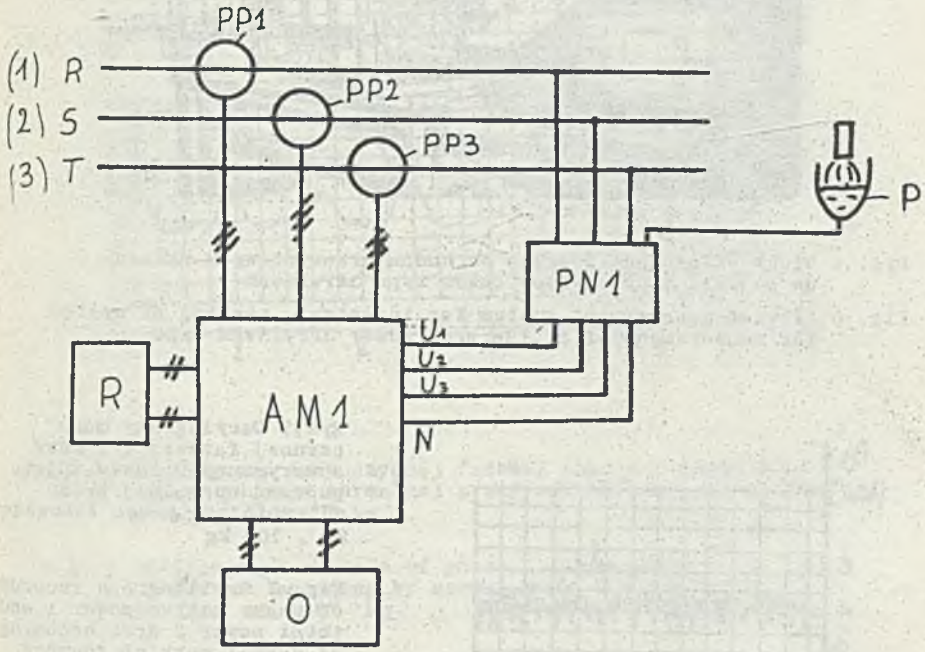
Rys.4 Układ pomiarowy stosowany przy badaniach laboratoryjnych analizatorów mocy czynnych łuków typu AM1 i AM2: 1, 2, 3, 4, 5, 6 - transformatory i autotransformatory regulacyjne 7,8-woltomierze cyfrowe, 9-elektroniczny miernik fazowy, 10-badany analizator

Fig. 4 Measuring system used by laboratory investigation of analyser of active arc power AM1 and AM2 type: 1,2,3,4,5,6-transformers and controled autotransformers, 7,8-digital voltmeters, 9-electronic phase meter, 10-testing analyser

Badania te potwierdziły występowanie maksymalnych błędów przy pomiarze mocy czynnej nie przekraczających ± 5 %.

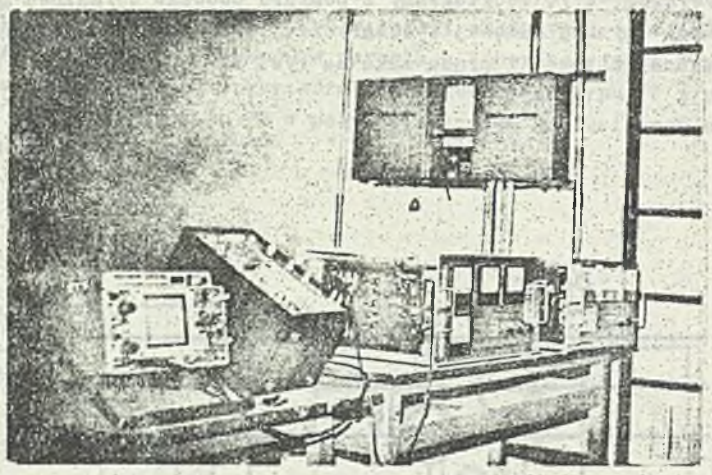
Badania przemysłowe układu typu 3PP + PN + AM przeprowadzono na odlewniczym piecu łukowym do topienia żeliwa o pojemności $25 \cdot 10^3$ kg

z transformatorem piecowym o mocy 12 MVA i znamionowym prądem łuku 30 kA /rys. 5, 6 /. Oscylogramy z pomiaru podczas normalnej pracy pieca mocy czynnej fazowej i sumarycznej przedstawiono na rys. 7, zaś mocy czynnej fazowej i prądu łuku na rys. 8.



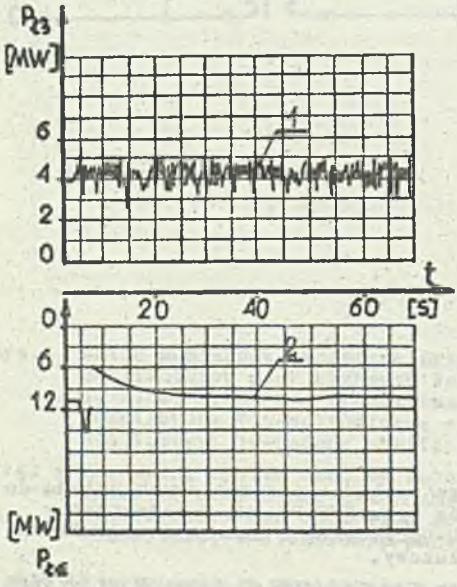
Rys.5 Schemat układu pomiarowego do badań przemysłowych układu do pomiaru mocy czynnej łuków typu 3PP+PN+AM: R-rejestrator 2-kanałowy firmy Gould, O-oscyloskop z kamerą fotograficzną firmy Tektronix, P-piec łukowy.

Fig.5 Scheme of measuring system for industrial testing of system for measuring of active arc power 3PP+PN+AM type: R-dual canal recorder from firma Gould, O-oscilloskope with photographic camera from firma Tektronix, P-arc furnace



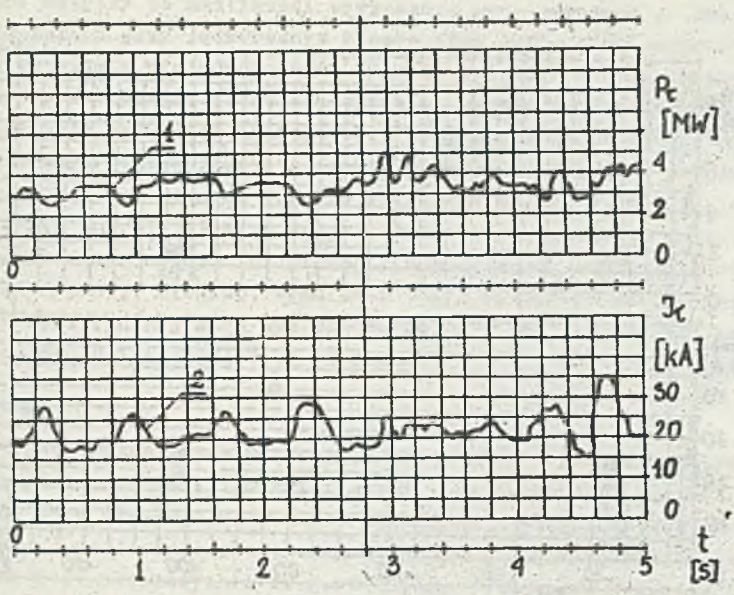
Rys. 6 Widok układu pomiarowego do badań przemysłowych układu do pomiaru mocy czynnej łuków typu 3PP+PN+AM

Fig. 6 View of measurement system for industral testing of system for measurement of active arcs power 3PP+PN+AM type



Rys.7 Oscylogramy mocy czynnej fazowej 1 i mocy sumarycznej 2 łuków zdjęte podczas normalnej pracy odlewniczego pieca łukowego 25 . 10^3 kg

Fig. 7 Oscillograph records of phase active power 1 and total power 2 arcs becoming by normal work of foundry arc furnace 25 ·10^3 kg

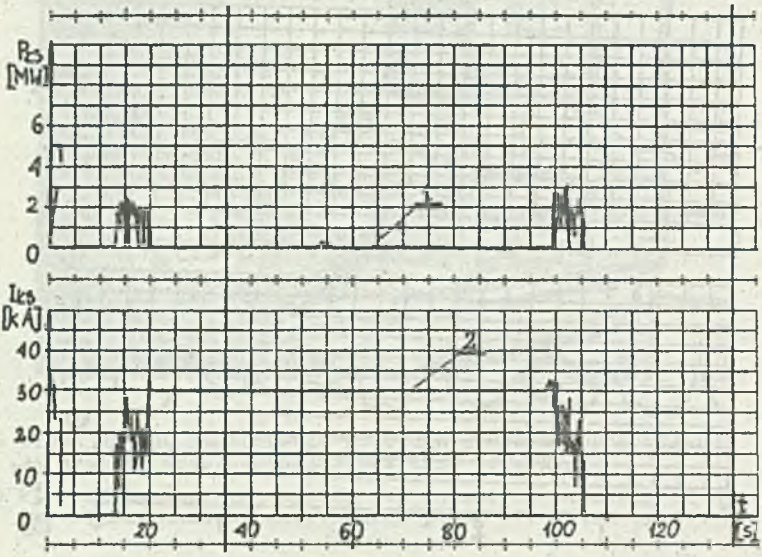


Rys. 8 Oscylogramy mocy czynnej fazowej łuku 1 i prądu łuku 2 zdjęte podczas normalnej pracy odlewniczego pieca łukowego 25 • 10^3 kg

Fig. 8 Oscillograph records of phase active power 1 and arc current 2 becoming by normal work of foundry arc furnace 25 •10^3 kg

Rys. 9 przedstawia pomiary związane z próbą zwarcia potwierdzające uzyskanie prawidłowych warunków kompensacji w układzie pomiaru napięcia łuku /stała wartość prądu zwarcia oraz zerowa moc łuku/. Podczas badań przemysłowych dokonywano kompensacji układu zarówno w warunkach zwarć pomiarowych, jak też zwarć eksploatacyjnych oraz przy normalnej eksploatacji.

Doświadczenia zdobyte przez zespół konstruktorów i metrologów przy opracowywaniu i badaniach uniwersalnego układu do pomiaru mocy czynnej łuków pozwoliły na opracowanie, wykonanie i wdrożenie do eksploatacji stacjonarnego układu do pomiaru parametrów łuków, w tym mocy czynnej dla największego stalowniczego pieca łukowego o pojemności 140 • 10^3 kg pracującego w kraju /tab.2/. Wykorzystanie przenośnych stacjonarnych układów do pomiaru mocy czynnych łuków w stalowniczych i odlewniczych piecach łukowych pracujących w kraju powinno przynieść wymierne korzyści techniczne



Rys. 9 Oscylogramy mocy czynnej fazowej łuku 1 oraz prądu zwarcia 2 zdjęte podczas zwarcia pomiarowego na odlewniczym piecu łukowym $25 \cdot 10^3$ kg

Fig. 9 Oscillograph records of phase active power 1 and short-circuit current 2 becoming by measuring short-circuit of foundry arc furnace $25 \cdot 10^3$ kg

Tabela 2 Parametry techniczne stacjonarnego układu do pomiaru mocy czynnej łuków dla stalowniczego pieca łukowego $140 \cdot 10^3$ kg

Table 2 Technical parameters of stationary system for measurement of active arc power for steelmaking arc furnace $140 \cdot 10^3$ kg

Czułość przetworników Rogowskiego	$\frac{mV}{kA}$	/140 - 160 /
Zakresy pomiaru prądów	kA	/ 1 - 100 /
Zakres pomiaru napięć	V	/ 10 - 600 /
Zakres pomiaru mocy czynnej	kW	$20 - 20.10^3$
Maksymalny błąd pomiaru mocy czynnej	%	± 5

i ekonomiczne. Korzyści techniczne sprowadzają się do pomiaru podstawowej wielkości fizycznej jaką jest moc czynna łuków, która decyduje o przebiegu procesu technologiczno-

energetycznego, a której dotychczas w piecach się nie mierzy. W szczególności dotyczy to możliwości wyrównania mocy czynnych w poszczególnych fazach przy jednorodnym złomie oraz określonej asymetrii tych mocy przy złomie niejednorodnym. Sygnały związane z mocą czynną łuków mogą być wykorzystane do podsterowywania automatycznego układu regulacji mocy przy wykorzystaniu systemów komputerowych. Z punktu widzenia ekonomicznego stalownicze i odlewnicze piece łukowe mogą pracować przy wykorzystaniu omawianych układów w różnych wersjach np przy minimalnym zużyciu energii elektrycznej i elektrod na jednostkę produktu lub przy maksymalnej wydajności pieców / w zależności od relacji cen energii elektrycznej, elekrod, wymurówki itp/. Przewidywane oszczędności energii elektrycznej mogą być szacowane na / 10-15 / kWh/10^3 kg, zaś elektrod na /0,5-1/ kg/10^3 kg produktu.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań związanych z projektowaniem, wykonywaniem i badaniami laboratoryjnymi i przemysłowymi układów do pomiarów mocy czynnej łuków można wyciągnąć następujące wnioski:

a/ Istnieje możliwość wyposażenia wszystkich łukowych pieców odlewniczych i stalowniczych w kraju w układy do pomiaru mocy czynnej łuków.

b/Zapewni to przy niewielkich nakładach finansowych wymierne oszczędności energii elektrycznej i materiałów.

c/ Zwiększenie dokładności układów do pomiarów mocy czynnej łuków zależeć będzie od warunków kompensacji układów napięciowych, które powinny być realizowane w systemie adaptacyjnym.

LITERATURA

1. Dmochowski Z, Kierus K, Stecki A, Maj P. Problematyka pomiaru wielkich prądów w stalowniczych, ferrostopowych i karbidowych piecach elektrycznych VIII Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej. Gliwice, wrzesień 1989 r.

2. Dmochowski Z, Kowalski W. Problematyka pomiaru napięcia łuku w stalowniczych piecach łukowych VIII Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej. Gliwice, wrzesień 1989 r.

PROBLEMATICS OF MEASURING ACTIVE POWER IN STEELMAKING ARC FURNACES.

Summary

The paper presents specific problems of measuring the active power of arcs in steelmaking arc furnaces. Measurement conditions are characterized as well as the factors influencing measurement accuracy. A mathematical model representing the indirect measuring method of arc active power and a block diagram of the measuring system based on this model are presented. The measuring system includes linear measuring transducers of the Rogowski type, special voltage transformers and electronic modules permitting instantaneous values of arc

current and voltage and then instantaneous arc power and as a result the active power of arcs to be measured. Basic technical parameters of the system developed for measuring arc active power, of the 3PP + + PN + AM type and results of tests in industrial conditions are given. Technical parameters of a stationary system designed and constructed for measuring arc active power for a steelmaking arc furnace with $140 \cdot 10^3$ kg capacity are also given.
Technical and economic advantages resulting from using these systems for conducting technologic and power-engineering processes in steelmaking and foundry arc furnaces are presented.

ПРОБЛЕМАТИКА ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

Резюме. В реферате оговаривается специфика измерения активной мощности в сталеплавильных дуговых печах, дана характеристика условий измерения, приведены факторы, влияющие на точность измерения. Представлена математическая модель, отображающая промежуточный метод измерения активной мощности дуг, а также блочную структуру, основанную на этой модели измерительной системы, содержащей линейные преобразователи типа Роговского, специальные измерительные трансформаторы и электронные подузлы, позволяющие получать мгновенные значения тока и напряжения дуги, а затем мгновенные значения мощности дуги, а также в результате - активной мощности дуг. Поданы основные технические параметры разработанной системы для измерения активной мощности дуг типа 3PP + PN + AM, а также результаты ее исследований в промышленных условиях. Поданы технические параметры разработанной и изготовленной стационарной системы для измерения активной мощности дуг для сталеплавильной дуговой печи емкостью $140 \cdot 10^3$ кг. Представлены технико-экономические показатели, подтверждающие выгоду использования этих систем в технологическо-энергетическом процессе в сталеплавильных и литейных дуговых печах.