

JÓZEF DANCEWICZ  
Katedra Odlewnictwa.

## ŻELIWIAK JAKO OBIEKT STEROWANIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań własności statystycznych i dynamicznych żeliwiaka jako obiektu sterowania. Badania własności statystycznych przeprowadzono w zakresie praktycznie stosowanych zmian parametrów wejściowych żeliwiaka. Badania własności dynamicznych przeprowadzono metodą pomiaru charakterystyk czasowych przy wymuszeniu skokowym. Na podstawie linearyzacji charakterystyk, określono transmitancję żeliwiaka oraz podano przybliżone równania statyki i dynamiki procesu żeliwiakowego, które mogą być wykorzystane przy projektowaniu układu kompleksowej automatyzacji odlewni.

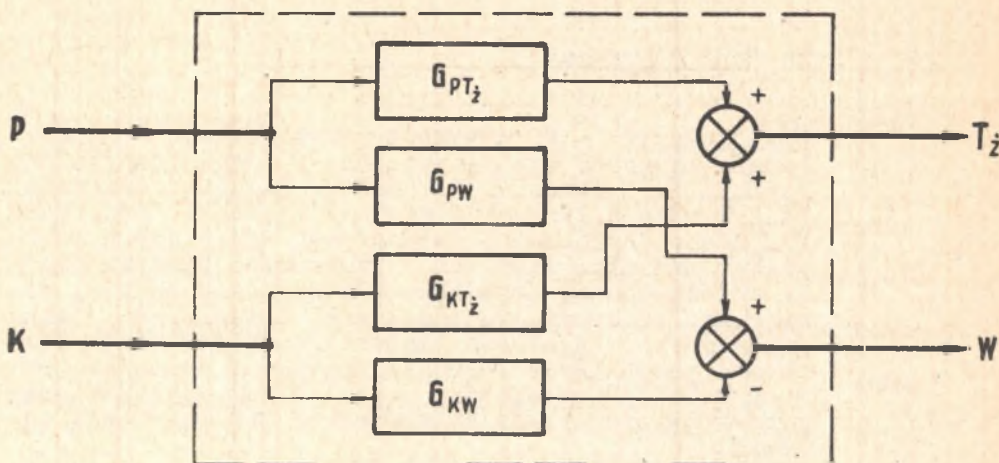
### 1. Wstęp

Rozpoznanie charakteru obiektu, w którym proces ma być sterowany oraz określenie jego parametrów, jest czynnością wstępną, bez której nie można przystąpić do analizy i projektowania układu sterowania. Każdy obiekt, w którym proces ma być sterowany, winien być poddany określonym badaniom, pozwalającym rozpoznać jego własności statyczne i dynamiczne.

Żeliwiak, jako obiekt sterowania, jest dotychczas obiektem mało znanym. Pewne dane o własnościach statycznych żeliwiaka można znaleźć w literaturze odlewniczej [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Dane te mają z reguły charakter pogładowy i przedstawiają jakością zależność pomiędzy parametrami wyjściowymi i wejściowymi żeliwiaka. Własności dynamiczne żeliwiaka są w ogóle nieznane. Tak więc żeliwiak pod względem własności sterowniczych jest obiektem bliżej nieznanym i nie ma do tej pory danych, które mogłyby posłużyć przy projektowaniu i analizie układu sterowania procesem żeliwiakowym.

Żeliwiak pod względem własności sterowniczych należy rozpatrywać jako obiekt o dwóch parametrach wejściowych i dwóch parametrach wyjściowych. Parametrami wejściowymi są ilość powietrza dmuchu doprowadzana do żeliwiaka  $P$  i rozchód koksu wsadowego  $K$ . Parametrami wyjściowymi są temperatura ciekłego żeliwka  $T_z$  i wydajność żeliwiaka  $W$ .

Schemat blokowy żeliwiaka jako dwuparametrowego obiektu sterowania przedstawia rys. 1. Na schemacie tym wyodrębniono poszczególne tory działania parametrów:  $P-T_z$ ,  $P-W$ ,  $K-T_z$  i  $K-W$ , charakteryzujące się ogólnie transmitancjami  $G$ .



Rys. 1

Postacie transmitancji  $G$  oraz wartość parametrów wchodzących w skład tych transmitancji określają w zupełności obiekt sterowania.

W celu określenia transmitancji żeliwiaka przeprowadzono eksperymentalne badania na żeliwiaku przemysłowym o średnicy 1000 mm, o trzech rzędach dysz, zasilanym zimnym dmuchem i pracującym cyklicznie po 14 godzin przy ciągłym odbiorze żeliwa.

## 2. Badania własności statycznych

Celem badań statycznych było możliwie dokładne zbadanie charakterystyk statycznych żeliwiaka, określenie przybliżonych równań statyki procesu żeliwiakowego oraz ewentualne wykrycie i zbadanie pewnych charakterystycznych własności żeliwiaka, ważnych z punktu widzenia sterowania.

Zasadnicze badania przeprowadzono w stosunkowo szerokim zakresie zmian wartości parametrów wejściowych żeliwiaka. Badania te, obejmujące wg rys. 1 tory  $P-T_z$ ,  $P-W$ ,  $K-T_z$  i  $K-W$ , przeprowadzono w następujących warunkach pracy żeliwiaka:

- a) przy dwóch rodzajach koksu: koksu "klasycznego" (charakteryzującego się wysoką jakością) o wielkości kawałków

80-120 mm i koksu formowanego gatunku "BB" (charakteryzującego się niską jakością);

- b) przy wsadzie metalowym złożonym z kęsów żeliwnych (złom własny odlewni) o ciężarze ok. 9 kg i stosunku objętości do powierzchni ok. 0,011 m;
- c) po 7 godzinach pracy żeliwiaka, tj. w połowie okresu pracy żeliwiaka;
- d) w zbliżonych warunkach atmosferycznych; maksymalny zakres zmian temperatury powietrza wynosi 10°C, maksymalny zakres zmian wilgotności bezwzględnej powietrza wynosi ok. 3 g/m<sup>3</sup>.

Ponadto, ze względu na szczególne znaczenie dla sterowania procesem żeliwiakowym charakterystyk  $T_z(P)$ , przeprowadzono dodatkowe badania tych charakterystyk w odmiennych niż podano powyżej warunkach.

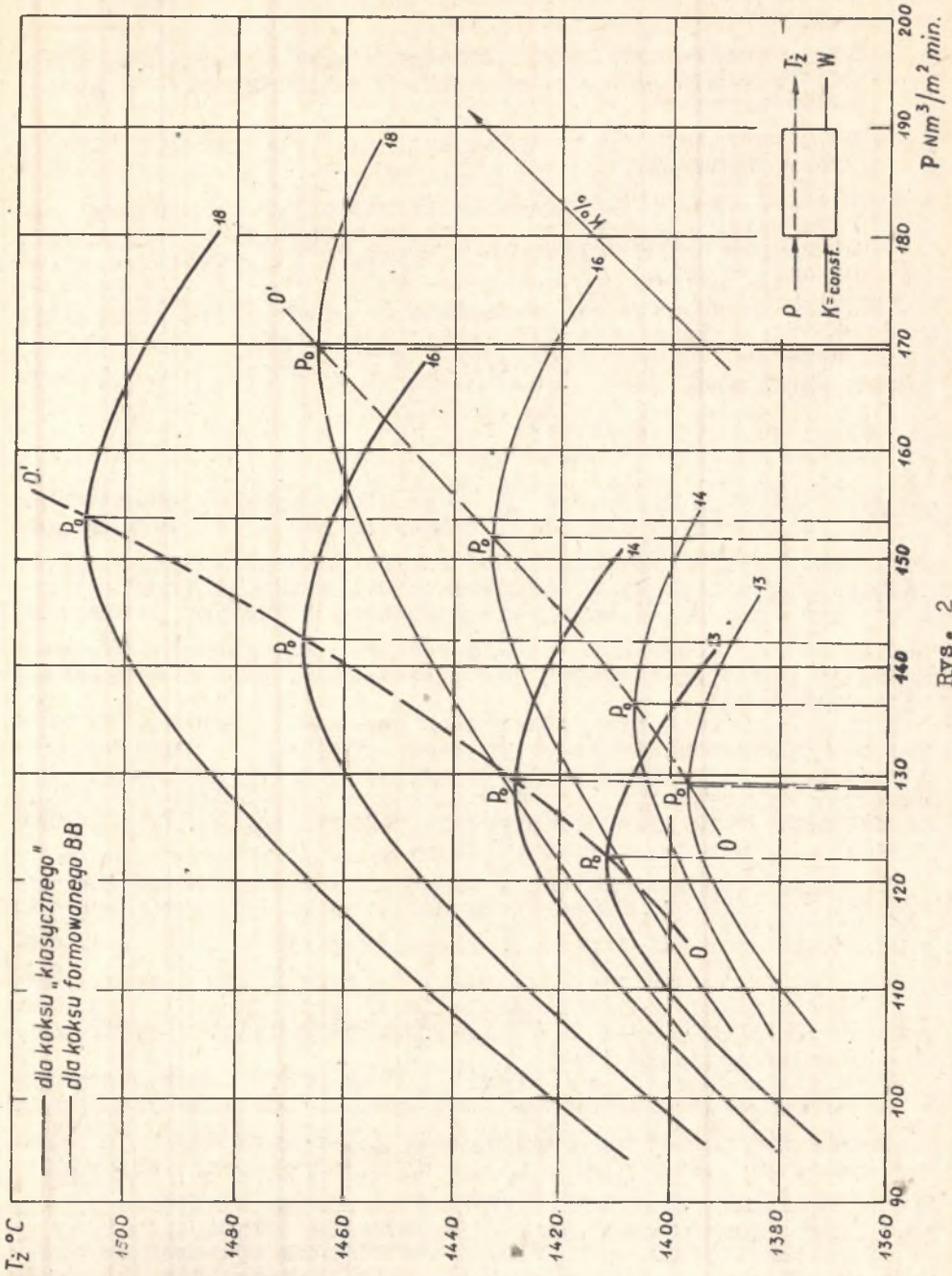
### 2.1. Własności statyczne toru P-T<sub>z</sub>

Na rys. 2 przedstawiono rodzinę charakterystyk statycznych  $T_z(P)$  pomierzonych dla koksu "klasycznego" i formowanego gatunku BB. Z rys. 2 wynika, że ze zmianą jakości koksu, przy niezmiennych pozostałych parametrach żeliwiaka, charakterystyki  $T_z(P)$  ulegają pewnym przesunięciom, którym towarzyszą również zmiany krzywizny charakterystyk. Na szczególną uwagę zasługuje przebieg krzywych 00', łączących punkty optymalnej pracy żeliwiaka.

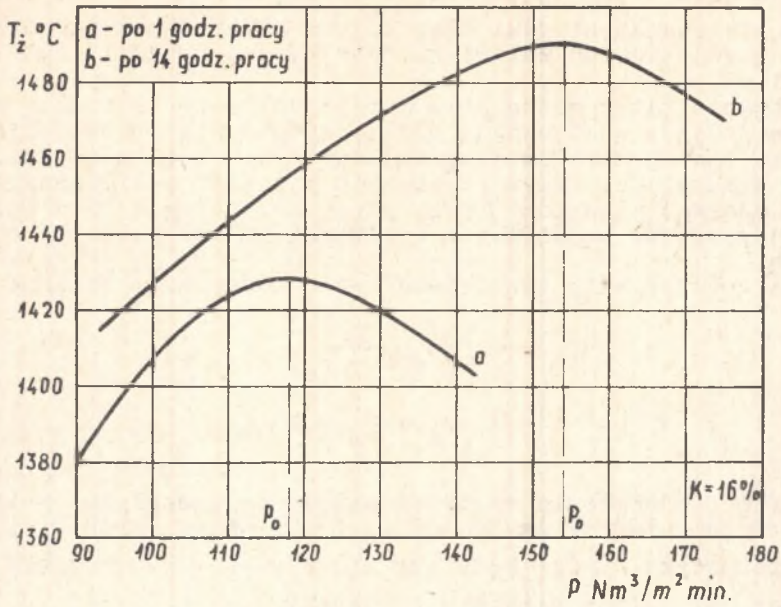
Z charakterystyk przedstawionych na rys. 2 wynika, że różnice temperatur żeliwa przy tym samym rozchodzie, lecz różnych rodzajach koksu są funkcją ilości powietrza dmuchu. Fakt ten wskazuje, że stosowana czasem w praktyce ocena jakości koksu na podstawie otrzymanej temperatury żeliwa jest możliwa tylko przy  $P = P_0$  dla obu rodzajów koksu.

Prowadzone badania zwróciły uwagę na dużą zależność charakterystyk  $T_z(P)$  od czasu pracy żeliwiaka. Z tego względu przeprowadzono również pomiary charakterystyk  $T_z(P)$  w skrajnych przypadkach: na początku pracy żeliwiaka (po 1 godz. pracy) i pod koniec pracy żeliwiaka (po 14 godz. pracy). Wyniki pomiarów ilustruje rys. 3. Pomiary przeprowadzono przy rozchodzie koksu wynoszącym 16%.

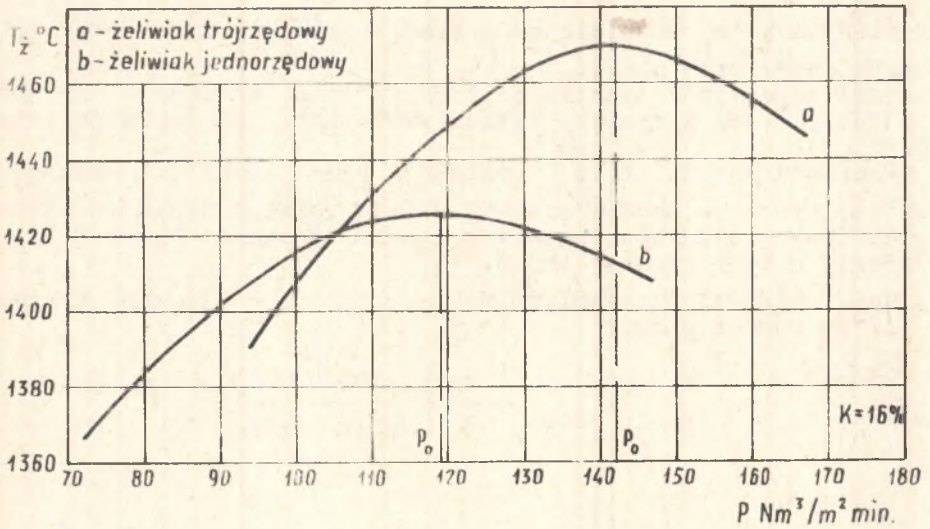
W celu zbadania wpływu ilości dysz na postać charakterystyk  $T_z(P)$  przeprowadzono również pomiary tych charakterystyk przy doprowadzeniu powietrza dmuchu przez jeden rząd dysz głównych. Porównanie charakterystyk  $T_z(P)$ , otrzymanych przy doprowadzeniu do żeliwiaka powietrza dmuchu przez jeden rząd dysz i trzy rzędy dysz, przedstawia rys. 4. Zasadnicze różnice pomiędzy tymi charakterystykami występują w wartościach parametrów optymalnych  $P_0$  i  $T_{z0}$  oraz we współczynnikach krzywizny charakterystyk.



Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4

Otrzymane charakterystyki  $T_{\dot{z}}(P)$  wskazują, że żeliwiak względem toru  $P-T_{\dot{z}}$  jest obiektem nieliniowym i że dokładne określenie równań statyki tego toru w całym zakresie zmian parametrów wejściowych żeliwiaka jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe.

Względnie łatwo można określić przybliżone równania statyki obowiązujące w otoczeniu punktu optymalnej pracy żeliwiaka. Równania takie, mimo swej ograniczoności, mogą mieć duże znaczenie praktyczne, gdyż sterowanie procesem żeliwiakowym winno się odbywać w zasadzie przy stosunkowo niewielkich odchyleniach parametrów wejściowych żeliwiaka od ich wartości optymalnych.

W celu określenia tych równań wprowadźmy nowe zmienne

$$p = P - P_0, \quad (1)$$

$$t_{\dot{z}} = T_{\dot{z}} - T_{\dot{z}0}, \quad (2)$$

określające odchylenia wartości natężenia przepływu powietrza dmuchu i temperatury żeliwa od wartości optymalnych  $P_0$  i  $T_{\dot{z}0}$ . Charakterystykę  $t_{\dot{z}}(p)$  będziemy aproksymować w otoczeniu punktu pracy optymalnej parabolą o równaniu:

$$t_{\dot{z}} = -k_n p^2 \quad (3)$$

Współczynnik  $k_n$  określa krzywiznę charakterystyk w otoczeniu punktu pracy optymalnej.

Wartość tego współczynnika posiada istotne znaczenie zarówno dla wyboru, jak i analizy układu sterowania procesem żeliwiakowym.

Charakterystyki  $t_{\dot{z}}(p)$  posiadają pewną asymetrię względem osi rzędnych, na skutek czego istnieją różnice pomiędzy wartościami współczynników krzywizny dla lewej części krzywej ( $k_{nl}$ ) i prawej części krzywej ( $k_{np}$ ).

Wartości tych współczynników wyznaczono dla każdej krzywej  $t_{\dot{z}}(p)$  za pomocą wzoru:

$$k_{nl}(p) = \frac{t_{\dot{z}}}{p^2} \left[ \frac{^{\circ}C}{Nm^3/m^2 \min^2} \right], \quad (4)$$

przy czym obliczeniowe wartości przyjmowano jako średnie arytmetyczne z dwóch pomiarów:

$$\text{przy } p = \pm 10 \text{ i } \pm 20 \text{ [Nm}^3/\text{m}^2\text{min.]}$$

Wartość  $k_n$  obliczano ze wzoru:

$$k_n = \frac{k_{n1} + k_{np}}{2} \quad (5)$$

W tablicy 1 zestawiono średnie wartości tych współczynników oraz podano wartości stosunku:

$$\frac{k_{n1} - k_{np}}{k_n}$$

charakteryzującego asymetrię charakterystyk  $t_z(p)$ .

W celu określenia przybliżonego równania statyki toru  $P-T_z$  dla optymalnych warunków pracy żeliwiaka, dokonano liniowej aproksymacji charakterystyk  $T'_{z0}(P_0)$ . Wprowadzając zmienne:

$$t_{z0} = T_{z0} - T'_{z0} \quad (6)$$

$$p_0 = P_0 - P'_0 \quad (7)$$

gdzie  $T'_{z0}, P'_0$  - określają początkowy punkt pracy żeliwiaka, otrzymamy przybliżone równanie statyki toru  $P-T_z$  dla optymalnych warunków pracy żeliwiaka w postaci:

$$t_{z0} = k_{0PT_z} \cdot p_0 \quad (8)$$

gdzie

$$k_{0PT_z} = \frac{\Delta T_{z0}}{\Delta P_0} \quad (9)$$

Statyczny współczynnik wzmocnienia  $k_{0PT_z}$  w zakresie zmian rozchodu koksu od 13-18% wynosi:

- dla koksu "klasycznego"

$$k_{0PT_z} = 3,0 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Nm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}} \right] \quad (10)$$

Tablica 1

K %	$\frac{k_{nl}}{10^{-2}} \frac{^{\circ}C}{(Nm^3/m^2/min)^2}$	$\frac{k_{np}}{10^{-2}} \frac{^{\circ}C}{(Nm^3/m^2/min)^2}$	$\frac{k_n}{10^{-2}} \frac{^{\circ}C}{(Nm^3/m^2/min)^2}$	$\frac{k_{nl} - k_{np}}{k_n} \%$
	<u>do 1 godz. pracy żel.</u>			
16	6,55	5,20	5,87	23,0
	<u>po 7 godz. pracy żel. x)</u>			
13	6,65(5,38)	5,66(4,24)	6,15(4,95)	15,3(23,0)
14	5,99(5,08)	5,40(4,47)	5,70(4,77)	11,8(12,8)
16	5,46(4,40)	5,00(3,92)	5,23(4,16)	8,8(11,5)
18	4,97(4,07)	4,38(3,75)	4,67(3,91)	13,1(8,2)
	<u>po 14 godz. pracy żel.</u>			
16	3,54	3,32	3,43	9,3
	<u>po 7 godz. pracy żel.</u>			
16	3,54	3,36	3,45	5,2

x) Liczby bez nawiasów odnoszą się do warunków pracy żeliwiaka z koksem "klasycznym", liczby w nawiasach odnoszą się do warunków pracy żeliwiaka z koksem formowanym.



- dla koksu formowanego

$$k_{OPT\dot{z}} = 1,8 \left[ \frac{P_C}{Nm^3/m^2 \cdot min} \right] \quad (11)$$

## 2.2. Własności statyczne toru K-T<sub>z</sub>

Na rys. 5 przedstawiono rodzinę charakterystyk statycznych T<sub>z</sub>(K) dla koksu "klasycznego" i formowanego dla różnych rozchodów koksu.

Przebieg charakterystyk T<sub>z</sub>(K) wskazuje, że wartość statycznego współczynnika wzmocnienia toru K-T<sub>z</sub>, określonego jako:

$$k_{KT\dot{z}} = \frac{\Delta T_{\dot{z}}}{\Delta K} \text{ dla } P = \text{const}, \quad (12)$$

nie jest wartością stałą.

Dla wartości  $P < P_0$  współczynnik  $k_{KT\dot{z}}$  przyjmuje wartości niższe, niż dla  $P > P_0$ .

Zmiana wartości  $k_{KT\dot{z}}$  następuje w punkcie pracy optymalnej. Zjawisko to wyraźnie<sup>z</sup> widoczne jest na rys. 6 i 7.

W tablicy 2 podano wartości współczynników wzmocnienia  $k_{KT\dot{z},n}$  - dla wartości  $P < P_0$  i  $k_{KT\dot{z},p}$  - dla wartości  $P > P_0$  oraz podano wartości średnie tych współczynników.

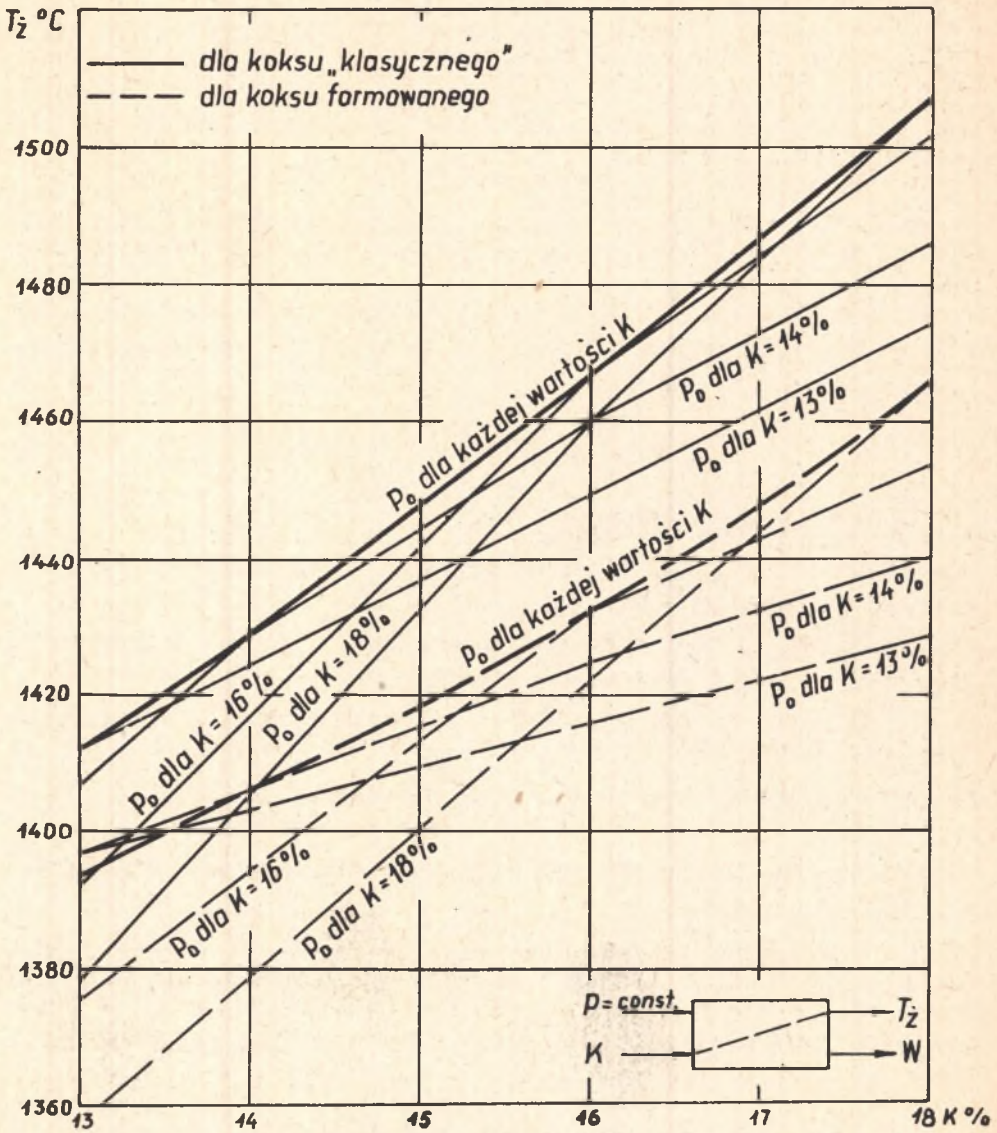
Na rys. 14 przedstawiono zależność współczynnika  $k_{KT\dot{z}}$  od ilości doprowadzonego do żeliwiaka powietrza dmuchu z uwzględnieniem stosunku  $\frac{P}{P_0}$ .

Dla zakresu najczęściej używanych w praktyce wartości rozchodu koksu - od 13 do 18% i zakresu zmian powietrza dmuchu od  $P = P_0$  dla  $K = 13\%$  do  $P = P_0$  dla  $K = 16\%$ , można przyjąć w przybliżeniu następujące średnie wartości  $k_{KT\dot{z}}$  dla koksu "klasycznego"

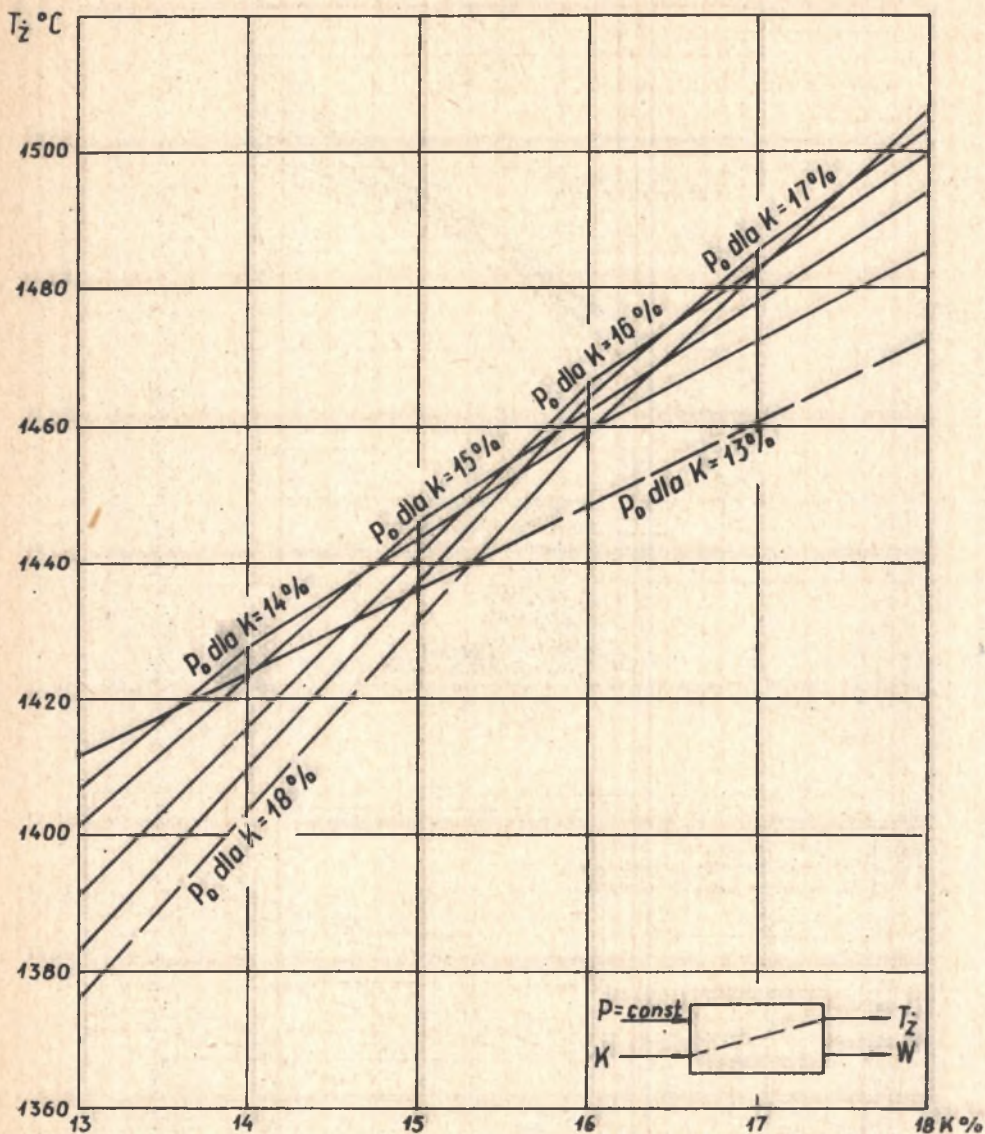
$$k_{KT\dot{z}} = 18 \left[ \frac{^{\circ}C}{\% K} \right] \quad (13)$$

dla koksu formowanego

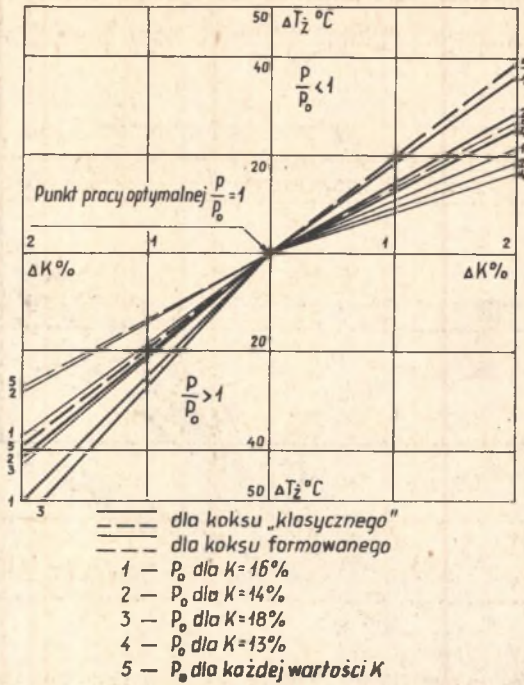
$$k_{KT\dot{z}} = 14 \left[ \frac{^{\circ}C}{\% K} \right] \quad (14)$$



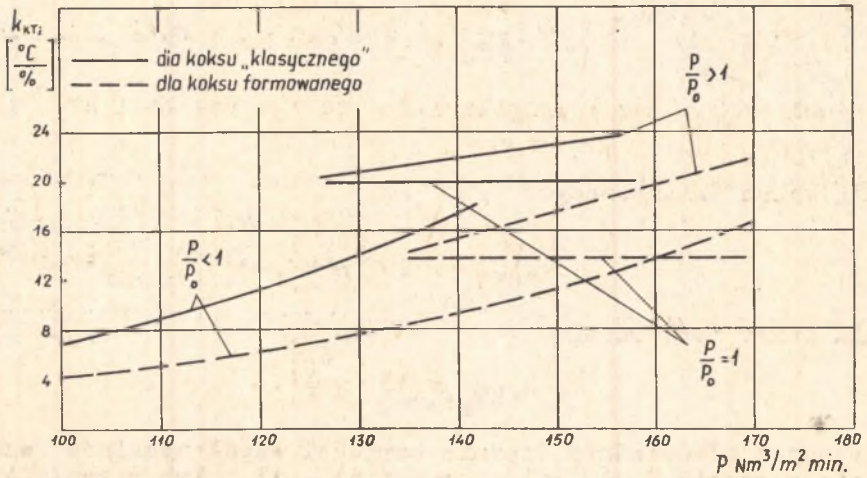
Rys. 5



Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8

Tablica 2

Lp.	K %	$k_{KT_z n}$	$k_{KT_z p}$	$k_{KT_z n}$	$k_{KT_z p}$
		$\frac{^{\circ}C}{\% K}$	$\frac{^{\circ}C}{\% K}$	$\frac{^{\circ}C}{\% K}$	$\frac{^{\circ}C}{\% K}$
		koks "klasyczny"		koks formowany	
1	13	-	13	-	8
2	14	21	14	14	10
3	16	22	18	19	13
4	18	23	-	21	-
		$k_{KT_z \acute{s}r}$	$k_{KT_z \acute{s}r}$	$k_{KT_z \acute{s}r}$	$k_{KT_z \acute{s}r}$
5	13-18	22	15	18	10
6	13-18	$k_{KT_z \acute{s}r} = 18$		$k_{KT_z \acute{s}r} = 14$	
7	13-18	$k_{KT_z \acute{s}r} = 20$		$k_{oKT_z \acute{s}r} = 15$	

Dla warunków optymalnej pracy żeliwiaka (przy  $P = P_0$  dla całego zakresu zmian  $K$ ) otrzymany współczynnik wzmocnienia toru  $K-T_z$  w postaci:

$$k_{oKT_z} = \frac{\Delta T_z}{\Delta K_0} \quad \text{dla } P = P_0 = \text{var.} \quad (15)$$

Wartości  $k_{oKT_z}$  są w przybliżeniu stałe (rys. 26 i 27) i wynoszą:

- dla koksu "klasycznego"

$$k_{oKT_z} = 20 \left[ \frac{^{\circ}C}{\% K} \right], \quad (16)$$

- dla koksu formowanego

$$k_{oKT_z} = 15 \left[ \frac{^{\circ}C}{\% K} \right]. \quad (17)$$

Przyjmując odpowiednio średnie wartości współczynników wzmocnienia z wzorów (13), (14), oraz (16), (17), lub z rys. 14, o-

trzymamy przybliżone równania statyki toru  $K-T_z$ , obowiązujące w otoczeniu punktu optymalnej pracy żeliwiaka, w następującej postaci:

$$t_z = k_{KT_z} \cdot k, \quad (18)$$

$$t_{z0} = k_{oKT_z} \cdot k_o, \quad (19)$$

gdzie:

$$k = K - K_o, \quad (20)$$

$$k_o = K_o - K'_o, \quad (21)$$

$t_z$  i  $t_{z0}$  - jak we wzorach (2) i (6),  $\bar{K}'_o$  - określa początkowy punkt pracy żeliwiaka.

### 2.3. Własności statyczne toru P-W

Zależność wydajności żeliwiaka  $W$  od ilości powietrza dmuchu  $P$ , w ustalonych warunkach pracy żeliwiaka, podawana jest w literaturze [7] w postaci:

$$W = \frac{6000 \cdot F}{4,45 \cdot C_d \cdot K \cdot (2 - S_r)} \cdot \frac{C_o}{0,21} \cdot P, \quad (22)$$

gdzie:

- $F$  - powierzchnia przekroju żeliwiaka,
- $C_d$  - zawartość węgla w koksie,
- $K$  - rozchód koksu,
- $S_r$  - spalność redukcyjna koksu,
- $C_o$  - stężenie tlenu w powietrzu dmuchu.

Z równania (22) wynika, że zależność  $W(P)$  jest nieliniowa, gdyż  $S_r$  jest zależne od  $P$  [3,8]. Zależność  $S_r(P)$  nie jest do- tychczas dokładnie zbadana [8].

Statyczny współczynnik wzmocnienia toru P-W jest zatem wielkością zależną od P:

$$k_{PW} = \frac{6000 \cdot F \cdot C_0}{4,45 \cdot 0,21 \cdot C_d \cdot K [2 - S_r(P)]} \quad (23)$$

Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika jednak, że dla szerokiego zakresu zmian ilości powietrza dmuchu zależność  $W(P)$  jest praktycznie liniowa. Wartość współczynnika  $k_{PW}$ , określonego jako:

$$k_{PW} = \frac{\Delta W}{\Delta P} \quad \text{dla } K = \text{const} \quad (24)$$

jest zatem w szerokim zakresie zmian P w przybliżeniu stała.

Na rys. 9 przedstawiono doświadczalnie wyznaczone charakterystyki statyczne  $W(P)$  przy pracy żeliwiaka z dwoma rodzajami koksu. Na rys. 10-11 zilustrowano różnice występujące pomiędzy tymi charakterystykami. W tabelicy 3 podano wartości statycznych współczynników wzmocnienia  $k_{PW}$  i  $k_{OPW}$ . Na szczególnie uwagę zasługuje ujemna wartość  $k_{OPW}$ .

Tabela 3

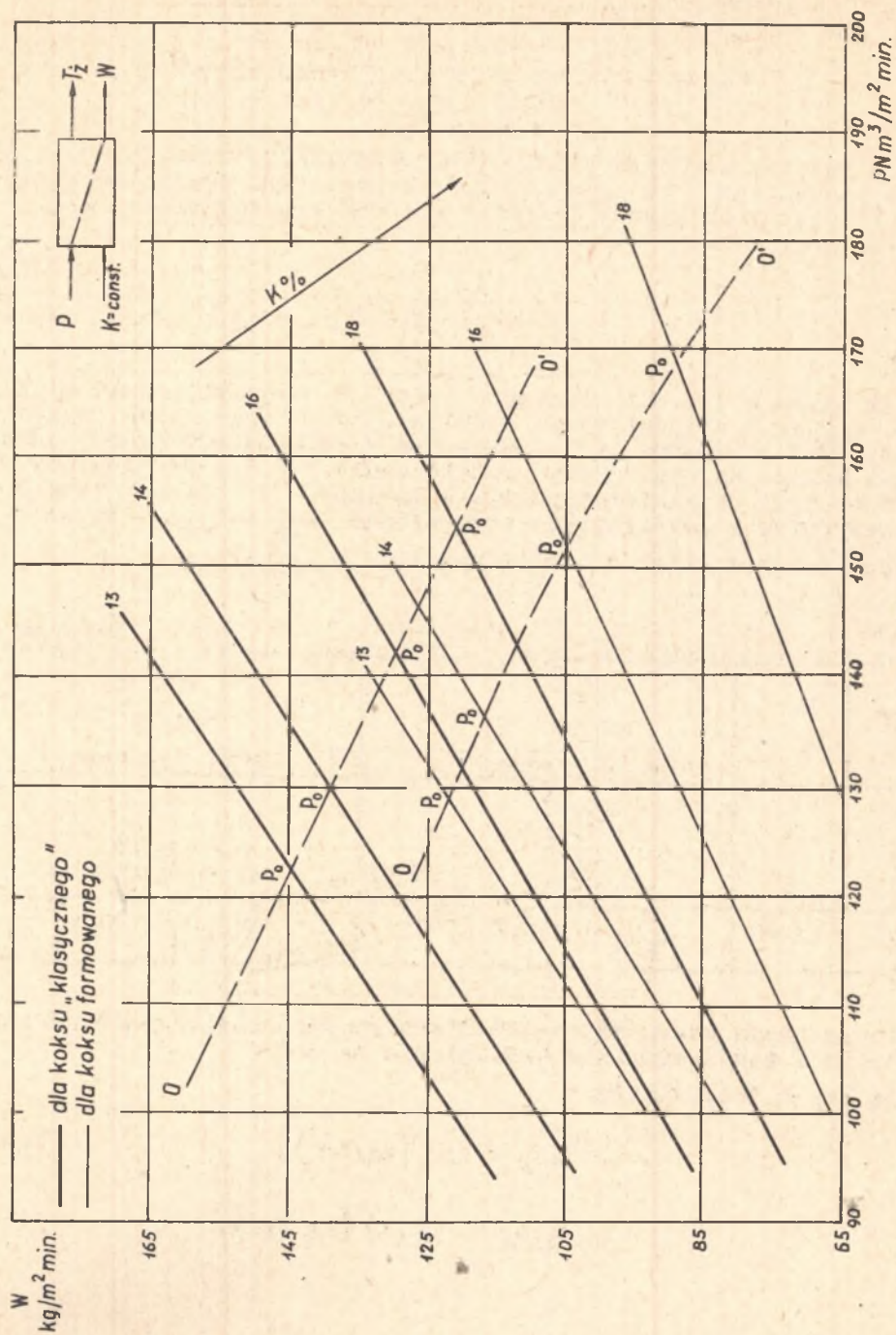
Lp.	K %	$k_{PW}$ kg/Nm <sup>3</sup> koks "klasyczny"	$k_{PW}$ kg/Nm <sup>3</sup> koks formowany
1	13	1,10	1,00
2	14	1,02	2,95
3	16	0,92	0,75
4	18	0,82	0,65
5	13-18	$k_{OPW} = - 0,76$	$k_{OPW} = - 0,83$

Dla rozchodu koksu od 13-16% można przyjąć następujące średnie wartości współczynników wzmocnienia toru P-W:

dla koksu "klasycznego"

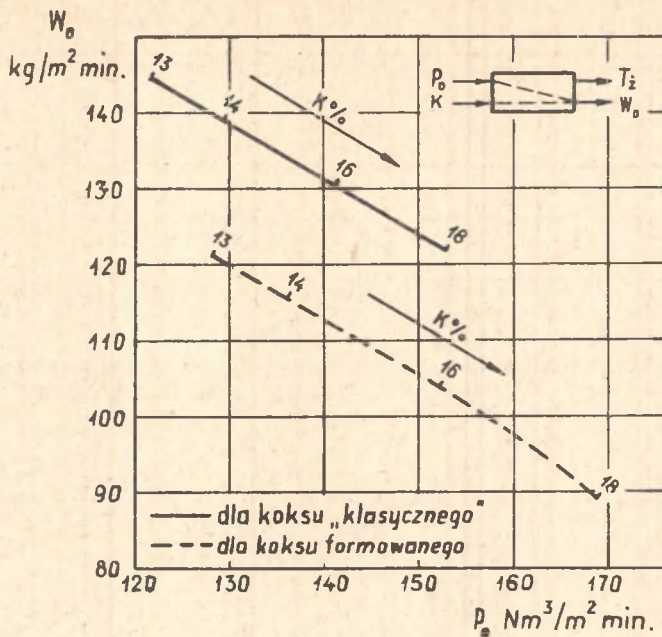
$$k_{PW} = 1,0 \text{ [kg/Nm}^3\text{]}, \quad (25)$$

$$k_{OPW} = - 0,76 \text{ [kg/Nm}^3\text{]}, \quad (26)$$

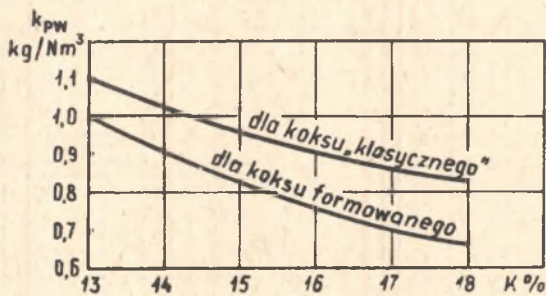


Rys. 9

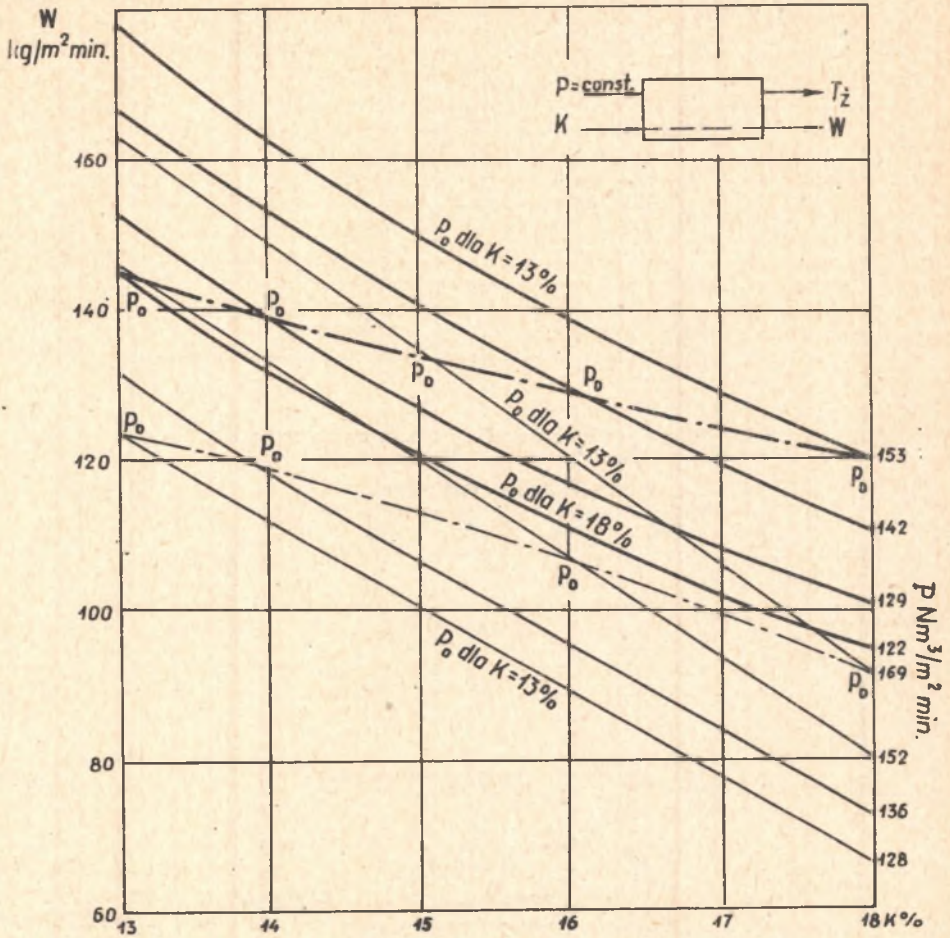




Rys. 10



Rys. 11



Rys. 12

dla koksu formowanego

$$k_{PW} = 0,78 \text{ [kg/Nm}^3\text{]} \quad (27)$$

$$k_{oPW} = -0,83 \text{ [kg/Nm}^3\text{]} \quad (28)$$

#### 2.4. Własności statyczne toru K-W

Na rys. 12 przedstawiono rodzinę charakterystyk statycznych  $W(K)$  dla koksu "klasycznego" (linie grube) i koksu formowanego (linie cienkie).

Na podstawie rys. 12 otrzymujemy następujące wartości współczynników wzmocnienia toru K-W:

dla koksu "klasycznego"

$$k_{KW} = -12,2 \left[ \frac{\text{kg/m}^2 \text{ min}}{\% K} \right], \quad (29)$$

$$k_{oKW} = -13,2 \left[ \frac{\text{kg/m}^2 \text{ min}}{\% K} \right] \quad (30)$$

dla koksu formowanego

$$k_{KW} = -5,2 \left[ \frac{\text{kg/m}^2 \text{ min}}{\% K} \right] \quad (31)$$

$$k_{oKW} = -6,2 \left[ \frac{\text{kg/m}^2 \text{ min}}{\% K} \right] \quad (32)$$

Przeprowadzone badania statyczne żeliwiaka wykazują, że żeliwiak jest obiektem nieliniowym, przy czym każdy tor przewodzenia sygnałów charakteryzuje się innym stopniem nieliniowości. Najwyższy stopień nieliniowości wykazuje tor  $P-T_2$ , pozostałe tory charakteryzują się stosunkowo niskim stopniem nieliniowości. Dzięki temu niektóre charakterystyki można aproksymować liniami prostymi w szerokim zakresie zmian parametrów wejściowych żeliwiaka.

### 3. Badania własności dynamicznych

Eksperymentalne badania własności dynamicznych żeliwiaka przeprowadzono metodą pomiaru charakterystyk czasowych przy wymuszeniu skokowym.

Przybliżone równania dynamiki żeliwiaka dla zakresu "małych odchyień" parametrów wejściowych  $\Delta p$  i  $\Delta k$  można zapisać na podstawie rys. 1 w następującej ogólnej postaci:

$$\Delta t_{\dot{z}}(t) = G_{PT\dot{z}}(D) \cdot \Delta p(t) + G_{KT\dot{z}}(D) \cdot \Delta k(t) \quad (33)$$

$$\Delta w(t) = G_{PW}(D) \cdot \Delta p(t) - G_{KW}(D) \cdot \Delta k(t) \quad (34)$$

gdzie:  $D$  - operator różniczkowy  $\frac{d}{dt}$ .

Jeżeli w stanie równowagi dynamicznej procesów wprowadzimy na wejściu żeliwiaka wymuszenia w momencie  $t = 0$ , wówczas równania (33) i (34) można zapisać w postaci:

$$\Delta t_{\dot{z}}(s) = G_{PT\dot{z}}(s) \cdot \Delta p(s) + G_{KT\dot{z}}(s) \cdot \Delta k(s) \quad (35)$$

$$\Delta w(s) = G_{PW}(s) \cdot \Delta p(s) - G_{KW}(s) \cdot \Delta k(s) \quad (36)$$

gdzie wyrażenia  $G_{PT\dot{z}}(s)$ ,  $G_{KT\dot{z}}(s)$  i  $G_{KW}(s)$  będą transmitancjami operatorowymi poszczególnych torów działania parametrów. Równania 35 i 36 wygodnie jest przedstawić w postaci macierzowej:

$$\begin{vmatrix} \Delta t_{\dot{z}}(s) \\ \Delta w(s) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} G_{PT\dot{z}}(s), & G_{KT\dot{z}}(s) \\ G_{PW}(s), & -G_{KW}(s) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta p(s) \\ \Delta k(s) \end{vmatrix} \quad (37)$$

gdzie kwadratowa macierz

$$\|G(s)\| \equiv \begin{vmatrix} G_{PT\dot{z}}(s), & G_{KT\dot{z}}(s) \\ G_{PW}(s), & -G_{KW}(s) \end{vmatrix} \quad (38)$$

przedstawia transmitancję operatorową żeliwiaka.

Na podstawie analizy wyznaczonych eksperymentalnie charakterystyk czasowych żeliwiaka, można w przybliżeniu określić postacie funkcji  $G_{PT\dot{z}}(s)$ ,  $G_{PW}(s)$ ,  $G_{KT\dot{z}}(s)$ ,  $G_{KW}(s)$  oraz wartość współczynników tych funkcji.

Na skutek nieliniowości charakterystyk żeliwiaka transmitancja określona wzorem (38) jest słuszna jedynie w otoczeniu badanego punktu pracy żeliwiaka. Przeprowadzając jednak badania własności dynamicznych w całym możliwym w praktyce zakresie zmian warunków pracy żeliwiaka, można określić zakres zmian współczynników przepustowości oraz wartość tych współczynników w otoczeniu punktu pracy optymalnej.

### 3.1. Własności dynamiczne toru $P-T_z$

Wyznaczone eksperymentalnie charakterystyki czasowe  $T_z(t)$  wskazują, że żeliwiak względem toru  $P-T_z$  należy zaliczyć do obiektów inercyjnych wyższego rzędu z opóźnieniem rzeczywistym. Dla prostoty rozważań charakterystyki te aproksymowano za pomocą metody Kùpfmùlera [9] charakterystykami członków inercyjnych pierwszego rzędu o stałych czasowych  $T_{PTz}$  z opóźnieniem zastępczym  $\tau_{PTz}$ .

Ogólna postać transmitancji toru  $P-T_z$  ma zatem postać:

$$G_{PTz}(s) = 2 k_n p_u \cdot \frac{e^{-\tau_{PTz} s}}{T_{PTz} s + 1} \quad (39)$$

gdzie:  $p_u$  - ustalona wartość powietrza dmuchu w punkcie pomiarowym charakterystyki  $T_z(P)$ .

Na rys. 13 i 14 przedstawiono zależność  $T_{PTz}(P)$  i  $\tau_{PTz}(P)$  dla żeliwiaka o trzech rzędach dysz. Przy doprowadzaniu powietrza dmuchu jednym rzędem dysz wartości stałych czasowych i czasów opóźnienia są ok. 30% wyższe.

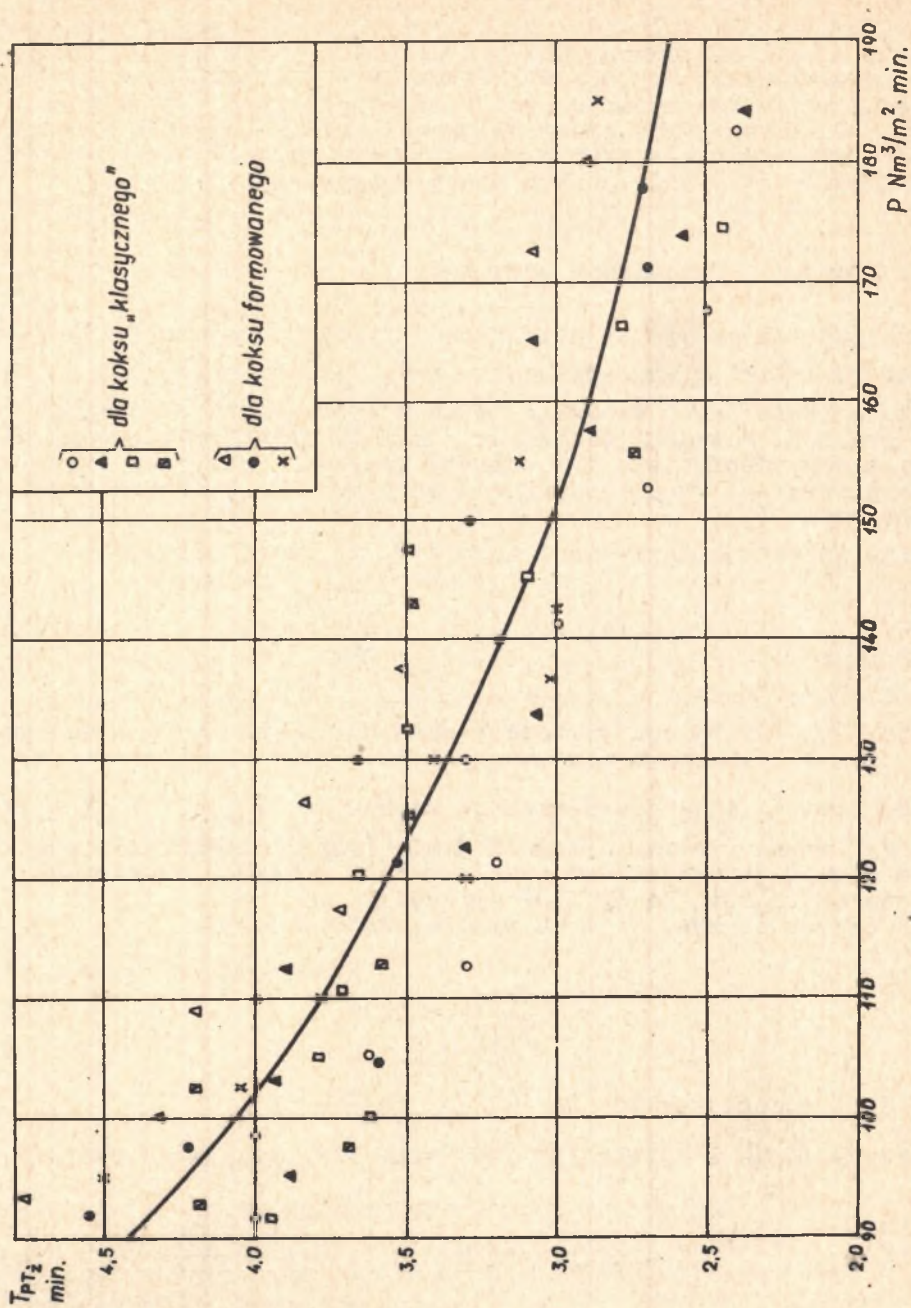
Z danych na rys. 13 i 14 wynika, że stosunek:

$$\frac{\tau_{PTz}}{T_{PTz}} \approx 0,20, \quad (40)$$

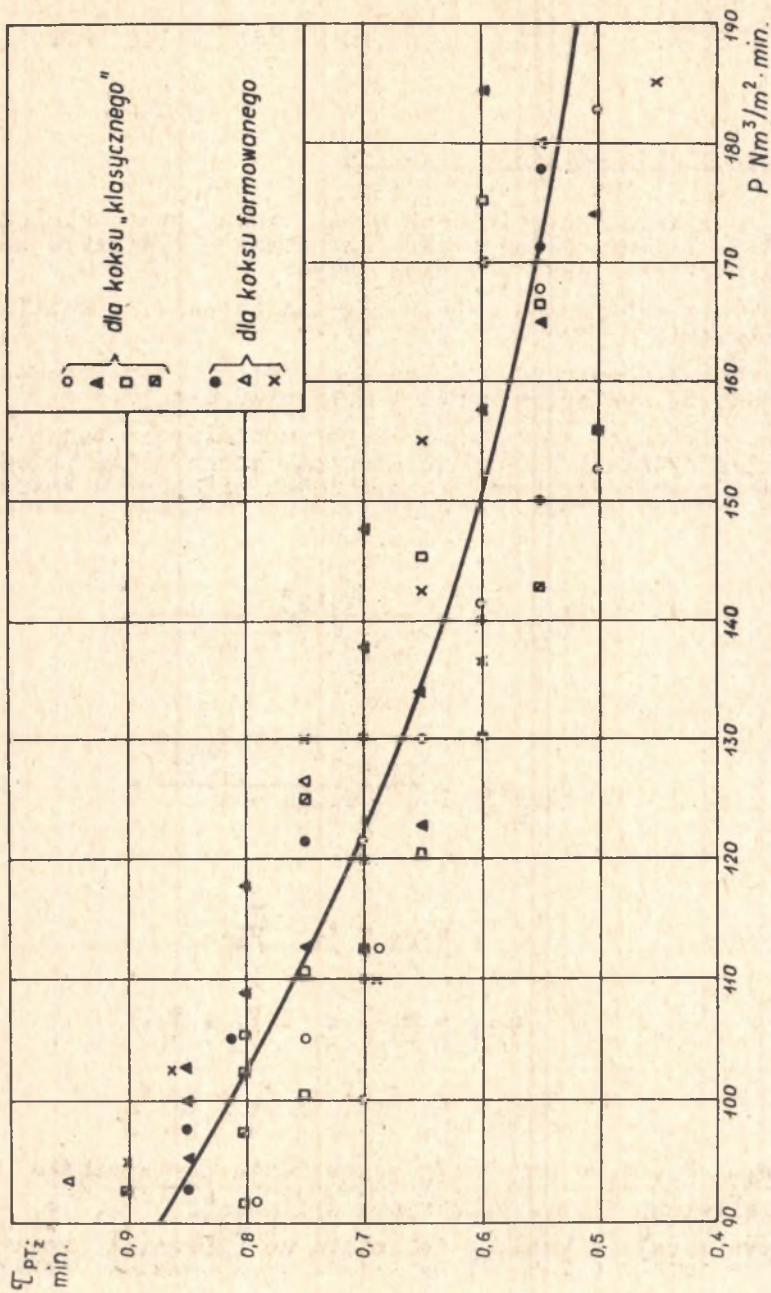
nie jest niezależny od  $P$ .

Korzystając z zależności (40) wzór (39) przyjmuje postać:

$$G_{PTz}(s) = 2 k_n p_u \cdot \frac{e^{-0,2 T_{PTz} s}}{T_{PTz} s + 1} \quad (41)$$



Rys. 13



Rys. 14

Ze wzoru (41) otrzymujemy równanie różniczkowe toru P-T<sub>z</sub>:

$$T_{PTz} \frac{d \Delta t_z(t)}{dt} + \Delta t_z(t) = 2 k_n p_u \cdot \Delta p(t - 0,2 T_{PTz}). \quad (42)$$

### 3.2. Własności dynamiczne toru P-W

Z analizy zjawisk zachodzących w żeliwiaku przy uwzględnieniu szczegółów budowy dolnej części żeliwiaka - wynika, że na własności dynamiczne toru P-W mają wpływ:

- 1) proces wypływania metalu nagromadzonego w kotlinie żeliwiaka,
- 2) procesy chemiczno-ciepłne zachodzące w żeliwiaku, związane ze spalaniem koksu i topieniem metalu.

Z teoretycznych rozważań i eksperymentalnych badań wynika, że tor P-W posiada strukturę złożoną, którą można przedstawić w postaci równoległego połączenia dwóch członów o transmitancji:

$$G_{1PW}(s) = \frac{k_{1PW} s}{T'_{1PW} s^2 + T_{1PW} s + 1}, \quad (43)$$

$$G_{2PW}(s) = \frac{k_{2PW} e^{-0,22 T_{2PW} s}}{T_{2PW} s + 1}, \quad (44)$$

gdzie:

$$k_{1PW} = F_1 \frac{\alpha}{\gamma_m}, \quad (45)$$

$$T'_{1PW} = r_1 \cdot r_2 \cdot F_1 \cdot F_2, \quad (45)$$

$$T_{1PW} = r_1 F_1 + r_2 F_1 + r_2 F_2, \quad (46)$$

przy czym  $F_1, F_2$  - oznaczają odpowiednio powierzchnie przekroju żeliwiaka i zbiornika rynny syfonowej;  $r_1, r_2$  - opory przepływu metalu z kotliny żeliwiaka do zbiornika rynny i ze



zbiornika ryny;  $\alpha$  - stosunek ciśnienia statycznego powietrza dmuchu do jego ilości;  $\gamma_m$  - ciężar właściwy ciekłego żeliwa.

Transmitancja toru P-W ma zatem postać:

$$G_{PW}(s) = \frac{k_{1PW}s}{T_{1PW}s^2 + T_{1PW}s + 1} + \frac{k_{2PW}e^{-0,22T_{2PW}s}}{T_{2PW}s + 1} \quad (47)$$

Przybliżone równania dynamiki tego toru są:

$$T_{1PW} \frac{d^2 \Delta w_1(t)}{dt^2} + T_{1PW} \frac{d \Delta w_1(t)}{dt} + \Delta w_1(t) = k_{1PW} \frac{d \Delta p(t)}{dt} \quad (48)$$

$$T_{2PW} \frac{d \Delta w_2(t)}{dt} + \Delta w_2(t) = k_{2PW} \cdot \Delta p(t - 0,22 T_{2PW}) \quad (49)$$

$$\Delta w_1(t) + \Delta w_2(t) = \Delta w(t), \quad (50)$$

gdzie  $\Delta w_1$  i  $\Delta w_2$  - są to ilości metalu wypływające z żeliwiaka pod wpływem zmian ciśnienia statycznego dmuchu i zmian procesu topienia metalu.

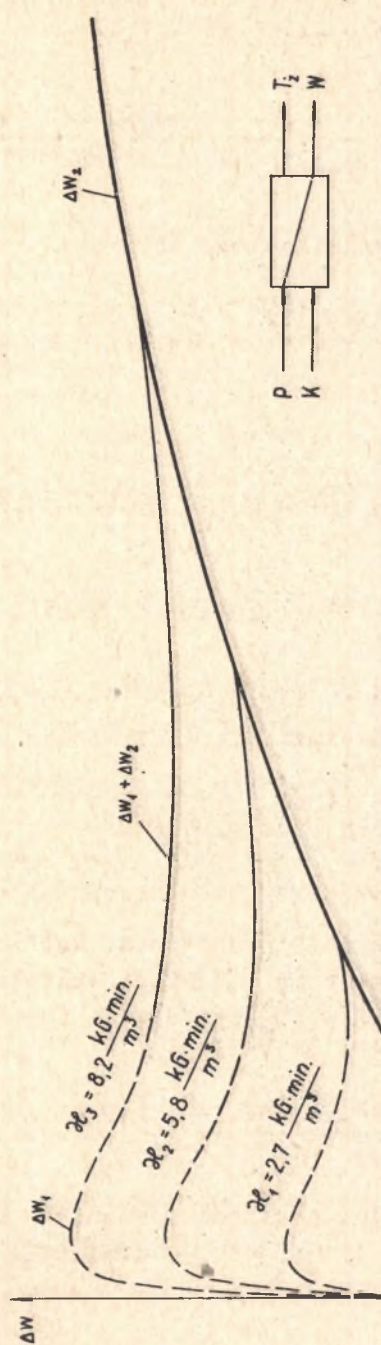
Współczynniki  $T_{1PW}$ ,  $T_{1PW}$ , i  $k_{1PW}$  są funkcjami parametrów konstrukcyjnych żeliwiaka oraz parametrów hydrokinetycznych ciekłego żeliwa. Współczynniki  $k_{2PW}$ ,  $T_{2PW}$  są natomiast funkcjami parametrów określających procesy spalania koksu i topienia metalu.

Wartość  $k_{2PW}$  równa jest statycznemu współczynnikowi wzmocnienia  $k_{PW}$ , określonego przy badaniach statycznych.

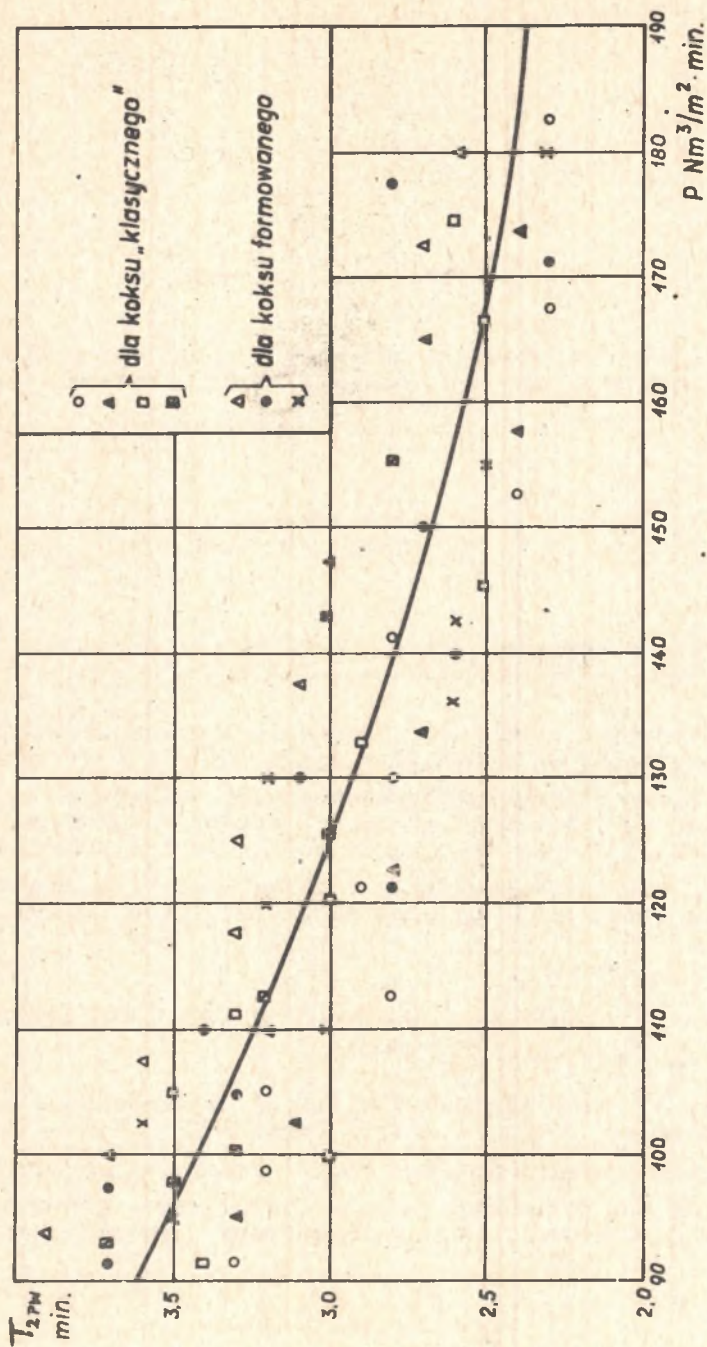
Odpowiedź jednostkowa pierwszej gałęzi toru P-W, zawierającego człon różniczkujący, ma postać:

$$\Delta w_1(t) = \frac{k_{1PW} \Delta p}{T_{1PW} (s_1 - s_2)} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (51)$$

gdzie  $s_1$  i  $s_2$  - są pierwiastkami równania charakterystycznego. Ponieważ  $T_{1PW}^2 - 4 T_{1PW} > 0$ , pierwiastki  $s_1$  i  $s_2$  są rzeczywiste, ujemne.



Rys. 15



Rys. 16

Wartość maksymalna  $\Delta w_{1m}$  występująca w czasie  $t_m$  określona jest wzorem:

$$\Delta w_{1m} = \frac{k_{1PW} \Delta p}{T_{1PW} (s_1 - s_2)} (e^{s_1 t_m} - e^{s_2 t_m}), \quad (52)$$

gdzie

$$t_m = \frac{\lg \frac{s_2}{s_1}}{(s_1 - s_2) \lg e} \quad (53)$$

Na rys. 15 przedstawiono eksperymentalnie otrzymane charakterystyki czasowe toru P-W. Na rys. 16 zilustrowano zależność  $T_{2PW}(P)$ .

Stosunek:

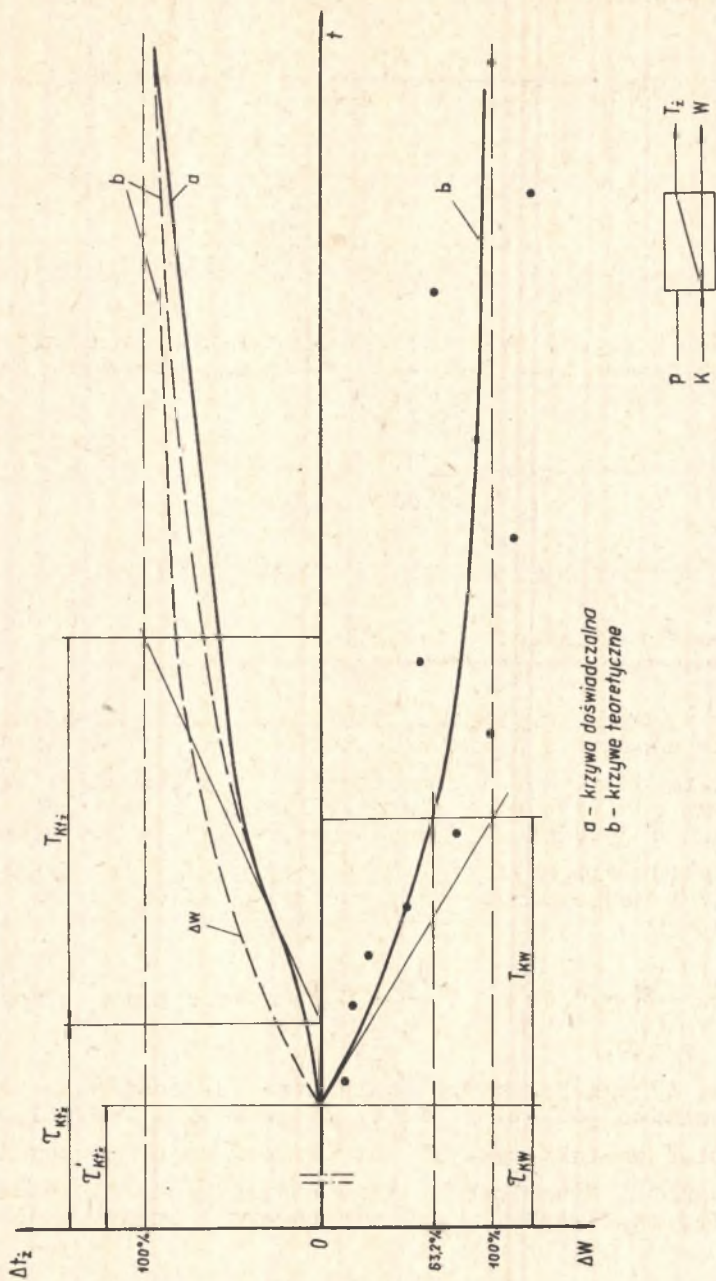
$$\frac{\tau_{2PW}}{T_{2PW}} \approx 0,22 \quad (54)$$

### 3.3. Własności dynamiczne torów K-T<sub>z</sub> i K-W

Z analizy zjawisk ogrzewania, topienia i przegrzewania metalu wynika, że własności dynamiczne torów K-T<sub>z</sub> i K-W zależą przede wszystkim od ilości doprowadzonego do żeliwiaka powietrza dmuchu oraz od fizycznych właściwości wsadu metalowego, głównie od stosunku objętości  $V_m$  kęsów metalu do ich powierzchni  $F_m$ . Z tego względu eksperymentalne badania własności dynamicznych tych torów przeprowadzono przy dwóch rodzajach wsadu metalowego:

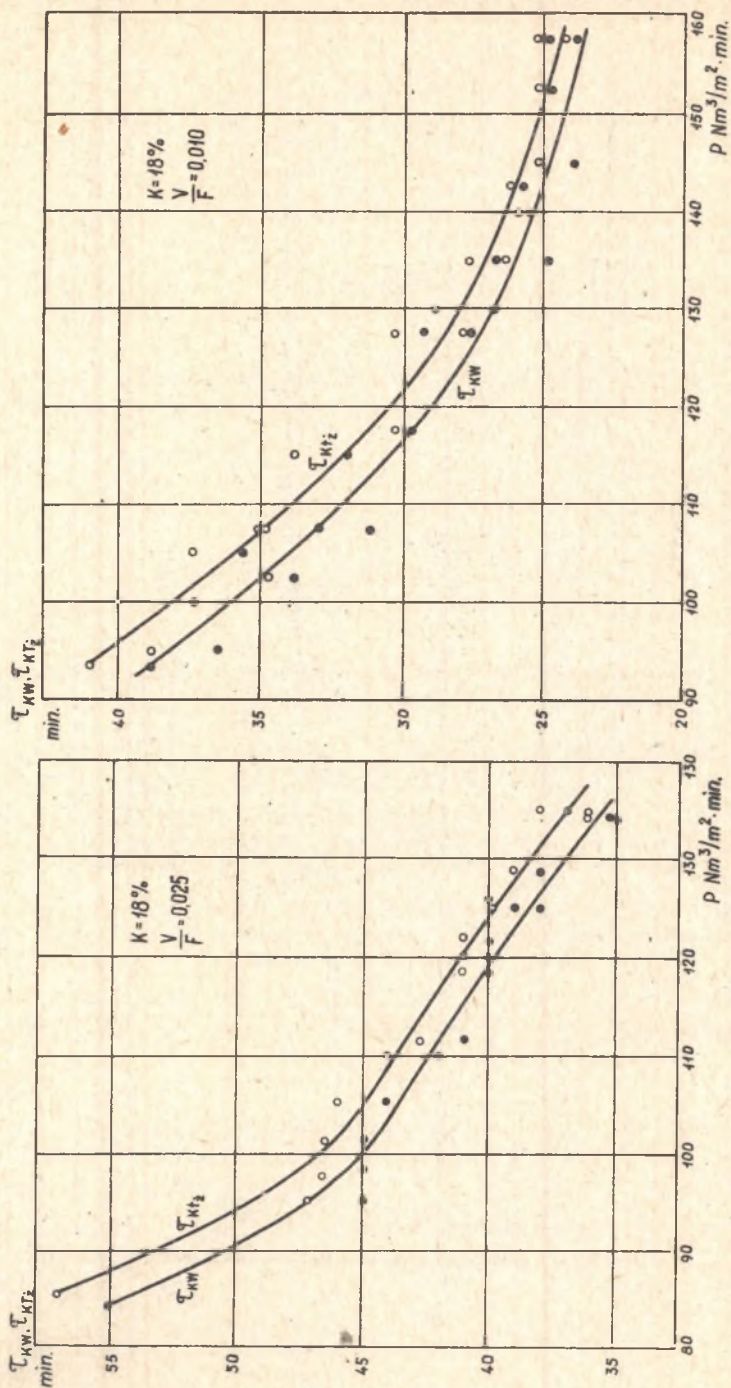
o stosunku  $\frac{V_m}{F_m} \approx 0,01$  m i  $\frac{V_m}{F_m} \approx 0,25$  m oraz przy różnych wartościach P i K.

Na rys. 17 przedstawiono pomierzone jednocześnie charakterystyki czasowe  $\Delta t_z(t)$  i  $\Delta w(t)$  torów K-T<sub>z</sub> i K-W (linie ciągłe). Postać charakterystyki  $\Delta t_z(t)$  wskazuje, że tor K-T<sub>z</sub> posiada własności dynamiczne członu inercyjnego pierwszego rzędu o stałej czasowej  $T_{KTz}$  i zastępczym czasie opóźnienia  $\tau_{KTz}$ .

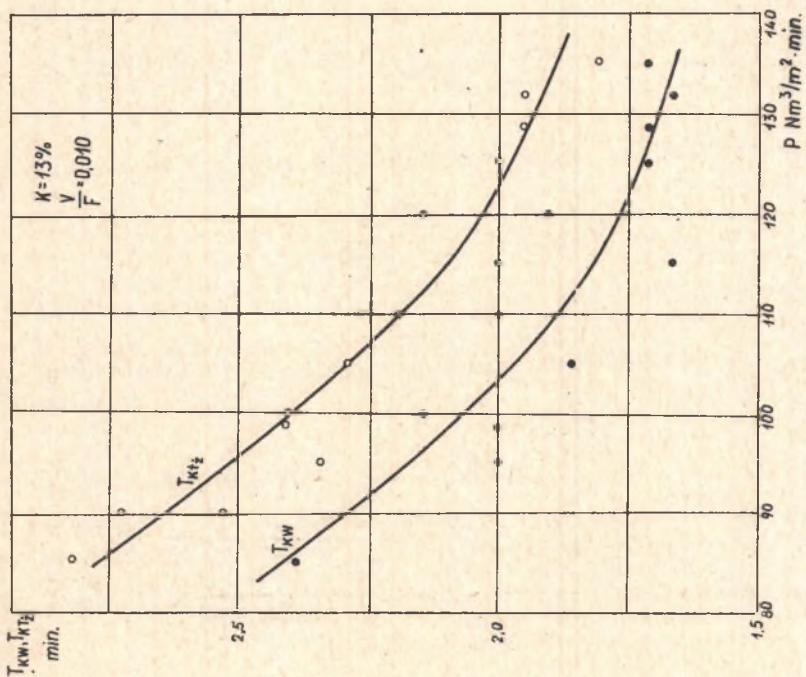
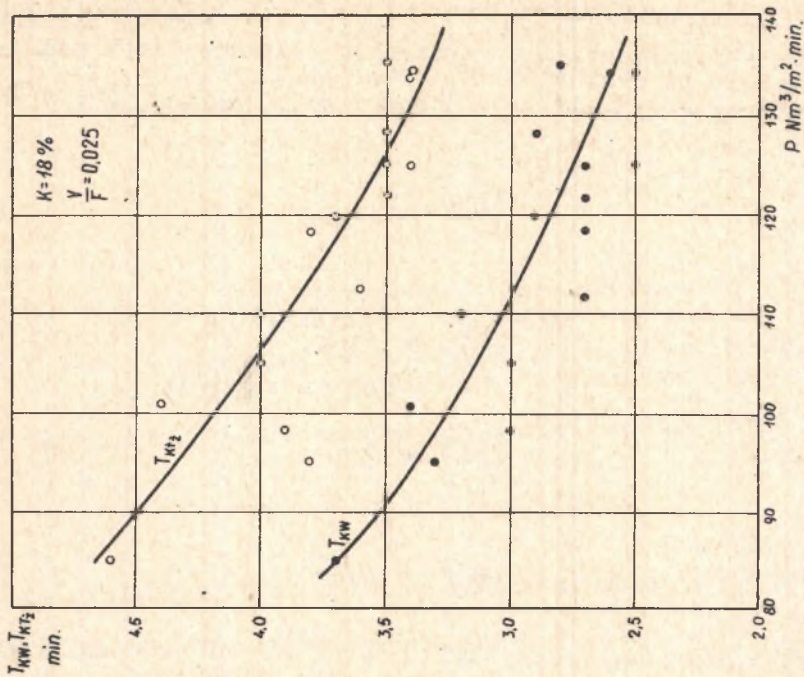


a - krzywa doświadczalna  
b - krzywe teoretyczne

Rys. 17



Rys. 18



Rys. 19

Wartości parametrów  $\tau_{KW} = \tau_{KT\dot{z}}$ ,  $T_{KW}$  i  $T_{KT\dot{z}}$  pomierzone na podstawie eksperymentalnie uzyskanych charakterystyk czasowych przedstawiono na rys. 18 i 19.

Na podstawie rys. 18 i 19 można przyjąć następujące średnie wartości:

$$\frac{\tau_{KT\dot{z}}}{T_{KT\dot{z}}} \approx 11,5, \quad (55)$$

$$\frac{\tau_{KW}}{T_{KW}} \approx 13,8, \quad (56)$$

$$\frac{T_{KT\dot{z}}}{T_{KW}} \approx 1,23 \quad (57)$$

$$\frac{\tau_{KT\dot{z}}}{\tau_{KW}} \approx 1,05 \quad (58)$$

Przybliżone równania dynamiki torów  $KT\dot{z}$  i  $KW$  oraz transmi-tancje tych torów otrzymamy odpowiednio w postaci:

$$T_{KT\dot{z}} \cdot \frac{d \Delta t_{\dot{z}}(t)}{dt} + \Delta t_{\dot{z}}(t) = k_{KT\dot{z}} \cdot \Delta k(t - 11,5 T_{KT\dot{z}}), \quad (59)$$

$$G_{KT\dot{z}}(s) = \frac{k_{KT\dot{z}} e^{-11,5 T_{KT\dot{z}} s}}{T_{KT\dot{z}} s + 1} \quad (60)$$

$$T_{KW} \cdot \frac{d \Delta w(t)}{dt} + \Delta w(t) = k_{KW} \cdot \Delta k(t - 13,8 T_{KW}), \quad (61)$$

$$G_{KW}(s) = \frac{k_{KW} \cdot e^{-13,8 T_{KW} s}}{T_{KW} s + 1} \quad (62)$$



Z rozważań teoretycznych [11] oraz przedstawionych danych eksperymentalnych wynika, że zasadniczy wpływ na własności dynamiczne torów K-T<sub>z</sub> i K-W wywiera szybkość ogrzania kawałków wsadu metalowego do temperatury topienia.

Istnieje bowiem zależność

$$\tau_{KW} = \tau_0 + \tau_s, \quad (63)$$

gdzie:

$\tau_0$  - oznacza czas potrzebny na ogrzanie kawałka wsadu metalowego do temperatury topienia,

$\tau_s$  - czas potrzebny na przebycie drogi przez roztopiony metal od miejsca rozpoczęcia topienia do miejsca pomiaru.

Badania modelowe wykazały, że można średnio przyjąć:

$$\tau_s \approx 0,5 \pm 1 \text{ [min]}. \quad (64)$$

Mniejsze wartości  $\tau_s$  odnoszą się do wsadu metalowego o dużym stosunku  $\frac{V}{F_m}$ , większe - do wsadu o małym  $\frac{V}{F_m}$ .

Ponieważ:

$$\tau_0 \gg \tau_s,$$

przeto można przyjąć z błędem mniejszym od 5%, że:

$$\tau_{KW} \approx \tau_0. \quad (65)$$

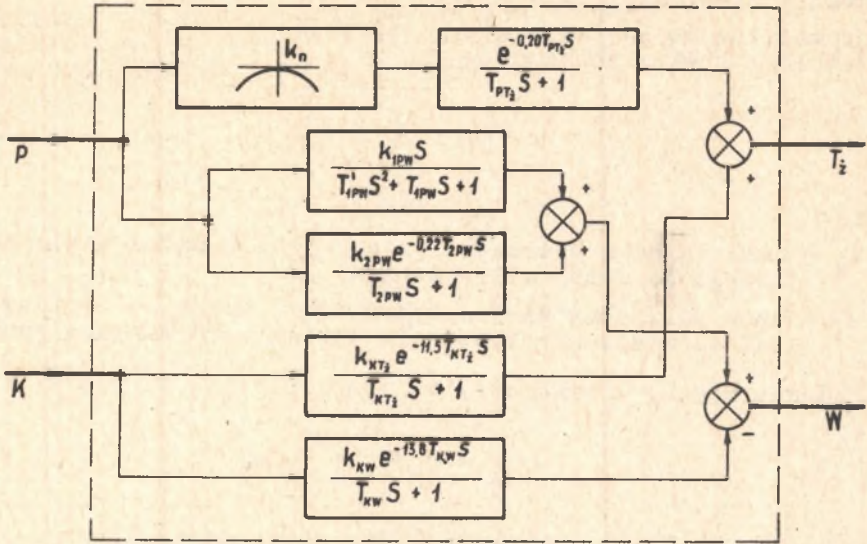
Mając wartość  $\tau_0$  (np. obliczoną wzorem Czyżewskiego [10, 11]) można wyznaczyć za pomocą wzorów (55) i (58) przybliżone wartości wszystkich parametrów, charakteryzujących własności dynamiczne torów K-T<sub>z</sub> i K-W.

#### 4. Schemat strukturalny żeliwiaka

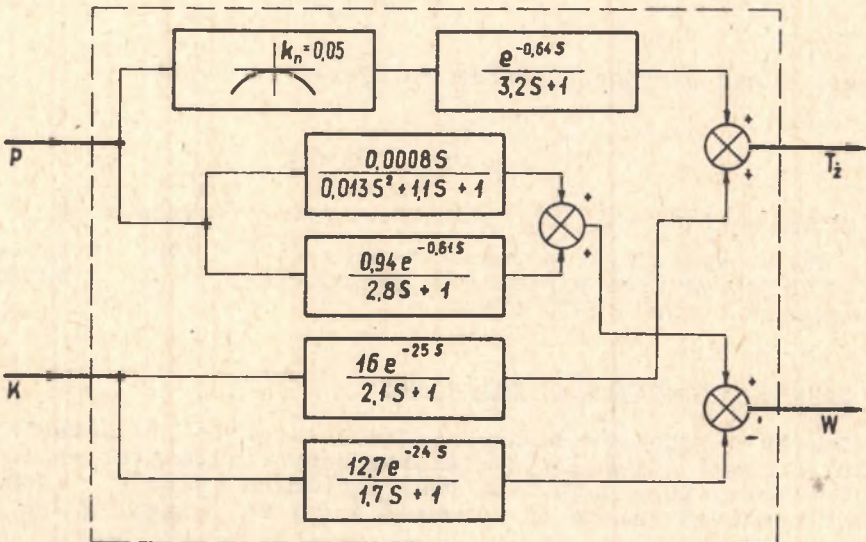
W oparciu o przeprowadzone badania na rys. 20 przedstawiono ogólny schemat struktury żeliwiaka jako obiektu sterowania.

Parametry przepustowości poszczególnych członów schematu strukturalnego zależą od warunków pracy żeliwiaka, głównie od

a)



b)



Rys. 20

ilości doprowadzonego do żeliwiaka powietrza dmuchu, jakości materiałów wsadowych i rozchodu koksu.

Dla przeciętnej jakości materiałów wsadowych i zakresu zmian powietrza dmuchu od wartości  $P = P_0$  dla  $K = 13\%$  do  $P = P_0$  dla  $K = 16\%$ , można przyjąć w przybliżeniu średnie wartości parametrów podane na rys. 34a.

Zgodnie ze wzorem (38) i rys. 34a otrzymamy transmitancję żeliwiaka w postaci:

$$\|G(s)\| = \left\| \frac{2K_{npu} e^{-0,20 T_{PT\dot{z}} s}}{T_{PT\dot{z}} s + 1} \cdot \frac{K_{KT\dot{z}} e^{-11,5 T_{KT\dot{z}} s}}{T_{KT\dot{z}} s + 1} \cdot \left( \frac{K_{1PW} s}{T_{1PW} s^2 + T_{1PW} s + 1} + \frac{K_{2PW} e^{-0,22 T_{2PW} s}}{T_{2PW} s + 1} \right) \cdot \frac{K_{KW} e^{-13,8 T_{KW} s}}{T_{KW} s + 1} \right\|$$

W warunkach pracy żeliwiaka, dla których sporządzono rys. 34b transmitancja będzie równa:

$$\|G(s)\| = \left\| \frac{0,10 p_u e^{-0,64s}}{3,2 s + 1} \cdot \frac{16 e^{-24s}}{2,1 s + 1} \cdot \left( \frac{0,0008 s}{0,013 s^2 + 1,1s + 1} + \frac{0,94 e^{-0,61s}}{2,8 s + 1} \right) \cdot \frac{12,7 e^{-23s}}{1,7 s + 1} \right\|$$

Otrzymana powyżej transmitancja oraz podany na rys. 34 schemat strukturalny żeliwiaka, charakteryzują żeliwiak pod względem własności sterowniczych i stanowią podstawę do właściwego wyboru, analizy i projektowania układu sterowania procesem żeliwiakowym.

## LITERATURA

- [1] Jungbluth H., Korschan H.: Das Schmelzen im Kupolofen. Techn. Mitteilungen Krupp. Heft 5, 1938.
- [2] Marienbach L.M. Sucharczuk J.S.: Issledowanije miechanizma i kinetyki gorienija topliwa w wagrancie. Litiejnoje proizwodstwo Nr 7, 1951.
- [3] Januszewicz P.: Żeliwiak i jego prowadzenie. PWT W-wa, 1956.
- [4] Patterson W., Sipman H., Paczina H.: Materialnyj i ciepłowej balans wagranczi robotajuszczzej na chołodnym dutie. 28 Mieždunar. Kongriess Litiejszczikow, Naucz.Techn. Izd. 1961.
- [5] Patterson W., Neuman F.: Gesetzmässigkeiten das Schmelzens in Kopolofen. Giesserei Nr 3, 1961.
- [6] Lewi L.J.: Kisłorod w procesach połączenia czugunowo litija. Maszgiz-Moskwa, 1955.
- [7] Podrzucki Cz.: Zagadnienie wydajności żeliwiaka na tle przebiegających w nim procesów spalania koksu i topienie metalu, Z.N. AGH, Nr 68, 1963.
- [8] Podrzucki Cz.: Określenie współczynnika proporcjonalności "A" we wzorze na wysokość strefy spalania w żeliwiaku. Przegląd Odlewnictwa Nr 6, 1961.
- [9] Küpfmüller K.: Über die Dynamik der selbsttatigen Verstärkungsregler. Elektr. Nachrichtentechnik, Nr 5, 1928.
- [10] Czyżewski M.: Confirmation of Coefficient of Heat Transfer a in Čupola and Time Regnired to Heat and Melt the Metal. Rocznik Polskiej Akademii Nauk Techn. W-wa 1946, Vol.VIII.
- [11] Czyżewski M.: Szybkość ogrzewania i topienia metalu w zależności od warunków pracy żeliwiaka, Hutnik Nr 1, 1948.

## ВАГРАНКА В КАЧЕСТВЕ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

## Резюме

В статье представлены результаты исследований статистических и динамических свойств вагранки как объекта управления.

Исследования статистических свойств проведены в пределе практически приемлемых изменений входных параметров вагранки. Исследования динамических свойств проведены методом измерения временных характеристик на вынужденном ходу.

На основании линейных характеристик определена передача вагранки, а также поданы приблизительные уравнения статики и динамики ваграночного процесса, которые могут быть использованы при проектировке системы комплексной автоматизации литейного производства.

## CUPOLE AS AN OBJECT OF CONTROL

## Summary

In the paper the results of investigations concerning statistical and dynamic properties of a cupole as an object of control, have been presented. The investigations of statistical properties were carried out within the range of practically appeared changes in the input parameters of the cupole. The investigations of dynamic properties were carried out by means of the time characteristics measurements at the pitch forcing. On the ground of characteristics linearization the transmittance of the cupole has been determined and approximate equations of statics and dynamics of the cupole process have been given. These data can be used in case of designing a complex arrangement of a foundry automation.