

# ELEKTRYKA. 23

P. 3347 / 68

RYSZARD HAGEL

## **POMIAR I REGULACJA GRUBOŚCI TAŚMY W PROCESIE WALCOWANIA NAWROTNEGO NA ZIMNO**

**P O L I T E C H N I K A   Ś L Ą S K A**  
**ZESZYT NAUKOWY Nr 211 – GLIWICE 1968**

## SPIS TREŚCI

	Str.
Wstęp . . . . .	3
Zestawienie najważniejszych oznaczeń . . . . .	5
<b>Rozdział I. IDENTYFIKACJA OBIEKTU . . . . .</b>	<b>9</b>
1. Podstawowe zależności procesu walcowania . . . . .	9
2. Wyprowadzenie ogólnych zależności dla naciągu . . . . .	28
3. Pomiary w procesie walcowania . . . . .	37
4. Walcarka jako obiekt regulacji wieloparametrowej . . . . .	45
<b>Rozdział II. ANALIZA SYSTEMÓW REGULACJI GRUBOŚCI     WALCAREK NAWROTNYCH . . . . .</b>	<b>56</b>
5. Regulacja grubości przez nastawianie naciągów . . . . .	58
6. Regulacja grubości przez nastawianie walców . . . . .	68
7. Regulacja obiektu z opóźnieniem transportowym . . . . .	77
<b>Rozdział III. DYNAMIKA PROCESU WALCOWANIA . . . . .</b>	<b>88</b>
8. Dynamika procesu przy złożonej regulacji grubości . . . . .	88
9. Dynamika zmian naciągu podczas nastawiania walców . . . . .	102
10. Wnioski dotyczące wyboru i projektowania układów regula- cji grubości . . . . .	105
Literatura . . . . .	107
Streszczenia . . . . .	110

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 211



P. 3347 / 68

RYSZARD HAGEL

# POMIAR I REGULACJA GRUBOŚCI TAŚMY W PROCESIE WALCOWANIA NAWROTNEGO NA ZIMNO

PRACA HABILITACYJNA Nr 70

Data otwarcia przewodu habilitacyjnego 21. II. 1967 r.

---

GLIWICE 1968

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH  
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

*Fryderyk Staub*

REDAKTOR DZIAŁU

*Wiesław Gabrys*

SEKRETARZ REDAKCJI

*Tadeusz Matula*

Dział Nauki — Sekcja Wydawnictw Naukowych — Politechniki Śląskiej  
Gliwice, ul. Konarskiego 23

P. 190168

---

Nakł. 100+175 Ark. wyd. 5,5 Ark. druk. 7,2 Papier offsetowy kl. III. 70x100, 80 g  
Oddano do druku 3. 1. 1968 Podpis. do druku 14. 2. 1968 Druk ukończ. w lutym 1968  
Zam. 99 3. 1. 1968 K-23 Cena zł 7,—

---

Skład, fotokopie, druk i oprawę  
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

## W S T Ę P

Wzrastające zastosowanie automatów i półautomatów, do przetwarzania taśm walcowanych ze stali i metali kolorowych, stawia podwyższone wymagania nie tylko własnościom metalurgicznym taśm, lecz przede wszystkim ogranicza dopuszczalne odchyłki grubości wzdłuż całego pasma. Znaczne korzyści ekonomiczne w skali krajowej można uzyskać w przypadku wyrobów walcowanych w zakresie ujemnych tolerancji grubości. Poza zwiększeniem uzysku na walcowni, osiąga się wówczas zmniejszenie ciężaru gotowych konstrukcji. Realizacja podwyższonych wymagań odnośnie tolerancji grubości, a także wzrost jakości i wydajności produkcji, jest wynikiem postępów w dziedzinie układów regulacji automatycznej i pomiarów, napędów, konstrukcji mechanicznych i technologii. Nowoczesne tendencje zmierzają do automatyzacji kompleksowej procesu walcowania, obejmującej całość czynności związanych z produkcją na danym obiekcie. Stwarza to konieczność rozpatrywania walcarki jako całości, porzucając od procesów zachodzących w szczelinie walców, a na współpracy napędów kończąc.

Walcarka jest złożonym obiektem pomiarów i regulacji, o wielu wielkościach wejściowych i wyjściowych, licznych sprzężeniach wewnętrznych i zakłóceniach oddziaływujących na różne elementy walcarki. Rozpatrując proces walcowania trzeba uwzględnić zarówno wymagania technologiczne jak i własności sprężyste klatki i walców, charakterystyki napędów, opóźnienia transportowe, wyprzedzenie, zakłócenia wnoszone przez walcowany metal i zakłócenia wewnętrzne procesu. W tych warunkach trudno przewidzieć skutki działania różnych wielkości tym bardziej, że transmitancje szczeliny walców dla różnych wejść są niejednakowe. Opis walcarki rozpoczęto zatem od wyznaczania transmitancji, umożliwiających ocenę działania wielkości nastawianych i zakłóceń w stanach ustalonych i nieustalonych. Przy usta-

leniu metody obliczeń transmitancji szczeliny walców napotyka się na dodatkową trudność spowodowaną tym, że funkcje opisujące proces walcowania są nieliniowe i zmienne w szerokich granicach.

### Cel i zakres pracy

Celem pracy jest znalezienie związków zachodzących pomiędzy wielkościami elektrycznymi elektromechanicznymi z jednej strony, a parametrami technologicznymi i mechanicznymi, z drugiej strony oraz ustalenie wpływu jaki te wielkości wywierają na działanie układów regulacji automatycznej, a w szczególności układów regulacji grubości. W tym celu, posługując się znalezionymi transmitancjami i opisem matematycznym przebiegu procesu walcowania, opracowano schemat blokowy walcarki ze sprzężeniami zwrotnymi, pomiarem i kompensacją zakłóceń.

Ponieważ bezpośredni pomiar wielkości regulowanej następuje z trudności i nie zawsze jest możliwy, przeanalizowano pośrednie metody pomiarów grubości i wskazano możliwości zmniejszenia błędów systematycznych tych metod.

Posługując się równaniami, identyfikującymi walcarkę jako obiekt regulacji, przeprowadzono analizę i porównanie systemów regulacji grubości pojedynczych walcarek. Sformułowano założenia dla układów regulacji, obejmujące wymagania dotyczące struktury, szybkości działania i zakresów regulacji. Zagadnieniom tym poświęcony jest drugi rozdział.

Rozdział trzeci dotyczy działania złożonych układów regulacji grubości i procesów dynamicznych, podczas walcowania z naciągami.

Ponieważ temat pracy obejmuje wiele problemów, niektóre z nich zostały w pracy potraktowane szerzej inne zaledwie wymienione. Zastosowanie opisanego modelu matematycznego walcarki do oceny regulacji grubości na walcarkach wstępnie naprężonych i zastosowanie do obliczenia poprawek w procesie walcowania blach grubych, podano w [45].

Zestawienie najważniejszych oznaczeń

Symbol	Jednostki	Określenie
$a_{11}$	mm/N	transmitancja szczeliny walców dla przeciwciągu, określona wzorem (1.24)
$a_{12}$	mm/N	transmitancja szczeliny walców dla naciągu, określona wzorem (1.25)
$a_{13}$	mm/mm	transmitancja szczeliny walców dla zmiany odstępu walców, określona wzorem (1.26)
$a_{14}$	$\frac{\text{mm}}{\text{m/s}}$	transmitancja szczeliny walców dla prędkości walcowania; patrz (1.21)
$b_{s1}; b_{s2}$	mm	szerokość przekroju metalu przed i po przepuszczeniu
$b_1$	N/mm	współczynnik we wzorze (1.18), określony przez (1.19)
$b_2$	N/mm	jw.
$b_3$	$\frac{\text{N}}{\text{N/mm}^2}$	jw.
$b_4$	N/N	jw.
$b_5$	N/N	jw.
$b_6$	$\frac{\text{N}}{\text{m/s}}$	jw.
$C_s$	$\text{mm}^2/\text{N}$	współczynnik proporcjonalności między naciągiem jednostkowym i wyprzedzeniem
$C_E$	$\text{V}/\text{As}^{-1}$	współczynnik stały dla danego silnika
$C_M$	$\text{Nm}/\text{A}^2$	współczynnik stały dla danego silnika
$D_k$	m	średnica kręgu na bębnie
$E$	$\text{N}/\text{mm}^2$	moduł sprężystości podłużnej; dla stali $E \approx 214 \cdot 10^3$
$F$	$\text{mm}^2$	powierzchnia przekroju
$h_N$	mm	suma zakłóceń wejściowych, sprowadzonych na stronę wyjściową walcarki, które mogą być wyregulowane przez zmianę przeciwciągu
$h_1, h_2$	mm	grubość metalu przed i po przepuszczeniu

Symbol	Jednostki	Określenie
$h_{2n}$	mm	znamionowa grubość metalu po przepuście
$h_{2z}$	mm	błąd grubości spowodowany zakłóceniami wejściowymi, przy walcowaniu bez regulacji, określony wzorem (4.3)
I	A	prąd twornika
$i_w$	A	prąd wzbudzenia
$K_{FS}$	$N/mm^2$	średnia wytrzymałość plastyczna
$K_i$		transmitancja przetworników zakłóceń wewnętrznych
$K_o$		transmitancja szczeliny walców dla wielkości wejściowych nastawialnych
$K_{oi}$		transmitancja szczeliny walców dla zakłóceń wewnętrznych
$K_{oz}$		transmitancja szczeliny walców dla zakłóceń wejściowych
$K_r$		transmitancja regulatora dla wielkości nieregulowanych
$K_{rY}$		transmitancja regulatora dla sygnałów wielkości wyjściowych
$K_{ws}$	$N/mm^2$	średni opór odkształcenia
$K_x$		transmitancja przetworników zmiennych wyjściowych pomocniczych
$K_Y$		transmitancja przetworników wielkości wyjściowych
$K_z$		transmitancja przetworników wielkości wejściowych
$\gamma K_F$	$N/mm^2$	naprężenie graniczne metalu
$k_{11}; k_{12}$		współczynnik wzmocnienia
L	m	długość taśmy naprężonej
$l_c$	m	długość metalu przewalcowanego w czasie $t_c$
$l_1, l_2$	m	długość metalu przed i po przepuście
$\Delta l$	m	wydłużenie bezwzględne taśmy
M	$N/mm$	współczynnik sprężystości walcarki
$N_d$	N	dopuszczalna wartość naciągu lub przeciwnaciągu
$N_1; N_2$	N	przeciwnaciąg i naciąg



Symbol	Jednostki	Określenie
$\Delta N_{1d}$	N	dopuszczalny przyrost przeciwności
$\Delta n$	mm	strefa nieczułości
P	N	nacisk walców
$P_N$	N	nacisk walców przy działaniu naciągu
p		$p = x+jy$ zmienna zespolona, parametr w przekształceniu Laplace'a Carsona
q		wskaźnik regulacji; patrz (4.10)
R	$\Omega$	oporność obwodu twornika
R	mm	promień walca roboczego
$R_{11}$		transmitancja regulatora naciągu
$R_{12}$		transmitancja regulatora naciągu dla zakłóceń
$R_{13}$		transmitancja regulatora odstępu walców
S	mm	odstęp walców podczas walcowania, odpowiadający naciskowi walców P
$S_0$	mm	początkowy odstęp walców
$S_{N1}; S_{N2}$		transmitancje napędu bębna odwijającego i nawijającego
$S_0$	mm	zmiana początkowego odstępu walców
$s_0$		opóźnienie względne; patrz (2.3)
$s_w$		wyprzedzenie względne; patrz (1.6); (2.1)
$T_M$	s	elektromechaniczna stała czasowa
$T_N$	s	stała czasowa w obwodzie nastawiania naciągu
$T_n$	s	stała czasowa silnika napędowego
$T_0$	s	zastępcza stała czasowa; patrz (5.7)
$T_G$	s	stała czasowa naciągu; patrz (2.10)
$t_c$	s	$t_c = t_z + t_h$
$t_h$	s	czas hamowania
$t_0$	s	czas od chwili rozpoczęcia regulacji, do chwili przejścia błędu grubości przez 0
$t_z$	s	czas załączenia
U	v	napięcie zasilania twornika
$V_s$	mm/s	prędkość zmiany odstępu walców

Symbol	Jednostki	Określenie
$v_{rw}$	m/s	prędkość liniowa taśmy rozwijanej z bębna
$v_w$	m/s	prędkość obwodowa walców roboczych
$v_{zw}$	m/s	prędkość liniowa taśmy nawijanej na bębnie
$v_1, v_2$	m/s	liniowa prędkość wejściowa i wyjściowa metalu ze szczeliny walców
X		zmiennie wejściowe nastawialne
$X_p$		zmiennie wejściowe pomocnicze
Y		zmiennie wyjściowe regulowane
Z		zakłócenia wejściowe
$Z_i$		zakłócenia wewnętrzne procesu
$Z_R$		wielkości na wejściu regulatora $K_T$
$z_{11}$	mm/mm	transmitancja szczeliny walców dla zmian grubości metalu przed przepuszczeniem; patrz (1.2)
$z_{12}$	$\frac{\text{mm}}{\text{N/mm}^2}$	transmitancja szczeliny walców dla zmian średniego oporu odkształcenia; patrz (1.21)
$\gamma$		$\gamma = h_2/h_1$ liczba gniotu
$\Delta$		oznaczenie małego przyrostu
$\varepsilon_1$		wydłużenie względne
$\sigma_1, \sigma_2$	N/mm <sup>2</sup>	naciąg i przeciwnaciąg jednostkowy
$\tau$	s	opóźnienie transportowe
$\omega$	s <sup>-1</sup>	prędkość kątowna

#### Indeksy

- 1 - po stronie wejściowej walcarki
- 2 - po stronie wyjściowej walcarki
- n - wartość znamionowa lub programowana
- m - wartość zmierzona
- u, ust - wartość ustalona
- o, pocz - wartość początkowa
- zw - dotyczy bębna nawijającego
- rw - dotyczy bębna rozwijającego

## Rozdział I

### IDENTYFIKACJA OBIEKTU

#### A. Na podstawie literatury

##### 1. Podstawowe zależności procesu walcowania

###### 1.1. Ogólne pojęcia przeróbki plastycznej za pomocą walcowania [1, 2]

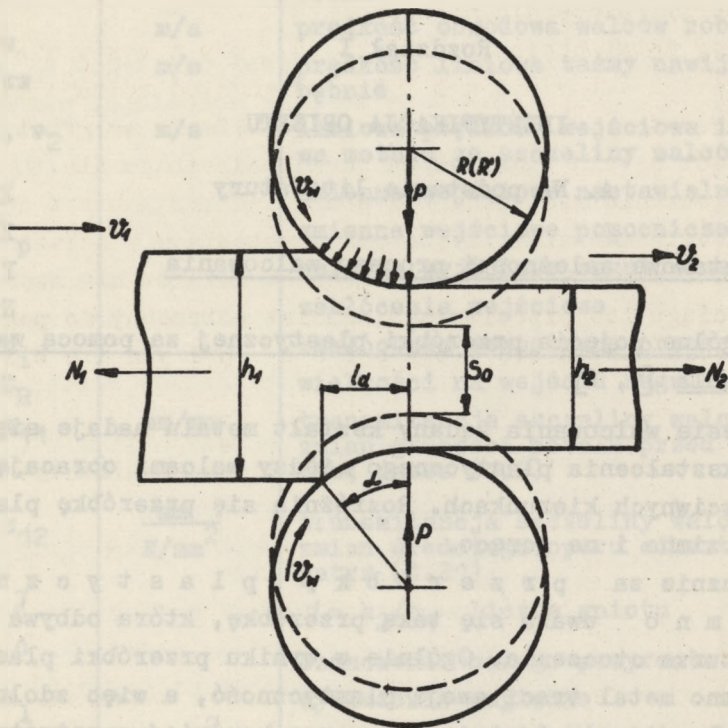
W procesie walcowania żądany kształt metalu nadaje się za pomocą odkształcenia plastycznego między walcami obracającymi się w przeciwnych kierunkach. Rozróżnia się przeróbkę plastyczną na zimno i na gorąco.

Praktycznie za p r z e r ó b k ę p l a s t y c z n ą n a z i m n o uważa się taką przeróbkę, która odbywa się w temperaturze otoczenia. Ogólnie w wyniku przeróbki plastycznej na zimno metal traci swoją plastyczność, a więc zdolność do odkształcania się i staje się coraz bardziej sprężysty. Przyrost twardości i wytrzymałości metalu spowodowane plastycznym odkształceniem, nazywa się u m o c n i e n i e m. Przeróbka plastyczna metalu na zimno zmienia w sposób decydujący jego własności. Te niepożądane zmiany można usunąć przez w y ż a r z e n i e r e k r y s t a l i z u j ą c e, względnie przez n o r m a l i z o w a n i e.

P r z e r ó b k ę p l a s t y c z n ą m e t a l i n a g o r ą c o określa się jako odkształcenie plastyczne, któremu towarzyszy rekrytalizacja. Podczas przeróbki plastycznej na gorąco metal nie ulega umocnieniu, ponieważ proces walcowania przebiega powyżej temperatury rekrytalizacji.

## 1.2. Zasadnicze pojęcia i symbole procesu walcowania

Schematycznie, proces walcowania przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1

W wyniku walcowania zachodzą zmiany kształtu oraz wymiarów poprzecznych i podłużnych metalu. Początkowa wysokość metalu  $h_1$  zmniejsza się do wartości  $h_2$  po przejściu przez walce, natomiast długość i szerokość zwiększają się. W przypadku taśm i blach o szerokości przekroju co najmniej 20 razy większej od wysokości, wzrost szerokości jest pomijalny. Liniowe zmniejszenie wymiarów odkształconego metalu w kierunku działania siły ściskającej określa liczba gniotu  $\gamma = h_2/h_1$ . Natomiast gniot bezwzględny jest równy różnicy  $h_1 - h_2$ .

Odształcenie plastyczne jest wynikiem działania nacisku walców  $P$ , wywieranego przez walce robocze o promieniu  $R$ , naciągu  $N_2$  i przeciwności  $N_1$ . Naciąg i przeciwność stosuje się tylko przy walcowaniu na zimno.

Walcowany metal charakteryzuje jego wytrzymałość plastyczną  $K_p$ , zależna od rodzaju metalu i jego temperatury.  $K_p$  przedstawia naprężenia na granicy plastyczności metalu w danych warunkach odkształcenia.

Przy walcowaniu występuje zjawisko tarcia między walcami a metalem, które przeciwstawia się odkształceniu metalu, przez co stwarza konieczność zwiększenia nacisku walców, naciągu lub przeciwności. Nacisk potrzebny do pokonania sił tarcia nazywa się oporem płynięcia  $K_T$ .

Opór odkształcenia  $K_w$ , który stawia metal w czasie walcowania jest sumą naprężenia granicznego i oporu płynięcia, co wyraża wzór [2]:

$$K_w = \varphi K_p + K_T \quad (1.1)$$

gdzie:

$\varphi K_p$  - naprężenie graniczne metalu w danych warunkach odkształcenia plastycznego,

$\varphi = 1$  do  $1,155$  w zależności od stanu naprężenia lub odkształcenia.

Wytrzymałość plastyczna metalu  $K_p$  w procesie przeróbki plastycznej na gorąco zależy od:

gatunku metalu, prędkości odkształcania, temperatury.

W procesie przeróbki plastycznej na zimno  $K_p$  zależy od:

gatunku metalu i jego struktury, stopnia zgniotu w danym przepuszczeniu, tj. od stosunku powierzchni przekrojów  $(F_1 - F_2) : F_1$ , względnie przy stałej szerokości od stosunku  $(h_1 - h_2) : h_1$  i od początkowego umocnienia metalu.

Opór płynięcia zmienia się w szczelinie walcowniczej wzdłuż kierunku styku metalu z walcami. Zmienia się zatem również opór odkształcenia metalu przy walcowaniu. Trudności wy-

nikające ze zmienności oporu odkształcenia metalu na długości łuku styku omija się przyjmując do obliczeń **ś r e d n i** **o p ó r o d k s z t a ł c e n i a m e t a l u**  $K_{ws}$ . Można go wyznaczyć na podstawie pomiaru nacisku walców z wzoru (1.2) lub obliczyć mniej dokładnie ze znanych wzorów.

$$P = F_d K_{ws} \quad (1.2)$$

gdzie:

- P - nacisk walców,
- $F_d$  - rzut poziomy powierzchni styku metalu z walcami,
- $K_{ws}$  - średni opór odkształcenia.

Pomiar nacisku walców jest najwłaściwszą metodą wyznaczania średniego oporu odkształcenia, gdyż błąd pomiaru wynosi około 3%. Jeżeli nie można mierzyć nacisku walców, trzeba korzystać z wzorów, które wnoszą większy błąd [2, 3, 4].

Rzut poziomy, powierzchni styku metalu z walcem, jest iloczynem szerokości walcowanego metalu oraz długości rzutu poziomego łuku styku metalu z walcem  $l_d$ . Do obliczania rzutu poziomego łuku styku metalu z walcem przyjmuje się wzór:

$$l_d \approx \sqrt{R(h_1 - h_2)} \quad (1.3)$$

gdzie:

R - promień nieodkształconego walca roboczego.

Jak wynika z literatury [2, 3] średni opór odkształcenia  $K_{ws}$  jest nieliniową funkcją wielu zmiennych. I tak przy walcowaniu na gorąco jego wartość zależy od:

wartości odkształcenia, prędkości odkształcenia, temperatury metalu, geometrii szczeliny walców, warunków tarcia.

Natomiast przy walcowaniu na zimno wartość  $K_{ws}$  zależy od:

wartości odkształcenia, umocnienia początkowego, naciągu i przeciwności, geometrii szczeliny walców, warunków tarcia.

Jednym z podstawowych pojęć walcowniczych jest tzw. **k ą t c h w y t u** oznaczony na rys. 1.1 przez  $\alpha$ . Kąt chwytu za-

leży od promienia walca  $R$  oraz gniotu bezwzględnie. Walcowanie może zachodzić tylko wówczas, jeżeli kąt chwytu jest równy lub mniejszy od kąta tarcia.

Przy walcowaniu na zimno należy uwzględnić spłaszczenie walców spowodowane naciskiem walców  $P$ . Praktycznie uwzględnia się spłaszczenie przyjmując większy promień łuku styku  $R'$  ( $R' > R$ ). Przy walcowaniu na gorąco spłaszczenie jest nieznaczne i można je pominąć.

Liniowa prędkość wejściowa metalu do walców  $v_1$  jest mniejsza, zaś liniowa prędkość wyjściowa metalu z walców  $v_2$  jest większa od składowej poziomej prędkości obwodowej walców  $v_w$ . Istnieje jednak w szczelinie walcowniczej takie miejsce, gdzie składowa pozioma prędkości obwodowej walców jest równa prędkości metalu. Miejsce to nazywa się p ł a s z c z y z n ą lub o b s z a r e m p o d z i a ł o w y m [2]. Przeciwniśm przesuwam tę płaszczyznę podziałową w kierunku wyjścia, naciśm przesuwam tę płaszczyznę w kierunku wejścia [5].

P r z e p u s t e m nazywa się jednorazowe przejście metalu przez szczelinę, między obracającymi się walcami. Proces walcowania składa się z szeregu przepustów.

### 1.3. Zasada stałej objętości. Wyprzedzenie względne

Z zasady stałej objętości wynika, że:

$$l_1 h_1 b_{s1} = l_2 h_2 b_{s2} = v_1 h_1 b_{s1} = v_2 h_2 b_{s2} = \text{const} \quad (1.4a)$$

gdzie:

$b_{s1}, b_{s2}$  - szerokość przekroju metalu przed i po przepuście,  
 $l_1, l_2$  - długość metalu przed i po przepuście.

Jest to pierwsze równanie opisujące walcarkę jako obiekt regulacji.

W przypadku walcowania metalu, o szerokości przekroju wielokrotnie większej od wysokości,  $b_{s1} = b_{s2}$  i równanie poprzednie upraszcza się

$$l_1 h_1 = l_2 h_2 = v_1 h_1 = v_2 h_2 \quad (1.4b)$$

Prędkość obwodowa walców  $v_w$  i prędkość liniowa metalu są związane zależnościami:

$$v_2 = v_1 h_1 / h_2 = v_w s_w \quad (1.5)$$

gdzie:

$s_w$  - wyprzedzenie względne metalu u wylotu z walców [1]

$$s_w = v_2 / v_w \quad (1.6)$$

Wyprzedzenie względne zależy od naciągu i od przeciwności. Wraz ze wzrostem  $N_2$  wyprzedzenie wzrasta praktycznie liniowo. Wzrost przeciwności zmniejsza wyprzedzenie (patrz 2.1).

#### 1.4. Siły występujące przy walcowaniu

##### 1.4.1. Nacisk walców

Wartości sił i momentów potrzebnych do uzyskania określonego odkształcenia plastycznego walcowanego metalu oblicza się na podstawie wzorów podawanych przez teorie walcowania, względnie z zależności empirycznych. Jak wynika z [4, 5, 6, 7], nacisk walców wywołujący odkształcenie plastyczne jest nieliniową funkcją wielu zmiennych. Nacisk metalu na walce w określonych, stałych warunkach deformacji plastycznej ( $R = \text{const}$ ;  $b_s = \text{const}$ ;  $\mu = \text{const}$ ;  $\alpha = \text{const}$ ) można wyrazić funkcją analityczną, której ogólną postać przedstawia wzór (1.7):

$$P = f(R, K_{ws}, N_1, N_2, h_1, h_2, v_w) \quad (1.7)$$

Równanie (1.7) wyraża zależność nacisku walców od parametrów walcowanego metalu, geometrii walcarki, naciągu i przeciwności. Nazywa się ono **równaniem plastycznego odkształcenia metalu**. Ponieważ parametry walcarki pozostają praktycznie niezmiennie, równanie to określa nacisk metalu na walce w funkcji czynników zależnych od walcowanego metalu.



#### 1.4.2. Mechaniczne siły występujące przy walcowaniu

Jeżeli nawet pominąć luzy mechaniczne, to elementy konstrukcyjne walcarki (stojak, walce, łożyska, śruby nastawcze) ulegają pod działaniem nacisku walców odkształceniom sprężystym, powodującym zwiększenie początkowego odstępu walców, o wartość współmierną nie tylko z dopuszczalnymi odchyłkami lecz również z grubością taśmy. W zakresie sił praktycznie występujących przy walcowaniu, powiększenie odstępu walców jest zgodnie z prawem Hooke'a, proporcjonalne do siły  $P$ . Zależność tę wyraża wzór<sup>1)</sup>:

$$S - S_0 = k_1 P / E = P / M$$

lub:

$$P = M(S - S_0) \quad (1.8)$$

We wzorze tym oznacza:

$S_0$  - początkowy odstęp walców (przed przepustem; patrz rys. 1.2). Jeżeli stosowany jest wstępny nacisk walców  $P_p$  wówczas  $S_0 = -P_p / M$ . Przyjęto, że ruchowi walców do góry odpowiada  $+ \Delta S_0$ ,

$S$  - odstęp walców podczas walcowania, odpowiadający naciskowi walców  $P$ ,

$M$  - wypadkowy współczynnik sprężystości walcarki,

$E$  - moduł sprężystości podłużnej,

$k_1$  - współczynnik proporcjonalności uwzględniający wymiary walcarki (wyznacza się doświadczalnie).

Współczynnik sprężystości walcarki zależy od wartości i rozkładu sił działających w procesie walcowania, a więc zmienia się w zależności od szerokości i grubości metalu, profilu walców i ich zużycia [8, 9, 10]. Graficznie wykres sprężystości walcarki przedstawia

<sup>1)</sup> Konstrukcja mechaniczna walcarki jest układem drgającym, opisanym równaniem różniczkowym drugiego rzędu. Ponieważ częstotliwość własna tego układu jest bardzo duża, w porównaniu z częstotliwością własną innych członów układu regulacji, równanie sprężystości walcarki (1,8) podano dla stanu ustalonego.

się często w sposób uproszczony przy pomocy linii prostej o nachyleniu  $M$ . Im szerszy jest walcowany metal, tym większe jest nachylenie prostej. Dla małych walcarek, których klatki są mało sztywne, można przyjąć orientacyjnie  $M = (500 \div 700) \cdot 10^3$  N/mm, dla dużych walcarek kwarto, o sztywnych klatkach,  $M = (2500 \div 5000) \cdot 10^3$  N/mm [8, 9, 11].

Walcarkę można rozpatrywać jako system złożony z oddzielnych elementów sprężystych, o wypadkowym współczynniku sprężystości  $M$ , przy czym:

$$\frac{1}{M} = \frac{1}{M} \text{ walców} + \frac{1}{M} \text{ elementów konstr.} + \frac{1}{M} \text{ klatki} \quad (1.8a)$$

Około połowy odkształcenia walcarki jest spowodowane przez odkształcenia walców (ugięcie i spłaszczenie), łożysk i śrub nastawczych. Dlatego nawet bardzo sztywna klatka umożliwia zmniejszenie  $M$  tylko do połowy [12]. Pomiar  $M$  patrz [9, 13, 14]. Wpływ sprężystości walcarki na regulację omówiono w [10].

Ponieważ zwykle sprężyste odkształcenie metalu po przewalcowaniu można pominąć, w porównaniu z deformacją plastyczną, przyjmuje się, że rzeczywisty odstęp walców jest równy grubości metalu po przewalcowaniu tzn.:

$$h_2 = S = S_0 + P/M$$

Równanie (1.8) można zatem zapisać:

$$P = M(h_2 - S_0) \quad (1.9)$$

Równanie (1.9) nazywa się **r ó w n a n i e m s p r ęż y s t o ś c i w a l c a r k i**. Wyraża ono nacisk walców z warunków sprężystej deformacji konstrukcji klatka - walce, niezależnie od własności walcowanego metalu.

Podczas walcowania siła reakcji mechanicznej obliczona z wzoru (1.9) jest w równowadze z naciskiem walców obliczonym

z wzoru (1.7), wyrażającym nacisk metalu na walce w zależności od parametrów walcarki i metalu. Zależność tę wyraża równanie:

$$P = f(\text{własności metalu, geometrii szczeliny walców}) = M(h_2 - S_0) \quad (1.10)$$

Jest to drugie równanie opisujące walcarkę jako obiekt regulacji. Wyraża ono związek między warunkami walcowania i plastycznymi własnościami metalu, a grubością po przepuszczeniu.

Jeżeli grubość metalu przed przepustem  $h_1$  i inne parametry procesu walcowania występujące w (1.7) pozostaną niezmiennic, wówczas równanie (1.10) można napisać:

$$P = f(h_2) = M(h_2 - S_0) \quad (1.11)$$

Równanie (1.11) wyraża zależność między odstępem walców, a grubością metalu w procesie walcowania. Wynika stąd możliwość regulacji grubości metalu przez zmianę odstępów walców. Możliwości takiej regulacji stwarzają nowoczesne, szybko działające, hydrauliczne i elektryczne napędy mechanizmów nastawiania walców.

#### 1.4.3. Wpływ naciągu i przeciwnaciągu na proces walcowania

Wg teorii plastyczności suma naprężeń ściskających i rozciągających w każdym punkcie szczeliny walców, jest równa wytrzymałości plastycznej metalu. Jeżeli przez  $P$  oznaczyć nacisk walców potrzebny do uzyskania określonego odkształcenia bez udziału naprężeń rozciągających, a przez  $P_N$  nacisk walców przy ich współdziałaniu, wówczas zależności między naciskami można przedstawić następująco [5]:

$$P_N = P [1 - f(N_1, N_2, \eta_{K_{fs}})] = P \left[ 1 - \frac{\sigma_1(1-m) + \sigma_2^m}{\eta_{K_{fs}}} \right] \quad (1.12)$$

gdzie:

- $\varphi K_{fs}$  - średnie naprężenie graniczne [2],  
m - 1/2 + 1/3 zależnie od warunków walcowania.  
Współczynnik uwzględniający różny wpływ naciągu i przeciwciągu [3, 5],  
 $\sigma_1 = N_1/F_1$  - przeciwciąg jednostkowy,  
 $\sigma_2 = N_2/F_2$  - naciąg jednostkowy.

Nacisk walców obliczony z tego równania jest w równowadze z siłą reakcji wyrażoną wzorem (1.9). Zmniejszenie nacisku walców, wywołane naprężeniami rozciągającymi, powoduje zmniejszenie odstępu walców. Istnieje zatem możliwość wpływania, w procesie walcowania na zimno, na grubość walcowanego metalu przez zmianę naciągu lub przeciwciągu. Skuteczność regulacji grubości naciągiem lub przeciwciągiem jest tym większa, im sprężystsza jest walcarka [10] im większy jest nacisk walców i im wyższe są naprężenia rozciągające.

Trzeba jednak zaznaczyć, że również niezamierzone zmiany - zakłócenia - naciągu lub przeciwciągu powodują zmiany grubości. Jeżeli zatem nie stosuje się regulacji grubości przez nastawienie naciągu lub przeciwciągu, wówczas konieczna jest ich stabilizacja.

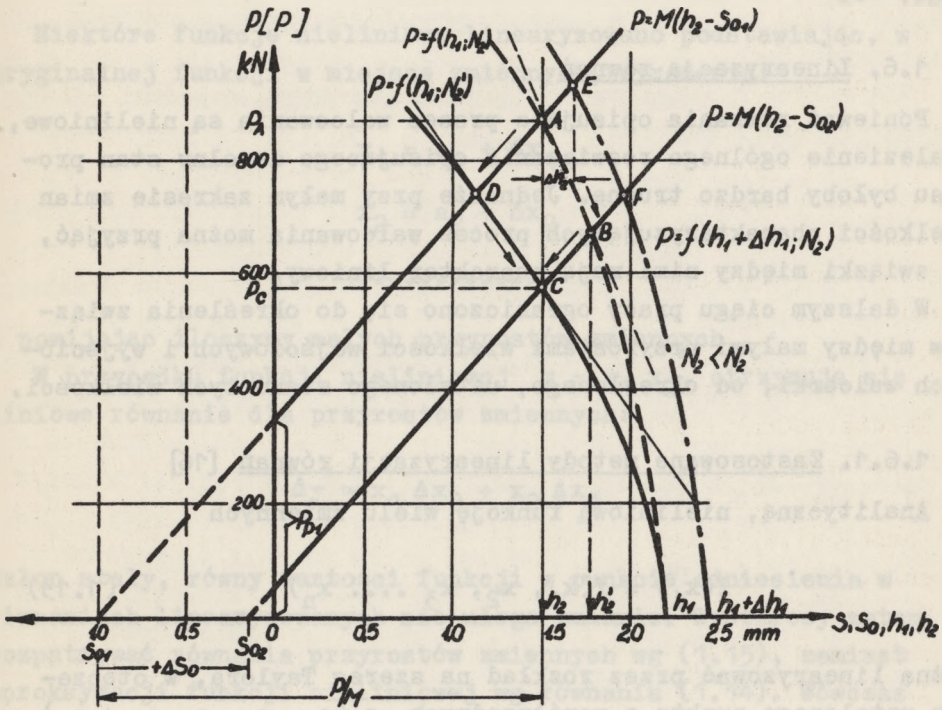
Z wzoru (1.12) a także z literatury [3] wynika, że wpływ przeciwciągu na  $K_{ws}$  i na nacisk walców, a co za tym idzie i na grubość, jest większy od wpływu naciągu. Ponadto taśma zwinia się lepiej przy stałym naciągu. Dlatego najczęściej stosuje się regulację grubości przez nastawianie przeciwciągu.

Ponieważ działanie naciągu i przeciwciągu na proces walcowania jest podobne, w dalszym ciągu często zaniechano ścisłego rozróżniania obu tych terminów na korzyść ogólnego terminu "n a c i ą g i".

#### 1.5. Interpretacja graficzna równań w układzie współrzędnych P, h [3, 15]

Rys. 1.2 przedstawia przykładowo wykresy równania sprężystości walcarki dla dwóch różnych odstępów walców  $S_{01}$  i  $S_{02}$

oraz wykresy równania plastycznego odkształcenia metalu  $P = f(h_1, N_2)$  dla dwóch różnych naciągów  $N_2$  i  $N'_2$ , przy czym  $N_2 < N'_2$ . Stan równowagi sił odpowiadający charakterystyce wal-



Rys. 1.2

carki ze wstępnym naciskiem walców  $P_{p1}$ , grubości wejściowej metalu  $h_1$  oraz naciągowi  $N_2$ , reprezentuje punkt A. Wyznacza on grubość  $h_2$  metalu po przewalcowaniu. W wyniku zwiększenia początkowego odstępu walców o wartości  $+\Delta S_0$  otrzymuje się nowy punkt równowagi B, któremu odpowiada grubość  $h'_2$ . Wzrostowi naciągu od wartości  $N_2$  do  $N'_2$  odpowiada przesunięcie punktu równowagi sił od B do C. W tych warunkach otrzymuje się przy zmniejszonym nacisku walców, ponownie grubość po przepuszczeniu równą  $h_2$ . Punkt D określa stan procesu dla pierwotnego odstępu walców i zwiększonego naciągu.

Podobnie można przedstawić wpływ innych parametrów procesu walcowania na grubość walcowanego metalu. Linia przerywaną kreska - kropka przedstawiono charakterystykę odpowiadającą wzrostowi grubości wejściowej o  $\Delta h_1$ , przy niezmiennych innych parametrach. Punkty równowagi sił oznaczono przez E wzgl. F.

### 1.6. Linearyzacja równań

Ponieważ równania opisujące proces walcowania są nieliniowe, znalezienie ogólnego rozwiązania opisującego dowolny stan procesu byłoby bardzo trudne. Jednakże przy małym zakresie zmian wielkości charakteryzujących proces walcowania można przyjąć, że związki między nimi mają charakter liniowy.

W dalszym ciągu pracy ograniczono się do określenia związków między małymi przyrostami wielkości wejściowych i wyjściowych walcarki, od określonego, ustalonego stanu tych wielkości.

#### 1.6.1. Zastosowane metody linearyzacji równań [16]

Analityczną, nieliniową funkcję wielu zmiennych

$$f(x_i) = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n) \quad (1.13)$$

można linearyzować przez rozkład na szereg Taylora, w otoczeniu ustalonego punktu o współrzędnych  $a_i (a_1, a_2, a_3 \dots a_n)$ . Pomijając w szeregu Taylora wyrażenia zawierające drugą i wyższe pochodne oraz ograniczając się do małych przyrostów zmiennych wokół rozpatrywanego punktu, otrzymuje się równanie liniowej aproksymacji badanej funkcji nieliniowej:

$$y = f(x_i) \approx f(a_i) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right|_{x_i=a_i} \cdot (x_i - a_i) = y_a + \Delta y \quad (1.14)$$

Oznaczając małe przyrosty zmiennych

$$x_i - a_i = \Delta x_i$$

można napisać:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right|_{x_i=a_i} \cdot \Delta x_i \quad (1.15)$$

Niektóre funkcje nieliniowe linearyzowano podstawiając, w oryginalnej funkcji w miejsce zmiennych, wyrażenia:

$$x_1 = a_1 + \Delta x_1$$

$$x_2 = a_2 + \Delta x_2$$

.....

i pomijając iloczyny małych przyrostów zmiennych.

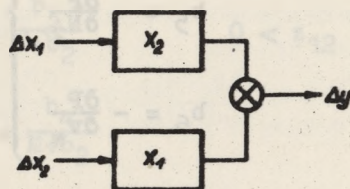
W przypadku funkcji nieliniowej  $y = x_1 x_2$ , otrzymuje się liniowe równanie dla przyrostów zmiennych:

$$\Delta y \approx x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1$$

Człon stały, równy wartości funkcji w punkcie odniesienia w równaniach linearyzowanych nie ulega zmianie. Wystarczy zatem rozpatrywać równania przyrostów zmiennych wg (1.15), zamiast aproksymacji funkcji nieliniowej wg równania (1.14). Wówczas mnożenie

$$y = x_1 x_2$$

odbywa się wg schematu blokowego podanego na rys. 1.3.



Rys. 1.3

## B. Identyfikacja obiektu - wyprowadzenia własne

### 1.7. Równania procesu dla małych przyrostów zmiennych

W wyniku linearyzacji nieliniowych równań procesu walcowania dla małych przyrostów zmiennych, otrzymuje się matematyczny model walcarki w postaci równań liniowych o stałych współczynnikach.

Dla małych przyrostów równanie sprężystości walcarki (1.9) można napisać w postaci

$$\Delta P = M(\Delta h_2 - \Delta S_0) \quad (1.16)$$

Dodatni przyrost  $\Delta S_0$  powoduje ujemny przyrost  $\Delta P$  i dodatni przyrost grubości  $\Delta h_2$ .

Po rozwinięciu równania nacisku walców (1.7) na szereg Taylora, z ograniczeniem do pierwszych wyrazów szeregu, otrzymano:

$$\begin{aligned} \Delta P = & \frac{\partial P}{\partial h_1} \Delta h_1 + \frac{\partial P}{\partial h_2} \Delta h_2 + \frac{\partial P}{\partial K_{ws}} \Delta K_{ws} + \frac{\partial P}{\partial N_1} \Delta N_1 + \\ & + \frac{\partial P}{\partial N_2} \Delta N_2 + \frac{\partial P}{\partial v_w} \Delta v_w \end{aligned} \quad (1.17)$$

lub stosując skrócony zapis:

$$\Delta P = b_1 \Delta h_1 - b_2 \Delta h_2 + b_3 \Delta K_{ws} - b_4 \Delta N_1 - b_5 \Delta N_2 - b_6 \Delta v_w \quad (1.18)$$

$$\text{gdzie: } \left. \begin{aligned} b_1 &= \frac{\partial P}{\partial h_1} & b_4 &= -\frac{\partial P}{\partial N_1} \\ b_2 &= -\frac{\partial P}{\partial h_2} & b_5 &= -\frac{\partial P}{\partial N_2} \\ b_3 &= \frac{\partial P}{\partial K_{ws}} & b_6 &= -\frac{\partial P}{\partial v_w} \end{aligned} \right\} \quad (1.19)$$



Wzrost grubości wyjściowej powoduje zmniejszenie nacisku walców ( $\partial P/\partial h_2 < 0$ ), natomiast wzrost grubości wejściowej i oporu odkształcenia metalu powodują wzrost nacisku walców ( $\partial P/\partial h_1 > 0$  oraz  $\partial P/\partial K_{ws} > 0$ ). Naciąg i przeciwnaciąg powodują zawsze zmniejszenie nacisku walców. Wzrost prędkości walcowania na ogół powoduje również zmniejszenie nacisku walców. Przyjęcie znaku minus, przed pochodnymi o ujemnych wartościach, oznacza, że odpowiednie współczynniki są dodatnie.

Współczynniki  $b_1 \dots b_6$  w równaniu (1.18) są zatem dodatnie, a znaki w równaniu (1.18) odpowiadają dodatnim przyrostom zmiennych. Taki zapis równania pozwala łatwo ocenić znak przyrostu  $\Delta P$  odpowiadający dodatniemu przyrostowi zmiennej niezależnej. Współczynniki te są zależne od geometrii szczeliny walców, wytrzymałości plastycznej walcowanego metalu, warunków tarcia w szczelinie i prędkości walcowania. Jednakże w przypadku nieznacznych przyrostów zmiennych i w stanie ustalonym procesu można uważać je za stałe. Pomiar tych współczynników natrafia na trudności spowodowane zmianami tarcia w szczelinie i zmienną grubością metalu na wejściu do przepustu.

Z porównania prawych stron wzorów (1.16) oraz (1.18) otrzymuje się równania równowagi sił dla małych przyrostów zmiennych, odpowiadające zależności (1.10). Z tego równania można obliczyć zmianę grubości metalu po przepuszczeniu:

$$\Delta h_2 = z_{11} \Delta h_1 + z_{12} \Delta K_{ws} - a_{11} \Delta N_1 - a_{12} \Delta N_2 + a_{13} \Delta S_0 - a_{14} \Delta v_w \quad (1.20)$$

$$\text{gdzie: } z_{11} = \frac{\partial h_2}{\partial h_1} = \frac{b_1}{M+b_2}; \quad 0 < z_{11} < 1$$

$$z_{12} = \frac{\partial h_2}{\partial K_{ws}} = \frac{b_3}{M+b_2} \quad 0 < z_{12} < 1 \quad (1.21)$$

$$a_{11} = - \frac{\partial h_2}{\partial N_1} = \frac{b_4}{M+b_2}$$

$$a_{12} = - \frac{\partial h_2}{\partial N_2} = \frac{b_5}{M+b_2}$$

$$a_{13} = \frac{\partial h_2}{\partial S_0} = \frac{M}{M+b_2} \quad 0 \leq a_{13} < 1 \quad (1.21)$$

$$a_{14} = - \frac{\partial h_2}{\partial v_w} = \frac{b_6}{M+b_2}$$

Współczynniki  $z_{11}$ ,  $z_{12}$  oraz  $a_{11}$  .....  $a_{14}$  są dodatnie, (przed ujemnymi pochodnymi przyjęto znak minus), a znaki w równaniu (1.20) odpowiadają dodatnim przyrostom zmiennych. Taki zapis równania (1.10) pozwala łatwo określić kierunek zmian grubości metalu po przepuszczeniu, spowodowanych przyrostami zmiennych niezależnych.

Zasadę stałej objętości przepływu metalu można, dla małych przyrostów grubości i prędkości, na podstawie (1.4b) wyrazić następująco:

$$v_1 \Delta h_1 + h_1 \Delta v_1 = v_2 \Delta h_2 + h_2 \Delta v_2 \quad (1.22)$$

Z równania (1.5) otrzymano:

$$\Delta v_2 = \Delta v_w s_w + v_w \Delta s_w. \quad (1.23)$$

### 1.8. Transmitancje szczeliny walców

Transmitancja szczeliny walców dla naciągu określa wpływ naciągu na grubość metalu po przepuszczeniu. Na podstawie definicji wyrażonych wzorami (1.19) i (1.21) można napisać równania transmitancji:

$$a_{11} = - \frac{\partial h_2}{\partial N_1} = - \frac{\partial P / \partial N_1}{M - \partial P / \partial h_2} = \frac{|\partial P / \partial N_1|}{M + |\partial P / \partial h_2|} \quad (1.24)$$

lub

$$a_{12} = - \frac{\partial h_2}{\partial N_2} = - \frac{\partial P / \partial N_2}{M - \partial P / \partial h_2} = \frac{|\partial P / \partial N_2|}{M + |\partial P / \partial h_2|} \quad (1.25)$$

Transmitancja szczeliny walców  $a_{13}$  określa wpływ odstępu walców na grubość metalu po przepuszczeniu.

Z (1.21) otrzymuje się:

$$a_{13} = \frac{\partial h_2}{\partial S_0} = \frac{M}{M + b_2} = \frac{M}{M - \partial P / \partial h_2} = \frac{M}{M + |\partial P / \partial h_2|} \quad (1.26)$$

Wartość tej transmitancji zależy od geometrii procesu walcowania, którą można wyrazić stosunkiem promienia walców do grubości metalu  $R : h_x$ , wytrzymałości plastycznej metalu, wartości naciągów, współczynnika tarcia, sprężystości walcarki ( $h_x$  oznacza zmienną wartość grubości metalu w szczelinie walców). Transmitancja szczeliny walców jest zawsze mniejsza od 1, zmienia się jednak w miarę walcowania wraz z grubością metalu, wskutek jego umocnienia przy walcowaniu na zimno i zmiany stosunku  $R : h_x$ . W rezultacie, w miarę wzrostu ilości przepustów, potrzebne są coraz większe zmiany odstępu walców do uzyskania jednakowej zmiany grubości.

Transmitancja szczeliny walców przy walcowaniu na zimno może się zmieniać w stosunku 1:2,3. Jeżeli nawet wyeliminuje się spłaszczenie walców i opór odkształcenia będzie stały, to  $a_{13}$  zmienia się w stosunku 1:1,6 z powodu zmian geometrii szczeliny walców [46]. Jeżeli  $a_{13} = 0$  regulacja grubości przez nastawianie walców nie jest możliwa.

Transmitancja szczeliny walców jest również funkcją prędkości walcowania, przy czym jej wartość wzrasta ze wzrostem prędkości walcowania. Poniżej pewnej granicznej prędkości walcowania  $a_{13} = 0$ . Transmitancja wzrasta ze wzrostem sztywności walcarki.

Zmienność transmitancji szczeliny walców w dużych granicach, jest jedną z przyczyn niestabilności układów regulacji grubości, spowodowanej zmianą współczynnika wzmocnienia zamkniętego układu regulacji.

Transmitancja szczeliny walców  $z_{11}$  podaje w jakim stopniu tłumiona jest wejściowa odchyłka grubości, przy stałych innych parametrach procesu.

$$z_{11} = \frac{\partial h_2}{\partial h_1} = - \frac{\partial P / \partial h_1}{\partial P / \partial h_2} = \frac{\partial P / \partial h_1}{M - \partial P / \partial h_2} = \frac{\partial P / \partial h_1}{M + |\partial P / \partial h_2|} \quad (1.27)$$

Z (1.27) wynika, że  $z_{11} < 1$ . Zatem zmiana grubości wyjściowej jest zawsze mniejsza od zmiany grubości wejściowej. Tę właściwość walcarek określa się jako zdolność do samowyrównywania wejściowej odchyłki grubości. Zdolność walcarek do samowyrównywania zakłóceń jest różna z powodu zmienności parametrów technologicznych metalu i różnych wartości  $M$ .

Transmitancja szczeliny walców  $z_{12}$  określa wpływ zmiennego oporu odkształcenia metalu na grubość po przepuszczeniu:

$$z_{12} = \frac{\partial h_2}{\partial K_{ws}} = \frac{\partial P / \partial K_{ws}}{M - \partial P / \partial h_2} = \frac{\partial P / \partial K_{ws}}{M + |\partial P / \partial h_2|} \quad (1.28)$$

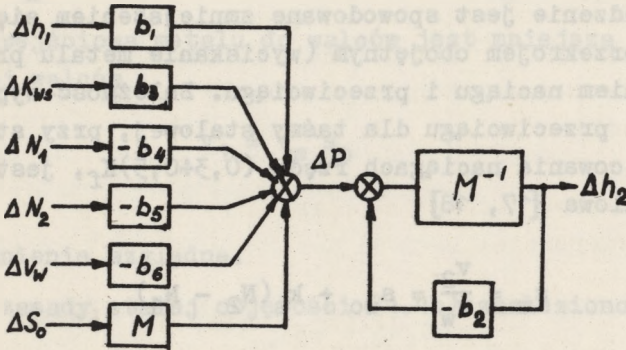
Przy odkształcaniu na zimno  $z_{12}$  wyraża wpływ różnego umocnienia metalu przed przepustem. Może ono być spowodowane nierównomierną rekrytalizacją lub nierównomiernym umocnieniem w poprzednich przepustach. Błąd grubości spowodowany tym zakłóceniem wzrasta wraz z ilością przepustów.

Transmitancje szczeliny walców mogą być obliczone jednym ze znanych sposobów. Podstawą wielu sposobów obliczeniowych są dokładne wzory na nacisk walców wyprowadzone przez E. Orowana dla płaskich przekrojów [4]. Zależności wyprowadzone przez niego uprościł dla walcowania na zimno D.R. Bland i H. Ford, a dla walcowania na gorąco R.B. Sims [7]. Wspólną cechą tych wzo-

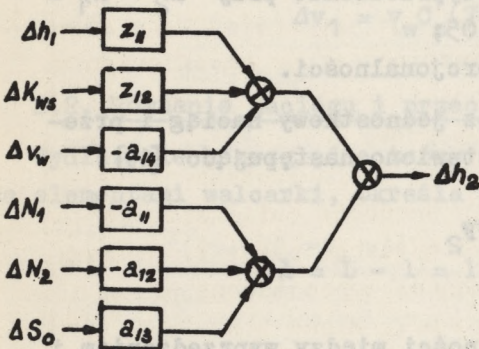
rów jest współczynnik wyróżniający średni opór odkształcenia metalu między walcami. W praktyce stosuje się proste wzory, w których występują wielkości dostępne dla pomiarów, np. średni opór odkształcenia. Jeżeli nie dysponuje się wartościami empirycznymi można posłużyć się tablicami, wykresami i nomogramami ułatwiającymi obliczenia, podanymi np. w [2, 3, 7]. Dalsza literatura podana w [45].

### 1.9. Schematy strukturalne szczeliny walców

Ograniczając się do przyrostów wielkości otrzymuje się proste schematy strukturalne szczeliny walców. Z równań (1.16) i



Rys. 1.4a



Rys. 1.4b

(1.18) wynika, po przesunięciu węzła sumacyjnego  $\Delta S_0$ , schemat strukturalny przedstawiony na rys. 1.4a. Zastępując człon ze sprzężeniem zwrotnym członem równoważnym o transmitancji

$$\frac{1/M}{1 + b_2/M}$$

otrzymuje się schemat strukturalny odpowiadający równaniu (1.20). Schemat taki przedstawia rys. 1.4b. Znaczenia transmitancji są takie jak we wzorze (1.21).

## 2. Wyprzedzenie ogólnych zależności dla naciągu i przeciwności

### 2.1. Wyprzedzenie i opóźnienie względne

Prędkość wyjściowa metalu z walców jest większa, natomiast prędkość wejściowa metalu do walców jest mniejsza, od prędkości obwodowej walców.

Prędkość wyjściowa metalu z walców  $v_2$  zależy od prędkości obwodowej walców  $v_w$  i wyprzedzenia względnego  $s_w$  (patrz 1.3). Wyprzedzenie jest spowodowane zmniejszeniem się grubości taśmy poza przekrojem obojętnym (wyciskanie metalu przez walce) oraz działaniem naciągu i przeciwności. Zależność wyprzedzenia od naciągu i przeciwności dla taśmy stalowej, przy stosowanych w czasie walcowania naciągach rzędu  $(0,3+0,5)K_f$ , jest w przybliżeniu liniowa [17, 18]:

$$s_w = \frac{v_2}{v_w} = s_{w0} + k_s(N_2 - N_1) \quad (2.1a)$$

gdzie:

$s_{w0}$  - wyprzedzenie metalu przy walcowaniu bez naciągu i przeciwności, względnie wyprzedzenie przy  $N_2 - N_1 = 0$ . Wg [2, 19]  $s_{w0} < 1,05$ ;

$k_s$  - stały współczynnik proporcjonalności.

Celem wyrażenia wyprzedzenia przez jednostkowy naciąg i przeciwność, współczynnik  $k_s$  przedstawiono następująco [19]:

$$k_s = C_s/F_2$$

gdzie:

$C_s$  - współczynnik proporcjonalności między wyprzedzeniem i naciągiem jednostkowym.

Wówczas otrzymuje się:

$$s_w = s_{wo} + C_s \left( \sigma_2 - \frac{\sigma_1}{\gamma} \right) \quad (2.1)$$

Prędkość wyjściowa metalu z walców wynosi:

$$v_2 = v_w \left[ C_s \left( \sigma_2 - \frac{\sigma_1}{\gamma} \right) + s_{wo} \right] \quad (2.2a)$$

Natomiast przyrost prędkości wyjściowej metalu z walców jest równy:

$$\Delta v_2 = v_w \Delta s_w = v_w C_s \left( \Delta \sigma_2 - \frac{\Delta \sigma_1}{\gamma} \right) \quad (2.2b)$$

Prędkość wejściowa metalu do walców jest mniejsza od prędkości obwodowej walców

$$v_1 = v_w s_o$$

gdzie:

$s_o$  - opóźnienie względne.

Wychodząc z zasady stałej objętości (1.4b) znaleziono:

$$s_o = \frac{v_1}{v_w} = \gamma s_w \quad \text{oraz} \quad v_1 = v_w \gamma s_w = v_w \left[ C_s (\gamma \sigma_2 - \sigma_1) + \gamma s_{wo} \right]$$

$$\Delta v_1 = v_w C_s (\gamma \Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_1) \quad (2.3)$$

## 2.2. Równanie naciągu i przeciwnaciągu

Wydłużenie bezwzględne taśmy w strefie naciągu, między dwoma elementami walcarki, określa prawo Hooke'a:

$$\Delta l = L - l = l \varepsilon_1 = l \sigma / E \quad (2.4)$$

gdzie:

$\Delta l$  - wydłużenie bezwzględne,

$l$  - długość taśmy nienaprężonej,

$L$  - długość taśmy naprężonej,

$\varepsilon_1 = \Delta l/l = \sigma/E$  - wydłużenie względne, (2.5).

Niech w dowolnej chwili będzie:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\Delta l}{L - \Delta l},$$

a po upływie czasu  $\Delta t$ :

$$\varepsilon_{12} = \frac{\Delta l + \Delta(\Delta l)}{L - [\Delta l + \Delta(\Delta l)]}$$

Przyrost wydłużenia bezwzględnego sprężystej taśmy, między dwoma elementami, jest funkcją różnicy prędkości obydwu końców taśmy [19, 20]:

$$\Delta(\Delta l) = (v_{zw} - v_2)\Delta t \quad (2.6)$$

gdzie:

$v_{zw}$  - prędkość liniowa taśmy nawijanej na bęben

$\Delta v = v_{zw} - v_w > 0$ .

Zatem przyrost względnego wydłużenia jest równy:

$$\Delta\varepsilon_1 = \varepsilon_{12} - \varepsilon_{11} = \frac{(v_{zw} - v_2) L \Delta t}{(L - \Delta l)^2 - (L - \Delta l)(v_{zw} - v_2)\Delta t}$$

Po przekształceniach, uwzględniając, że:  $l = L/(1 + \varepsilon_1)$  otrzymano:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varepsilon_1}{\Delta t} = \frac{d\varepsilon_1}{dt} = \frac{(v_{zw} - v_2)L}{(L - \Delta l)^2} = \frac{(v_{zw} - v_2)(1 + \varepsilon_1)^2}{L}$$

$\Delta t \rightarrow 0$



Ponieważ zazwyczaj  $\varepsilon_1$  jest rzędu  $10^{-3}$  [19] można przyjąć:

$$(1 + \varepsilon_1)^2 \approx 1$$

Uwzględniając (2.5), otrzymuje się równanie naciągu, które w postaci operatorowej<sup>1)</sup> można napisać:

$$\frac{L}{E} p \bar{\sigma}_2(p) = \bar{v}_{zw}(p) - \bar{v}_2(p) + L p \sigma_{20}/E \quad (2.7)$$

gdzie:

$\sigma_{20}$  - początkowy naciąg jednostkowy.

Analogiczne równanie dla przeciwności:

$$\frac{L}{E} p \bar{\sigma}_1(p) = \bar{v}_1(p) - \bar{v}_{rw}(p) + L p \sigma_{10}/E$$

gdzie:

$v_{rw}$  - prędkość liniowa taśmy rozwijanej z bębna,

$\sigma_{10}$  - początkowy przeciwność jednostkowy.

Równanie naciągu (2.7) napisane dla przyrostów wielkości:

$$\frac{L}{E} p \Delta \bar{\sigma}_2(p) = \Delta \bar{v}_{zw}(p) - \Delta \bar{v}_2(p) \quad (2.7a)$$

Równanie naciągu jednostkowego, dla stałej prędkości wałców, otrzymano podstawiając do (2.7) za  $v_2$ , wyrażenie na prędkość, z (2.2a):

$$\bar{v}_2(p) = v_w \bar{s}_w(p) = v_w C_s \left[ \bar{\sigma}_2(p) - \frac{\bar{\sigma}_1(p)}{y} \right] - v_w s_{wo} \quad (2.8)$$

1) Funkcję operatorową według Laplace'a-Carsona oznaczono przez  $\bar{f}(p)$ . Pozioma kreska nad funkcją  $\bar{f}(p)$  odróżnia ją od funkcji  $f(t)$ . Odpowiedniość obu funkcji oznaczono przez  $\hat{=}$ . Np.:  $\hat{f}(p) \hat{=} f(t)$  oznacza, że funkcja  $\hat{f}(p)$  odpowiada funkcji  $f(t)$ .

Podstawiając (2.8) do (2.7) otrzymuje się po przekształceniach:

$$\bar{\delta}_2(p) = \left[ \frac{\bar{v}_{zw}(p)}{v_w C_s} + \frac{\bar{\delta}_1(p)}{\gamma} + p \sigma_{20} T_\sigma - \frac{s_{wo}}{C_s} \right] \frac{1}{1 + p T_\sigma} \quad (2.9)$$

gdzie:

$$T_\sigma = L / EC_s v_w - \text{stała czasowa naciągu} \quad (2.10)$$

Równanie (2.9) napisane dla przyrostów wielkości ma postać:

$$\Delta \bar{\delta}_2(p) = \left[ \frac{\Delta \bar{v}_{zw}(p)}{v_w C_s} + \frac{\Delta \bar{\delta}_1(p)}{\gamma} \right] \cdot \frac{1}{1 + T_\sigma p} \quad (2.11)$$

Przyrost przeciwności jednostkowego:

$$\Delta \bar{\delta}_1(p) = \left[ - \frac{\Delta \bar{v}_{rw}(p)}{v_w C_s} + \gamma \Delta \bar{\delta}_2(p) \right] \cdot \frac{1}{1 + T_\sigma p} \quad (2.12)$$

Postać czasowa równania (2.11) dla skoku prędkości  $\Delta v_{zw} \cdot \mathbf{1}(t)$  i skoku przeciwności  $\Delta \sigma_1 \cdot \mathbf{1}(t)$ :

$$\Delta \sigma_2(t) = \Delta \sigma_{2u} [1 - \exp(-t/T_\sigma)] \cdot \mathbf{1}(t) \quad (2.13)$$

gdzie:

$$\Delta \sigma_{2u} = \Delta v_{zw} (v_w C_s + \Delta \sigma_1) \gamma$$

Otrzymane wyniki można sformułować następująco: Ustalonymu stosunkowi prędkości napędów walcarki odpowiada stała wartość naciągu i wyprzedzenia oraz stała wartość przeciwności i opóźnienia. W stanie ustalonym prędkość wyjściowa taśmy z walców  $v_2$  jest równa prędkości obwodowej kręgu na bębnie nawijającym  $v_{zw}$ , a prędkość wejściowa taśmy do walców  $v_1$  jest równa prędkości obwodowej kręgu na bębnie odwijającym  $v_{rw}$ . Zmiana prędkości walców lub bębna nawijającego powoduje ciągłą zmianę naciągu, w wyniku której zmienia się wyprzedzenie. Po zakończeniu stanu nieustalonego, prędkości obu końców odcinka taś-

my w strefie naciągu ponownie są jednakowe. Wyprzedzenie spełnia w tym przypadku rolę czynnika samoregulującego prędkość  $v_2$  i naciąg, ograniczając jego zmiany. Podobne zadanie spełnia opóźnienie w stosunku do przeciwnościągu. W procesie walcowania wraz ze wzrostem naciągu wzrasta wyprzedzenie i prędkość wyjściowa taśmy z walców, natomiast prędkość bębna nawijającego maleje z powodu nachylenia charakterystyki mechanicznej silnika.

Nawet przy skokowej zmianie prędkości, naciąg nie zmienia się nagle. Prędkość zmiany naciągu (przeciwnościągu) określa stała czasowa  $T_G$ , która wynosi kilkanaście do kilkudziesięciu ms. W wielu przypadkach można ją zatem pominąć, przyjmując, że zmiana naciągu jest równoczesna ze zmianą prędkości.

Na podstawie (1.20), (2.7a) i analogicznego równania dla przeciwnościągu, równanie procesu dla prędkości napędów, jako sygnałów wejściowych układu, wyrażono następująco:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = z_{11} \Delta \bar{h}_1(p) + z_{12} \Delta \bar{K}_{ws}(p) - \frac{E}{pL} \left\{ a_{11} F_1 [\Delta \bar{v}_1(p) - \Delta \bar{v}_{rw}(p)] + a_{12} F_2 [\Delta \bar{v}_{zw}(p) - \Delta \bar{v}_2(p)] \right\} + \frac{1}{p} a_{13} \bar{v}_s(p) - a_{14} \Delta \bar{v}_w(p)$$

gdzie:  $\Delta \bar{S}_0(p) = \frac{1}{p} \bar{v}_s(p)$ .

Celem wyrażenia prędkości przez elektryczne sygnały sterujące i transmitancje napędów, wyprowadzono dalej związki między elektrycznymi i mechanicznymi parametrami obiektu.

### 2.3. Napędy bębnowe

#### 2.3.1. Bilans mocy silnika napędowego

Do napędu bębnowe stosuje się obcowzbudne silniki prądu stałego. Związki istniejące między wielkościami elektrycznymi i mechanicznymi można przeanalizować wychodząc z bilansu mocy silnika napędowego:

$$UI - I^2 R - \Delta U_{sz} I = \frac{D_k}{2} N_2 \omega_{zw} + c_1 p \left( \frac{J \omega_{zw}^2}{2} \right) + P_m + P_{mt} \quad (2.14)$$

gdzie:

- U - napięcie na zaciskach twornika,
- I - prąd twornika silnika napędowego,
- R - oporność obwodu twornika,
- $\Delta U_{sz}$  - spadek napięcia na szczotkach,
- J - moment bezwładności zwijarki wraz z rulonem taśmy,
- $\omega_{zw} = 2v_{zw}/D_k$ , (2.14a)
- $D_k$  - średnica zewnętrzna nawijanego kręgu taśmy,
- $P_m$  - moc strat w mechanizmie zwijarki,
- $P_{mt}$  - moc odkształcania zwijanej taśmy,
- $c_1$  - współczynnik proporcjonalności.

Składowe  $P_{mt}$  i  $\Delta U_{sz}I$  mają małe znaczenie i można je pominąć. Przyjęto, że wpływ:

$I^2R$  - strat w obwodzie twornika,

$c_1 p \left( \frac{J\omega_{zw}^2}{2} \right)$  - składowej dynamicznej,

$P_m$  - strat mechanicznych,

jest kompensowany przez człony korekcyjne układu regulacyjnego, np. w sposób omówiony w [21]. Równanie (2.14) można wówczas uprościć do postaci:

$$UI = \frac{D_k F_2}{2} \sigma_2 \omega_{zw} \quad (2.15)$$

W układach stosowanych w praktyce, stosuje się zwykle kompensację spadku napięcia  $IR$ , przez układ korekcyjny. Wówczas zachodzi proporcjonalność między napięciem silnika napędowego i prędkością kątową bębna. Zależność tę w zakresie prostoliniowej części charakterystyki magnesowania wyraża wzór:

$$\omega_{zw} = \frac{U}{c_E i_w} \quad (2.16)$$

gdzie:

- $i_w$  - prąd wzbudzenia silnika,
- $C_E$  - współczynnik stały dla danego silnika.

Równanie (2.15) można teraz przedstawić:

$$\sigma_2 = \frac{2C_E i_w I}{D_k F_2} \quad (2.17)$$

Związek między naciągiem a mocą napędu bębna nawijającego, w stanie ustalonym, wynika z (2.15) po wyrażeniu  $\omega_{zw}$  przez (2.8) i (2.14a)

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2\gamma} + \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{4\gamma^2} + \frac{UI}{F_2 C_s v_w}} \quad (2.15a)$$

Z równań poprzednich wynikają możliwości pomiarów naciągu i uzyskania sygnałów dla układów regulacji.

### 2.3.2. Równanie ruchu bębna

Dynamiczne własności napędu bębnow nawijającego i odwijającego określa, równanie:

$$Jp[\bar{\omega}(p) - \omega_0] = \bar{M}_E(p) \pm \bar{M}_M(p) \quad (2.18)$$

gdzie:

- $J$  - stały moment bezwładności,
- $M_E$  - moment napędowy,
- $M_M$  - moment obciążenia,
- $\omega$  - prędkość kątowa bębna,
- $\omega_0$  - początkowa prędkość kątowa bębna.

Ponieważ rozpatruje się tylko krótkotrwałe przebiegi w stanach nieustalonych przyjęto, że moment bezwładności jest stały. Dalej rozpatruje się napęd bębna nawijającego.

M o m e n t n a p ę d o w y o b c o w z b u d n e g o s i l n i k a p r ą d u s t ą ł e g o , p r a c u j ą c e g o n a l i n i o w e j c z ę s c i c h a r a k t e r y s t y k i m a g n e s o w a n i a :

$$\bar{M}_E(p) = c_M i_w \bar{I}(p) = \frac{c_M i_w}{R} [U - c_{Ei_w} \bar{\omega}_{zw}(p)] \quad (2.19)$$

gdzie:

$c_M$  - współczynnik stały dla danego silnika.

M o m e n t o b c i ą ż e n i a j e s t f u n k c j ą  $\omega_{zw}$ :

$$\begin{aligned} \bar{M}_M(p) = \frac{D_{k2}}{2} F_2 \bar{\sigma}_2(p) = \frac{1}{1+pT\sigma} \frac{F_2 D_{k2}^2}{4C_s v_w} \bar{\omega}_{zw}(p) + \\ + \frac{1}{1+pT\sigma} \frac{D_{k2}^2 F_2}{2} \left( \frac{\sigma_1}{\gamma} + pT\sigma \sigma_{20} \right) \end{aligned} \quad (2.20)$$

We wzorze (2.20)  $\bar{\sigma}_2(p)$  wyrażono przy pomocy zależności (2.9). Po podstawieniu (2.19) i (2.20) do (2.18) otrzymano, po przekształceniach, równanie wyrażające zależność naciągu jednostkowego od parametrów elektrycznych i mechanicznych:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_2(p) = \frac{1}{T_{M2} T_{\sigma} p^2 + (T_{M2} + T_{\sigma}) p + 1 + \xi_2} \left\{ (1 + pT_{M2}) \left[ \frac{\bar{\sigma}_1(p)}{\gamma} - \frac{s_{wo}}{C_s} + \right. \right. \\ \left. \left. + pT_{\sigma} \sigma_{20} \right] + \bar{U}_2(p) k_{U2} + p \frac{D_{k2} T_{M2} \omega_o}{2C_s v_w} \right\} \end{aligned} \quad (2.21)$$

gdzie:

$$T_{M2} = J_2 R / C_E C_M i_w^2 \quad - \text{elektromechaniczna stała czasowa napędu,}$$

$$\xi_2 = \frac{R F_2 D_{k2}^2}{4C_s C_E C_M v_w i_w^2} \quad - \text{współczynnik bezwymiarowy,}$$

$$k_{U2} = D_{k2} / 2C_s C_E i_w^2 v_w.$$

Ponieważ  $\xi \ll 1$  równanie poprzednie można uprościć:

$$\bar{\sigma}_2(p) = \frac{1}{1+pT_\sigma} \left[ \frac{\bar{\sigma}_1(p)}{\gamma} - \frac{s_{wo}}{C_s} + pT_\sigma \sigma_{20} \right] + \frac{1}{T_{M2}T_\sigma p^2 + (T_{M2} + T_\sigma)p + 1} \left[ k_{U2} \bar{U}_2(p) + p \frac{D_{k2} T_{M2} \omega_0}{2C_s v_w} \right] \quad (2.22)$$

Równanie (2.22) jest następnym równaniem identyfikującym walcarkę, wraz z napędem bębna nawijającego, jako obiekt pomiarów i regulacji. Podobne równanie otrzymano dla napędu bębna odwijającego.

### 3. Pomiary w procesie walcowania

Zasadniczymi pomiarami w nowoczesnych sposobach walcowania są:

- a) pomiar grubości walcowanej taśmy,
- b) pomiar siły nacisku walców,
- c) pomiar siły naciągu i przeciwciągu taśmy walcowanej na zimno,
- d) pomiar odstępów walców metodami elektrycznymi, dla celów automatyzacji,
- e) pomiar momentu oraz pracy walcowania,
- f) pomiar temperatury przy walcowaniu na gorąco.

Ponadto opracowano ostatnio przyrządy do ciągłych pomiarów:

- g) twardości walcowanej taśmy [22],
- h) kształtu przekroju i płaskości taśmy [23].

Pomiary wyszczególnione w punktach od b do e są opisane w literaturze np. [2, 51, 52, 53, 54, 55]. Natomiast omówienia i analizy wymagają metody pomiarów grubości, a w szczególności pośrednie metody pomiarów grubości.

### 3.1. Przegląd metod pomiarowych grubości. Pomiary bezpośrednie

Pomiary grubości można podzielić na bezpośrednie i pośrednie. Do bezpośrednich pomiarów służą grubościomierze stykowe, elektromechaniczne i elektromagnetyczne, pneumatyczne oraz przyrządy oparte na zasadzie pochłaniania promieniowania tj. rentgenowskie i izotopowe [11, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Te ostatnie zapewniają dużą dokładność pomiaru, ponieważ jednak pracują na zasadzie całkowania, czas pomiaru jest stosunkowo długi. Przy ocenie bezpośrednich metod pomiaru grubości, z punktu widzenia regulacji grubości, należy uwzględnić poza dokładnością i czasem pomiaru - o p ó ź n i e n i e t r a n s p o r t o w e - wynikające z rozdzielania miejsca nastawiania i pomiaru. Z punktu widzenia regulacji jest to czas martwy ograniczający stabilność układu, szczególnie przy małych prędkościach walcowania. Z tych powodów korzystniejsze są grubościomierze elektromagnetyczne, ponieważ można je zainstalować blisko szczeliny walców. Opóźnienie transportowe  $\tau$  zależy od prędkości walcowania

$$\tau = l_m / v_2$$

gdzie:

$l_m$  - odległość grubościomierza od płaszczyzny wyjściowej metalu ze szczeliny walców.

Podczas jednego przepustu w walcierce nawrotnej, prędkość walcowania  $v_w$  zmienia się od 0 do wartości maksymalnej, a opóźnienie transportowe zmienia się od nieskończoności do pewnej wartości minimalnej.

Opóźnienie transportowe można wyeliminować w pośrednich metodach pomiaru grubości, umożliwiającymi pomiar w płaszczyźnie wyjściowej metalu z walców. Zatem miejsce pomiaru i nastawiania są identyczne.

Jeżeli zależne od prędkości walcowania, opóźnienie transportowe nie jest pomijalnie małe, wówczas wyregulowanie małych błędów grubości i zakłóceń, powyżej pewnej częstotliwości,



jest niemożliwe (patrz pkt 7). Natomiast w przypadku długofalowych lub monotonicznych odchyłek grubości na wejściu walcarki, bezpośredni pomiar grubości za walcarką jest wystarczający.

### 3.2. Metoda pośrednia pomiaru oparta na pomiarze nacisku i odstępów walców

#### 3.2.1. Opis metody

Wiadomo, że grubość metalu po przepuszczeniu różni się od początkowego odstępów walców, nastawionego bez nacisku walców. Przy zmiennej grubości wejściowej lub zmiennym oporze odkształcenia, grubość po przepuszczeniu zmienia się nawet wówczas, gdy odstęp walców nie jest podczas przepustu nastawiany. Przyczyną tych zmian jest sprężyste odkształcenie elementów walcarki (patrz p. 1.4.2) o wartości wypadkowej P/M.

W opisywanej metodzie [30, 31] sama walcarka spełnia rolę miernika grubości, w którym walce robocze są elementami stykowymi. Zasadę pomiaru wyjaśnia równanie (1.9), które można przepisać w postaci:

$$h_2 = S_0 + P/M \quad (1.9a)$$

Dla regulacji istotny jest błąd grubości od wartości zadanej  $h_{2n}$  i jego znak

$$\Delta h_2 = h_2 - h_{2n} \quad (3.1)$$

Po podstawieniu (1.9a) do (3.1) otrzymuje się:

$$\Delta h_2 = S_0 + P/M - h_{2n} \quad (3.2)$$

Do wyliczenia odchyłki grubości konieczny jest zatem ciągły pomiar  $S_0$ , P oraz znajomość M.

Otrzymany tą drogą wynik pomiaru przedstawia średnią wartość grubości metalu wzdłuż jego szerokości, jeżeli spełnio-

ny jest warunek, że walce w procesie walcowania nie podlegają niedopuszczalnym ugięciom i że ich zużycie jest nieznaczne. Warunki te muszą być spełnione ze względów technologicznych, gdyż w przeciwnym przypadku walcowany metal miałby różną grubość wzdłuż szerokości.

Istnieje także możliwość pomiaru grubości na obydwu krawędziach, jeżeli będzie mierzony oddzielnie nacisk i odstęp walców, po obydwu stronach walcarki [31].

### 3.2.2. Analiza błędów

Ta, prosta w swej zasadzie, metoda pomiaru jest obarczona błędami systematycznymi, zmniejszającymi dokładność pomiaru. Błędy systematyczne metody są spowodowane przez:

- wpływ prędkości walcowania (poprzez film olejowy w łożyskach o płynnym smarowaniu [32]);
- oddziaływanie powolnych, długotrwałych zmian temperatury otoczenia i nagrzewania się klatki i walców;
- zużycie walców (zależnie od szerokości i twardości walcowanego metalu);
- zmienność i zależność współczynnika sprężystości walcarki  $M$  od szerokości walcowanej taśmy;
- wpływ ekscentryczności walców.

Ponieważ  $M$  (patrz (1.8a)) oznacza współczynnik sprężystości walcarki, tzn. klatki łącznie z walcami, spłaszczenie i ugięcie walców jest w pomiarze uwzględnione.

Wpływ prędkości walcowania [12, 33] jest istotny w stanach niustalonych. Można go uwzględnić wprowadzając czynnik korekcyjny [32].

Wpływ zmian temperatury i zużycia walców jest powolny i uwidacznia się w postaci pełzania zera. Zmiany spowodowane tymi wpływami wynoszą kilka dziesiętnych mm w ciągu dnia. Zmiany te nie są w układzie wykrywane, można je jednak zmniejszyć przez częste zerowanie układu pomiarowego lub przez wprowadzenie niezależnego kontrolnego pomiaru grubości poza walcarką [11, 34]. Porównując sygnał błędu z kontrolnego miernika z pomiarem uzyskanym metodą pośrednią, otrzymuje się różnicę, która służy

do korekcji układu pomiarowego. W obwodzie kontrolnym przeprowadza się całkowanie sygnału odchyłki, co zapobiega niestabilności przy małych prędkościach.

Wyeliminowanie opóźnienia transportowego umożliwia wyregulowanie zakłóceń o wyższych częstotliwościach. Do pełnego wykorzystania zalet tej metody konieczna jest duża prędkość zmiany odstępu walców. Wymagania te spełnia napęd o nastawianej prędkości, zasilany z prostowników lub napęd hydrauliczny.

Jednakże nawet w tym systemie pomiarowym, nie można wyregulować błędów wywołanych ekscentrycznością walców. Zmiany nacisku walców, spowodowane tym zakłóceniem, wywołują bowiem efekt regulacyjny zwiększający błąd grubości, wynikły z ekscentryczności walców i łożysk. Ekscentryczność walców i łożysk w poprzednich operacjach (np. na walcowni ciągłej) powoduje powstanie składowej zmiennej wejściowej odchyłki grubości o wysokiej częstotliwości, w porównaniu z innymi zakłóceniami. Regulacja oparta na pomiarze chwilowej wartości błędu może w tym przypadku doprowadzić do podwojenia amplitudy składowej zmiennej błędu grubości. Aby uniknąć tego efektu pomiar grubości powinien być uśredniany, co przy szerokim zakresie zmian prędkości walcowania jest trudne do zrealizowania i powoduje konieczność wydłużenia przerw.

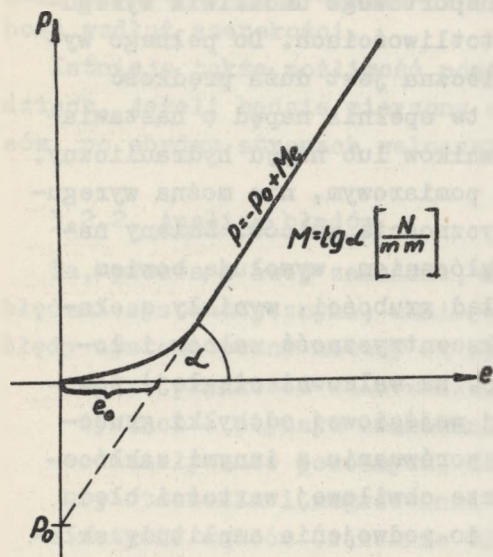
Poza błędami systematycznymi niedokładność omawianej metody jest spowodowana niedokładnością pomiaru odstępu walców i odkształcenia walcarki.

Odkształcenie walcarki można obliczyć jako różnicę rzeczywistej grubości metalu po przepuszczeniu, mierzonej na jego krawędzi i rzeczywistego odstępu walców przed przepustem:

$$e = h_2 - S_0 \quad (3.3)$$

Typowy wykres odkształcenia walcarki w funkcji nacisku walców podano na rys. 3.1. Dla tej samej walcarki można otrzymać różne wykresy, zależnie od stanu nagrzania stojaka, sposobu wykonania pomiaru (statycznie dla  $v_w = 0$  lub dynamicznie dla  $v_w \neq 0$ ), szerokości metalu, wpływu smarów na powierzchnię

metal i walców (przy walcowaniu na zimno smary powodują zmiany współczynnika tarcia). Różnice pomiędzy pomiarem statycznym i dynamicznym są wywołane wpływem filmu olejowego w łożyskach o płynnym smarowaniu i mniejszym odkształceniem walców podczas ruchu [13].



Rys. 3.1

Dalej oznaczono przez  $\delta S_0$  sumaryczny błąd wywołany przez:

- zmianę średnicy walców wskutek wpływu temperatury,
- zużycie walców i ich ekscentryczność,
- bezwzględną wartość błędu pomiaru nastawionego odstępów walców.

Przez  $\delta P$  oznaczono bezwzględną wartość błędu pomiaru nacisku walców. Na podstawie (3.3) i równania odkształcenia walcarki podanego na rys. 3.1 można napisać:

$$h_2 = S_0 + e = S_{om} - \delta S_0 + \frac{P + P_0 - \delta P}{M} = \left( \frac{P_0 - \delta P}{M} - \delta S_0 \right) + S_{om} + \frac{P}{M}$$

zatem

$$h_2 = S_{om} + \frac{P}{M} + D \quad (3.4)$$

gdzie:

$$e = \frac{(P + P_0 - \delta P)}{M} = e_0 + \frac{(P - \delta P)}{M} \quad \text{odkształcenie walcarki}$$

$e_0; P_0$  - patrz rys. 3.1,

$P - \delta P$  - poprawna wartość nacisku walców,

$S_{om}$  - zmierzona wartość nastawionego odstępu walców,  
 $S_{om} - \delta S_o$  - poprawna wartość nastawionego odstępu walców

$$D = \frac{P_o - \delta P}{M} - \delta S_o \quad \text{korekcja} \quad (3.5)$$

Ponieważ wartość korekcji  $D$  jest wyznaczana okresowo, na podstawie kontrolnego, bezpośredniego pomiaru grubości, trzeba przyjąć, że w okresie czasu, pomiędzy dwoma pomiarami kontrolnymi wartość poprawki nie ulega zmianie.

Pomimo małej dokładności tej metody, istnieje możliwość dokładnego pomiaru odchyłek grubości, od znanej wartości, wyznaczonej np. przez pomiar bezpośredni, przy pomocy grubościomierza umieszczonego poza klatką.

Do dalszej analizy przyjęto oznaczenia:

$h_{2n}$  - poprawna, znana wartość grubości (np. blachy wzorcowej) wyznaczona pomiarem bezpośrednim,

$h_{2nm}$  - wartość grubości  $h_{2n}$  (np. blachy wzorcowej) zmierzona metodą pośrednią,

$h_{2A}$  - poprawna wartość mierzonej grubości, np. blachy walcowanej, oznaczonej literą  $A$ ,

$h_{2Am}$  - wartość grubości  $h_{2A}$  zmierzona metodą pośrednią.

Dla wartości  $h_{2nm}$  i  $h_{2Am}$  można napisać wg (3.4) równania:

$$h_{2nm} = S_{onm} + \frac{P_n}{M} + D \quad (3.6a)$$

$$h_{2Am} = S_{oAm} + \frac{P_A}{M} + D \quad (3.6b)$$

gdzie:  $P_A$  - nacisk walców zmierzony podczas walcowania blachy  $A$ .

Po podstawieniu (3.6a) i (3.6b) do wzoru (3.1) otrzymuje się poprawną wartość odchyłki grubości (przy założeniu, że  $S_{onm} = S_{oAm}$ ):

$$\Delta h_{2A} = h_{2Am} - h_{2nm} = \frac{P_A - P_n}{M} = \frac{\Delta P_A}{M}$$

Poprawna wartość grubości  $h_{2A}$  wynosi:

$$h_{2A} = h_{2n} + \Delta h_{2A} = h_{2n} + \frac{\Delta P_A}{M} \quad (3.7)$$

Jeżeli bezwzględną wartość błędu pomiaru  $\Delta h_{2A}$  oznaczyć przez  $\delta \Delta h_{2A}$ , wówczas względny błąd pomiaru  $h_{2A}$  wynosi:

$$\frac{\delta \Delta h_{2A}}{h_{2A}} \quad (3.7a)$$

Jak wynika z (3.7a), wynik pomiaru obliczony z (3.7), może być dokładny, nawet przy dużej niedokładności pomiaru  $\Delta h_{2A}$ .

### 3.3. Metoda pośrednia, oparta na pomiarze wydłużenia

Wychodząc z zasady stałej objętości (wzór (1.4b)) otrzymuje się wyrażenia dla błędu grubości metalu po przepuszczeniu:

$$\Delta h_2 = \frac{h_1 l_1 - h_{2n} l_2}{l_2} \quad (3.8)$$

gdzie:

$l_1$  - długość metalu przed przepustem, równa np. długości przewalcowanej w jednostce czasu (prędkości wejściowej metalu do walców),

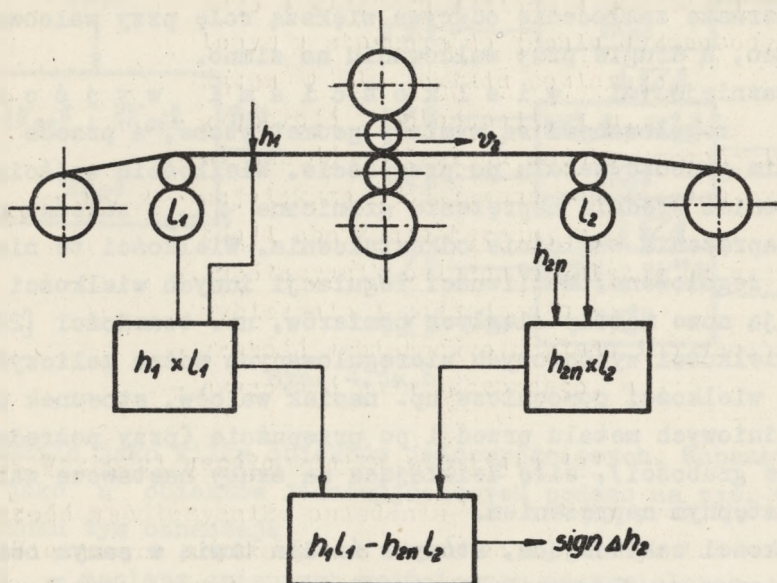
$l_2$  - długość metalu po przepuszczeniu, odpowiadająca  $l_1$  (prędkość wyjściowa metalu z walców).

Dla regulacji ważny jest znak odchyłki grubości:

$$\text{sign } \Delta h_2 = \text{sign } (h_1 l_1 - h_{2n} l_2) \quad (3.9)$$

Uproszczony schemat układu pomiarowego wg tej metody przedstawiono na rys. 3.2. Jej realizacja [35] wymaga pomiaru grubości metalu przed przepustem, w dowolnej odległości od walcarki oraz pomiaru prędkości wejściowej metalu do walców i prędkości wyjściowej metalu z walców. Zmierzoną grubość wpro-

wadza się do pamięci, a następnie w chwili gdy odpowiedni przekrój wchodzi między walce, zapamiętaną wartość grubości wpro-



Rys. 3.2

wadza się do członu wykonującego operację mnożenia  $h_1 l_1$ . W drugim członie wykonywane jest mnożenie  $h_{2n} l_2$ . Na wyjściu sumatora otrzymuje się różnicę obydwu iloczynów. Jest ona miarą błędu grubości i określa jego znak. Wynik otrzymuje się bez opóźnienia.

#### 4. Walcarka jako obiekt regulacji wieloparametrowej

##### 4.1. Wielkości wejściowe i wyjściowe. Zakłócenia

Z m i e n n e w e j ś c i o w e walcarki można podzielić na nastawialne i nienastawialne. Do pierwszej grupy należą: nacisk walców, naciąg i przeciwnaciąg, prędkość obrotowa walców. Są to wielkości wejściowe użyteczne. Natomiast grubość i wytrzymałość plastyczna metalu przed przepustem są nienastawialne. Odchyłki tych wielkości od ich wartości znamionowych

stanowią z a k ł ó c e n i a w e j ś c i o w e. Najważniejszym zakłóceniem wejściowym jest zmienność grubości przed przepustem i zmienność średniego oporu odkształcenia, przy czym pierwsze zakłócenie odgrywa większą rolę przy walcowaniu na gorąco, a drugie przy walcowaniu na zimno.

Najważniejszymi w i e l k o ś c i a m i w y j ś c i o w y m i regulowanymi są wymiary geometryczne, a przede wszystkim grubość metalu po przepuszczeniu. Wielkością wyjściową jest również średnie naprężenie graniczne  $\rho K_{fS}$ , zależne od stanu naprężenia względnie odkształcenia. Wielkości te nie są obecnie regulowane. Możliwości regulacji innych wielkości stwarzają nowe metody ciągłych pomiarów, np. twardości [22].

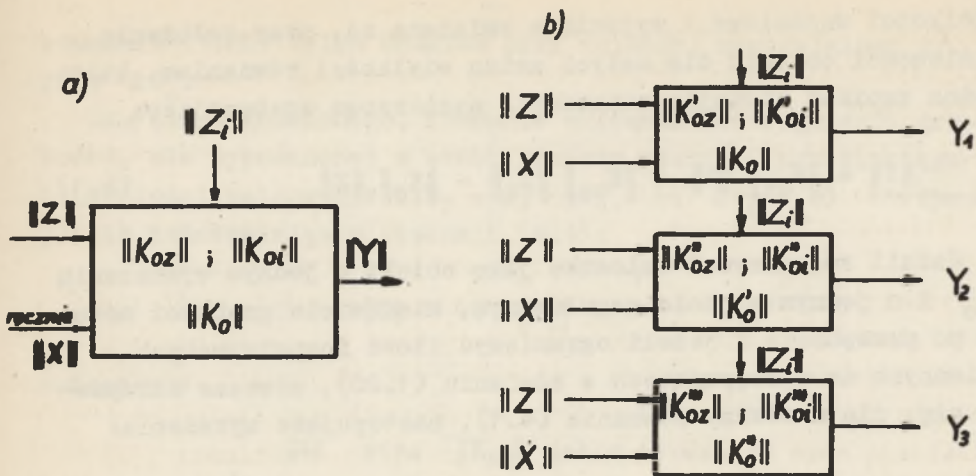
Do wielkości wyjściowych nieregulowanych można zaliczyć również wielkości pomocnicze np. nacisk walców, stosunek prędkości liniowych metalu przed i po przepuszczeniu (przy pośrednim pomiarze grubości), siłę działającą na śruby nastawcze walcarki ze wstępnym naprężeniem.

Wielkości zakłócające, których źródła tkwią w samym obiekcie: zmienny współczynnik tarcia między walcami a metalem, ekscentryczność walców oporowych i zwoju na bębnie nawijającym i odwijającym, efekty wywołane zmianą prędkości, wpływ filmu olejowego w łożyskach o płynnym smarowaniu, wpływ nagrzewania się walców, zmiana naciągów. Zmiany naciągu występują szczególnie w okresach przyspieszenia i hamowania, gdy synchronizm prędkości obwodowych walców i zwijarki jest zakłócony, wskutek różnych własności dynamicznych i niedoskonałości układów regulacyjnych. W tym przypadku wyrównanie prędkości zachodzi za pośrednictwem walcowanego metalu, powodując zmiany jego grubości. Do tego efektu dodaje się wpływ zmian współczynnika tarcia, którego wartość zależy również od prędkości walcowania (patrz [36]).

#### 4.2. Walcarka bez regulacji automatycznej

Walcarkę jako obiekt o wielu wejściach i wyjściach przedstawia rys. 4.1a. Obiekt o kilku wyjściach można przedstawić





Rys. 4.1a,b

równoważnie jako kilka obiektów jednowyjściowych. Schemat walcarki jako  $n$  obiektów jednowyjściowych podano na rys. 4.1b. Na rysunku tym oznaczają:

- $\|X\|$  - macierz zmiennych wejściowych nastawialnych,
- $\|Y\|$  - macierz zmiennych wyjściowych,
- $\|Z\|$  - macierz zmiennych wejściowych nienastawialnych (zakłóceń),
- $\|Z_i\|$  - macierz zakłóceń wewnętrznych powstających w obiekcie,
- $\|K_O\|$  - macierz transmitancji szczeliny walców dla wielkości wejściowych nastawialnych,
- $\|K_{Oz}\|$  - macierz transmitancji szczeliny walców dla zakłóceń wejściowych,
- $\|K_{Oi}\|$  - macierz transmitancji szczeliny walców dla zakłóceń wewnętrznych.

Wielkości wejściowe i wyjściowe związane są, przy założeniu liniowości obiektu dla małych zmian wielkości równaniem, które można zapisać stosując oznaczenia macierzowe następująco:

$$\|Y\| = \|K_{Oz}\| \|Z\| + \|K_{Oi}\| \|Z_i\| - \|K_O\| \|X\| \quad (4.1)$$

Jeżeli rozpatrywać walcarkę jako obiekt o jednym wymuszeniu  $\Delta S_0$  i o jednym wyjściu regulowanym, mianowicie grubości metalu po przepuszczeniu i jeżeli ograniczyć ilość rozpatrywanych zmiennych do występujących w równaniu (1.20), wówczas otrzymuje się, dla macierzy równania (4.1), następujące wyrażenia:

$$\left. \begin{aligned} \|Y\| &= \Delta h_2 & \|K_O\| &= a_{13} \\ \|X\| &= \Delta S_0 & \|K_{Oz}\| &= \|z_{11} \ z_{12}\| \\ \|Z\| &= \left\| \begin{array}{c} \Delta h_1 \\ \Delta K_{ws} \end{array} \right\| & \|K_{Oi}\| &= \|-a_{11} - a_{12} - a_{14}\| \\ \|Z_i\| &= \left\| \begin{array}{c} \Delta N_1 \\ \Delta N_2 \\ \Delta v_w \end{array} \right\| \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Podane w (4.2) macierze  $\|X\|$  i  $\|K_O\|$  odpowiadają ręcznej regulacji grubości, przez nastawianie odstępów walców. W praktyce, walcownik zmienia odstęp walców, a więc i nacisk walców, na podstawie obserwacji wskazań miernika grubości.

Zmiany naciągów i prędkości walcowania, od wartości nastawionych, są w tym przypadku zakłóceniami wewnętrznymi procesu walcowania. Zmiany te, podobnie jak zakłócenia wejściowe wnoszone przez walcowany metal, będą powodowały błąd grubości po przepuszczeniu. Wpływy niektórych zakłóceń mogą się kompensować.

Po podstawieniu (4.2) do (4.1) otrzymuje się, zgodnie z przyjętymi ograniczeniami, równanie walcarki różniące się od

równania (1.20) tylko znakiem przy zmiennej nastawialnej tj. przy  $\Delta S_0$ .

Dla stanu ustalonego, równanie walcarki bez regulacji grubości, ale wyposażonej w stabilizatory naciągu, przeciwnaciągu i prędkości walcowania ( $\Delta N_2 = 0$ ;  $\Delta N_1 = 0$ ;  $\Delta v_w = 0$ ) otrzymuje się podstawiając w równaniu (4.1):

$$\|X\| = 0; \quad \|Z_1\| = 0$$

natomiast:

$$\|Z\| \quad \text{oraz} \quad \|K_{Oz}\| \quad \text{jak w (4.2)}.$$

Wówczas:

$$\Delta h_2 = z_{11} \Delta h_1 + z_{12} \overset{\text{def}}{\Delta K_{ws}} = \Delta h_{2z} \begin{matrix} \|Z_1\| \\ \|X\| \end{matrix} = 0 \quad (4.3)$$

W tym przypadku błąd grubości po przepuszczeniu zależy tylko od parametrów wejściowych metalu i od transmitancji walcarki dla zakłóceń wejściowych, o ile pominąć inne zakłócenia wymienione w 4.1.

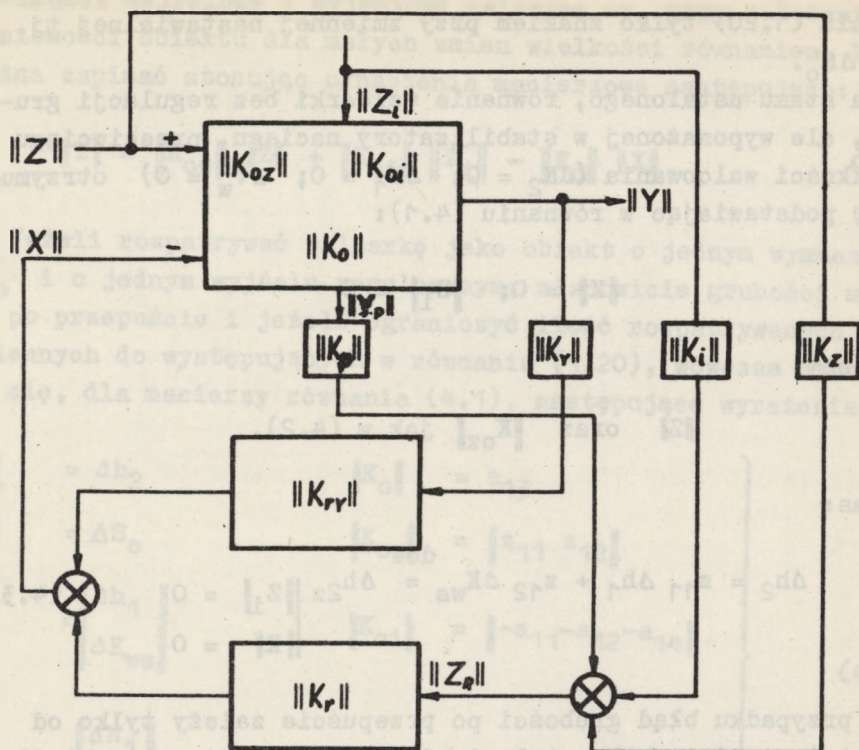
Ponieważ błąd grubości zdefiniowany równaniem (4.3) występuje wielokrotnie w dalszych rozważaniach, wprowadzono dla jego oznaczenia osobny symbol  $\Delta h_{2z}$ .

#### 4.3. Walcarka z regulacją automatyczną

Na rys. 4.2 przedstawiono schemat blokowy walcarki ze sprzężeniami zwrotnymi, pomiarem i kompensacją zakłóceń oraz pomiarem wielkości wyjściowych, przy czym poza oznaczeniami podanymi w 4.2, przyjęto następujące dalsze oznaczenia:

$\|K_{TY}\|$  - macierz transmitancji regulatora wraz z członem wykonawczym, dla sygnałów wielkości wyjściowych,

$\|K_T\|$  - macierz transmitancji regulatora wraz z członem wykonawczym dla sygnałów innych wielkości,



Rys. 4.2

$\|K_i\|$  - macierz transmitancji przetworników zakłóceń wewnętrznych,

$\|K\|$  - macierz transmitancji przetworników zmiennych wyjściowych pomocniczych,

$\|K_Y\|$  - macierz transmitancji przetworników wielkości wyjściowych,

$\|K_Z\|$  - macierz transmitancji przetworników wielkości wejściowych,

$\|Y_p\|$  - macierz zmiennych wyjściowych pomocniczych,

$\|Z_R\| = \|K_Z\| \|Z\| + \|K_i\| \|Z_i\| + \|K_p\| \|Y_p\|,$

$\|1\|$  - macierz jednostkowa,

stosując oznaczenia macierzowe, równania walcarki można przedstawić następująco:

$$\|Y\| = \|K_{Oz}\| \|Z\| + \|K_{Oi}\| \|Z_i\| - \|K_O\| (\|K_{Ty}\| \|K_Y\| \|Y\| + \|K_T\| \|Z_R\|) \quad (4.4)$$

$$\|Y\| = \|Mm\|^{-1} [\|K_{Oz}\| \|Z\| + \|K_{Oi}\| \|Z_i\| - \|K_O\| \|K_T\| \|Z_R\|] \quad (4.5)$$

gdzie:

$$\|Mm\|^{-1} = (\|1\| + \|K_O\| \|K_{Ty}\| \|K_Y\|)^{-1}$$

Wprowadzono pojęcie transmitancji walcarki, ze sprzężeniem zwrotnym i kompensacją zakłóceń wejściowych, zdefiniowaną wzorem:

$$\|K_{Wz}\| = \|Mm\|^{-1} (\|K_{Oz}\| - \|K_O\| \|K_T\| \|K_Z\|) \quad (4.6a)$$

dla:

$$\|Z_i\| = 0; \quad \|Y_p\| = 0;$$

Transmitancja walcarki ze sprzężeniem zwrotnym i kompensacją zakłóceń wewnętrznych:

$$\|K_{Wi}\| = \|Mm\|^{-1} (\|K_{Oi}\| - \|K_O\| \|K_T\| \|K_i\|) \quad (4.6b)$$

dla:  $\|Z\| = 0; \quad \|Y_p\| = 0;$

Transmitancja walcarki ze sprzężeniem zwrotnym, dla wielkości pomocniczych:

$$\|K_{Wp}\| = \|Mm\|^{-1} \|K_O\| \|K_T\| \|K_p\| \quad (4.6c)$$

dla:  $\|Z\| = 0; \quad \|Z_i\| = 0;$

Posługując się wzorami (4.6a,b,c), równanie (4.5) można zapisać w skróconej postaci:

$$\|Y\| = \|K_{WZ}\| \|Z\| + \|K_{Wi}\| \|Z_i\| - \|K_{Wp}\| \|Y_p\| \quad (4.7)$$

Równania (4.5) i (4.7) umożliwiają pełny opis procesów zachodzących w szczelinie walców walcarki z regulacją. Równania te, w swej nieuproszczonej postaci, mogą być stosowane np. do analizy regulacji kształtu przekroju walcowanych taśm i blach. Wówczas wielkość wyjściową można przedstawić w postaci macierzy prostokątnej stopnia  $1 \times n$  lub wyższego. Równania te upraszczają się, jeśli rozważania ograniczyć do jednej wielkości regulowanej tj. do grubości. Wówczas macierze transmitancji szczeliny walców będą macierzami prostokątnymi, wierszowymi, stopnia  $1 \times n$ , macierze zakłóceń i wielkości pomocniczych będą macierzami prostokątnymi, kolumnowymi, stopnia  $n \times 1$ , natomiast zamiast macierzy wielkości wyjściowych, wystąpi tylko jedna wielkość, tj. grubość wzgl. błąd grubości. Obiekt będzie wówczas przedstawiony jednym ze schematów na rys. 4.1b.

#### 4.4. Walcarka z napędami bębnow

##### 4.4.1. Uzupełnienie schematu blokowego walcarki

Dotychczasowe rozważania dotyczyły procesów zachodzących w szczelinie walców i sposobów oddziaływania na przebieg tego procesu. Do opisu przebiegów posługiwano się transmitancjami szczeliny walców względnie bardziej złożonymi związkami - transmitancjami walcarki. Transmitancje walcarki uwzględniają zarówno transmitancje szczeliny walców jak i transmitancje członów układów regulacji. W tym zakresie opisu schemat walcarki przedstawia rys. 4.2. Do analizy dynamiki naciągu i przeciwności, z uwzględnieniem zakłóceń, schemat ten jest niewystarczający. Na rys. 4.3 podano rozszerzony schemat blokowy obejmujący napędy bębnow nawijająco-odwijających.

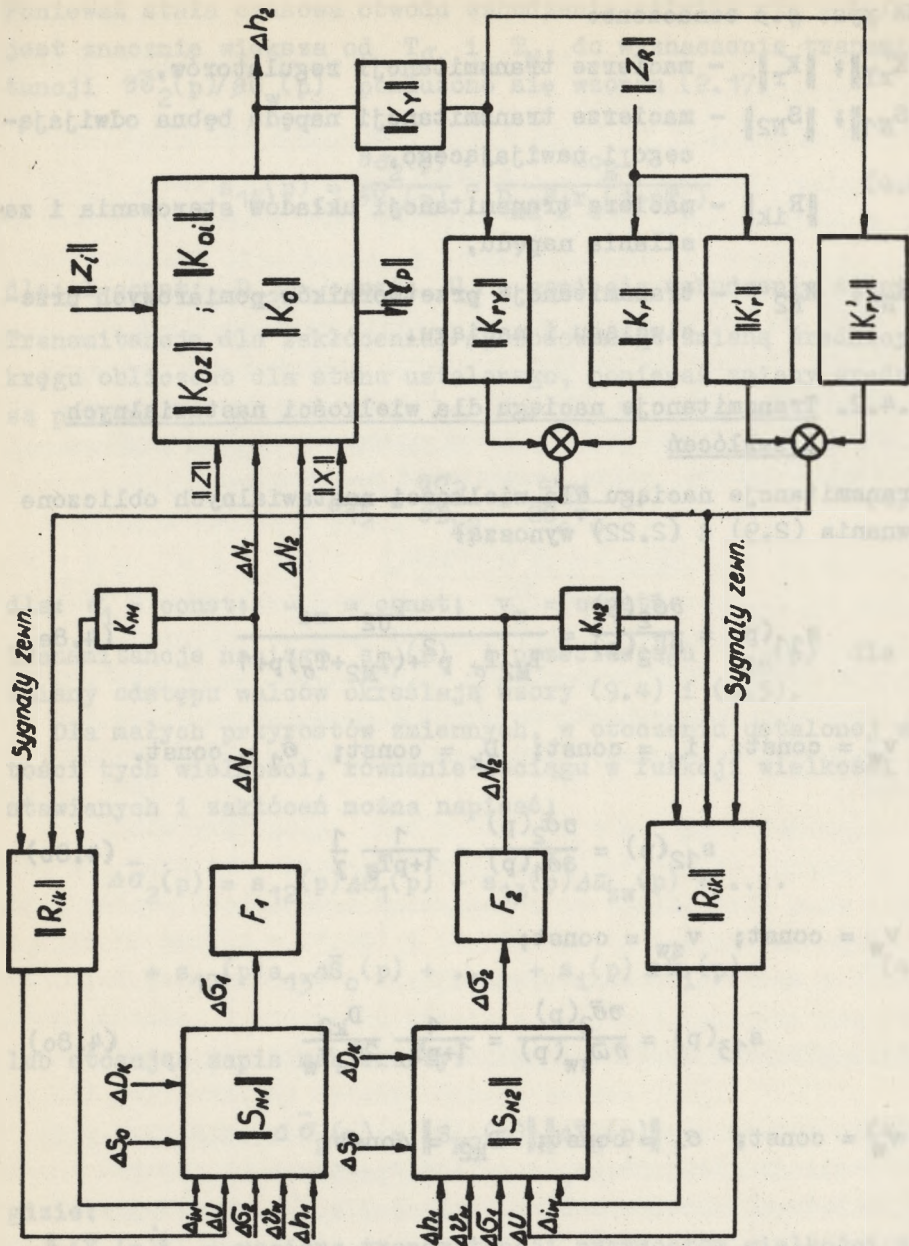


Рис. 4.3

Na rys. 4.3 oznaczono:

$\|K'_{TY}\|$ ;  $\|K'_T\|$  - macierze transmitancji regulatorów,

$\|S_{N1}\|$ ;  $\|S_{N2}\|$  - macierze transmitancji napędu bębna odwijającego i nawijającego,

$\|R_{ik}\|$  - macierz transmitancji układów sterowania i zasilania napędu,

$K_{N1}$ ;  $K_{N2}$  - transmitancje przetworników pomiarowych przeciwności i naciągu.

#### 4.4.2. Transmitancje naciągu dla wielkości nastawialnych i zakłóceń

Transmitancje naciągu dla wielkości nastawialnych obliczone z równania (2.9) i (2.22) wynoszą:

$$s_{11}(p) = \frac{\partial \bar{\sigma}_2(p)}{\partial U_2(p)} = \frac{k_{U2}}{T_{M2} T_{\sigma} p^2 + (T_{M2} + T_{\sigma}) p + 1} \quad (4.8a)$$

dla:  $v_w = \text{const}$ ;  $i_w = \text{const}$ ;  $D_k = \text{const}$ ;  $\sigma_1 = \text{const}$ .

$$s_{12}(p) = \frac{\partial \bar{\sigma}_2(p)}{\partial \bar{\sigma}_1(p)} = \frac{1}{1 + p T_{\sigma}} \frac{1}{\gamma} \quad (4.8b)$$

dla:  $v_w = \text{const}$ ;  $v_{zw} = \text{const}$ ;

$$s_{13}(p) = \frac{\partial \bar{\sigma}_2(p)}{\partial \bar{\omega}_{zw}(p)} = \frac{1}{1 + p T_{\sigma}} \frac{D_{k2}}{2C_s v_w} \quad (4.8c)$$

dla:  $v_w = \text{const}$ ;  $\sigma_1 = \text{const}$ ;  $D_{k2} = \text{const}$ ;



Ponieważ stała czasowa obwodu wzbudzenia silnika  $T_w = L_w/r_w$  jest znacznie większa od  $T_\sigma$  i  $T_M$ , do wyznaczenia transmitancji  $\partial \bar{\sigma}_2(p)/\partial \bar{U}_w(p)$  posłużono się wzorem (2.17)

$$s_{14}(p) = \frac{\partial \bar{\sigma}_2(p)}{\partial \bar{U}_w(p)} = \frac{2c_E I}{D_{k2} F_2 r_w (1+pT_w)} \quad (4.8d)$$

dla:  $I = \text{const}$ ;  $D_{k2} = \text{const}$ ;  $U_w$  - napięcie wzbudzenia silnika  
 Transmitancję dla zakłócenia, spowodowanego zmianą średnicy kręgu obliczono dla stanu ustalonego, ponieważ zmiany średnicy są powolne

$$s_{15} = \frac{\partial \sigma_2}{\partial D_{k2}} = \frac{\omega_{zw}}{2C_s v_w} \quad (4.8e)$$

dla:  $\sigma_1 = \text{const}$ ;  $\omega_{zw} = \text{const}$ ;  $v_w = \text{const}$ .

Transmitancje naciągu  $s_{17}(p)$  i przeciwności  $s_{18}(p)$  dla zmiany odstępów walców określają wzory (9.4) i (9.5).

Dla małych przyrostów zmiennych, w otoczeniu ustalonej wartości tych wielkości, równanie naciągu w funkcji wielkości nastawianych i zakłóceń można napisać:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\sigma}_2(p) = & s_{12}(p) \Delta \bar{\sigma}_1(p) + s_{13}(p) \Delta \bar{a}_{zw}(p) + \dots \\ & + s_{17}(p) \Delta \bar{S}_0(p) + \dots + s_i(p) \Delta \bar{x}_i(p) \end{aligned} \quad (4.9)$$

lub stosując zapis macierzowy:

$$\Delta \bar{\sigma}_2(p) = \|S_{N2}(p)\| \|\Delta \bar{x}_N(p)\| \quad (4.9a)$$

gdzie:

$\|\Delta \bar{x}_N(p)\|$  - macierz transmitancji przyrostów wielkości nastawianych napędu bębna nawijającego i zakłóceń naciągu.

#### 4.5. Wskaźnik regulacji grubości

Jako miarę jakości układu przyjęto wskaźnik regulacji grubości zdefiniowany wzorem:

$$q = \frac{(\Delta h_{2u}) \text{ z regulacją}}{(\Delta h_{2u}) \text{ bez regulacji}} \quad (4.10)$$

Wyrażenia otrzymane z tego wzoru, w ogólnym przypadku gdy rozpatruje się wiele zakłóceń, są nieprzejrzyste. Dlatego wprowadzono pojęcia wskaźnika regulacji grubości dla jednego zakłócenia. Np. wskaźnik regulacji dla zakłócenia spowodowanego odchyłką grubości metalu przed przepustem, przy nastawianym odstępnie walców, można przedstawić następująco:

$$q = \frac{(\Delta h_{2u}) \text{ z regulacją}}{z_{11} \Delta h_1} \quad \left| \Delta S_0 \neq 0 \right. \quad (4.11)$$

Do porównania układów regulacji przerywanej, posłużono się innym kryterium jakości, mianowicie długością metalu przewalcowaną w czasie potrzebnym do wyregulowania określonego błędu grubości.

## Rozdział II

### ANALIZA SYSTEMÓW REGULACJI GRUBOŚCI WALCAREK NAWROTNYCH

Ogólnie układy regulacji grubości można podzielić na: układy regulacji ciągłej, układy regulacji przerywanej.

Ze względu na sposób pomiaru wielkości regulowanej rozróżnia się: układy regulacji z pomiarem pośrednim, układy regulacji z pomiarem bezpośrednim.

Można także dokonać podziału wg sposobu oddziaływania na wielkość regulowaną. Istnieje możliwość regulacji grubości

przez nastawianie: odstępu walców, naciągu i przeciwności, prędkości walcowania.

### Możliwości regulacji grubości w procesie walcowania na zimno

Metal gorąco walcowany, przeznaczony do dalszego walcowania na zimno, ma wzdłuż swej długości, zarówno zmienną grubość jak i wytrzymałość plastyczną. W samym procesie walcowania na zimno, występują również zakłócenia powodujące dodatkowe błędy grubości [12, 37].

W procesie walcowania na zimno, mogą być stosowane wszystkie metody regulacji wymienione poprzednio. Jednakże zakres stosowania poszczególnych metod jest ograniczony ze względów technologicznych, które zostaną krótko omówione.

Regulacja grubości przez **n a s t a w i a n i e o d s t ę p u w a l c ó w** jest tym skuteczniejsza, im mniejsze jest sprężyste odkształcenie walcarki w stosunku do grubości walcowanego metalu. Warunki takie występują w pierwszych przepustach, w których grubość metalu jest duża, a metal jeszcze nie uległ umocnieniu. W miarę zmniejszania się grubości i ze wzrostem wytrzymałości plastycznej, wpływ nacisku walców maleje [10].

Natomiast regulacja **n a c i ą g i e m** (przeciwnością) [19, 30] jest tym skuteczniejsza, im większa jest zmiana nacisku walców spowodowana naciągiem i im sprężystsza jest klatka, jak to wynika z (1.24) i (1.25). Ma to miejsce na ogół w ostatnich przepustach, a więc przy stosunkowo cienkim i umocnionym metalu. W przypadku idealnie sztywnej walcarki regulacja naciągiem nie byłaby możliwa, ponieważ zmiana nacisku walców nie powodowałaby zmiany odstępu walców [10].

Przy małych prędkościach walcowania potrzebna jest duża zmiana naciągu do wyregulowania błędów grubości. Podczas walcowania nawrotnego, w pierwszych przepustach, decydującą rolę odgrywa zatem regulacja grubości przez nastawienie odstępu walców, a następnie w miarę zmniejszania grubości, dominuje rola naciągu. Z [3] wynika, że wpływ naciągu na grubość jest odwrotnie proporcjonalny do  $h_2^2$ .

Jak wynika z wzoru (1.12) o skuteczności naciągów decydują naprężenia rozciągające, które muszą być mniejsze od granicy plastyczności metalu przed względnie po przepuszczeniu.

Przy walcowaniu folii [38] wykorzystuje się wpływ prędkości walcowania na grubość. Ze wzrostem prędkości walcowania, przy niezmiennym odstępie walców, grubość maleje. Efekt ten jest tym większy im cieńsza jest folia.

Regulacja grubości w szerokim zakresie, jest możliwa przy zastosowaniu co najmniej 2 systemów regulacji [40, 41]. Celem jest stosowanie złożonej regulacji grubości, dwoma metodami, z jednoczesnym wykorzystaniem sygnału z jednego układu pomiarowego grubości [42]. Przy małych błędach grubości, działa układ regulacji naciągiem (przeciwnaciągiem) lub prędkością walcowania.

W układach regulacji grubości na gorąco stosuje się tylko odstęp walców, jako wielkość nastawianą, w połączeniu z pośrednim lub bezpośrednim pomiarem grubości [6, 15].

## 5. Regulacja grubości przez nastawianie naciągów

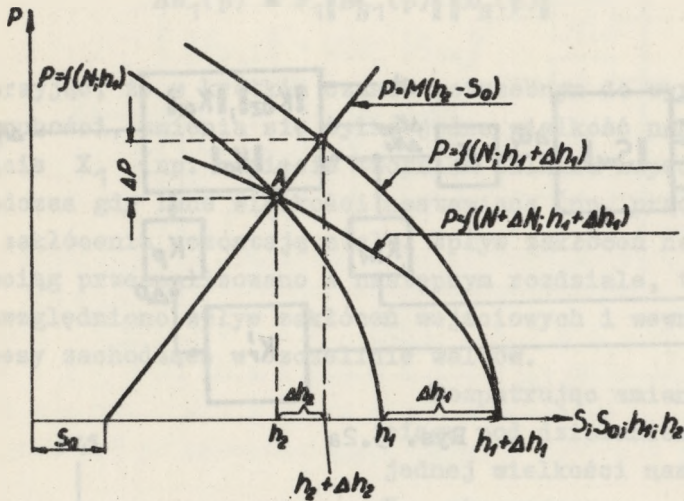
### 5.1. Zasada regulacji

Jeżeli w czasie walcowania odstęp walców nie będzie nastawiany tzn.  $\Delta S_0 = 0$ , wówczas z równania (1.16) otrzymuje się:

$$\Delta P = M \Delta h_2 \Big|_{\Delta S_0 = 0} \quad (5.1)$$

Skąd wynika, że utrzymując stały nacisk walców ( $\Delta P = 0$ ) można otrzymać stałą grubość metalu po przepuszczeniu. Zakłócenia wejściowe i wewnętrzne procesu wpływają na grubość metalu po przepuszczeniu przez zmiany nacisku walców. Wpływ tych zakłóceń na nacisk walców wyraża równanie (1.17). Z analizy tego równania wynika możliwość utrzymania stałej wartości nacisku walców przez nastawianie naciągu lub przeciwnaciągu. Regulacja przez nastawianie przeciwnaciągu jest skuteczniejsza (patrz 1.4.3) i korzystniejsza ze względów ruchowych, ponieważ stały naciąg

zapewnia dobre układanie zwojów na bębnie nawijającym. Jeżeli wielkością nastawianą jest przeciwciąg, wówczas jego zmiany powinny przeciwdziałać zmianom nacisku walców wywołanym pozostałymi zmiennymi (zakłóceniami) równania (1.17).



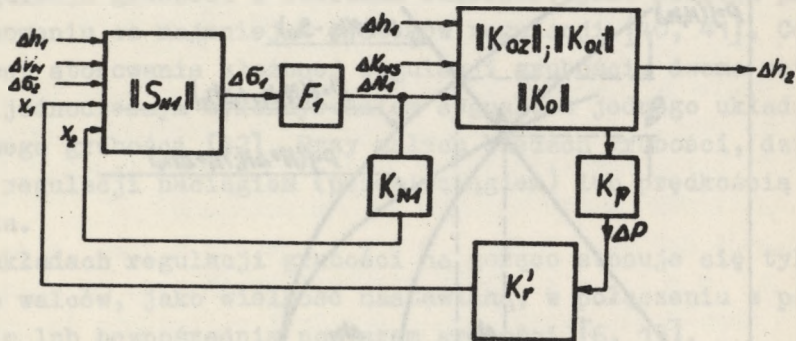
Rys. 5.1

Tę zasadę regulacji, w przypadku zakłócenia w postaci zmiennej grubości wejściowej, przedstawia wykres w układzie współrzędnych  $P, h$  na rys. 5.1. Na tym rysunku grubości wejściowej  $h_1$  i naciągowi  $N$  odpowiada charakterystyka plastycznego odkształcenia metalu przecinającą charakterystykę walcarki w punkcie  $A$ , o odciętej  $h_2$ . Wzrost grubości wejściowej metalu o  $\Delta h_1$  powoduje błąd grubości  $\Delta h_2$ . Aby uzyskać poprzednią grubość należy zwiększyć naciąg o  $\Delta N$ , wskutek czego uzyskuje się nową charakterystykę metalu, przechodzącą przez punkt  $A$ .

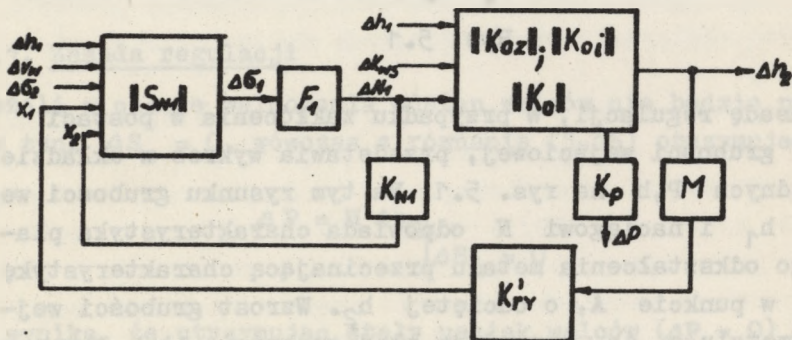
## 5.2. Regulacja przeciwciągiem w funkcji nacisku walców

Schemat blokowy układu regulacji przedstawia rys. 5.2a. Celem wyregulowania błędu grubości należy nastawiać przeciwciąg wg zależności:

$$\Delta \bar{N}_1(p) = f[\Delta \bar{P}(p)] \quad (5.2a)$$



Rys. 5.2a



Rys. 5.2b

Jak wynika z (5.1)  $\Delta P$  jest proporcjonalne do błędu grubości. Zatem do analizy układu regulacji posłużono się zależnością:

$$\Delta \bar{N}_1(p) = f[M \Delta \bar{h}_2(p)] \Big|_{M=\text{const.}} \quad (5.2b)$$

Temu równaniu przeciwności odpowiada układ regulacji podany na rys. 5.2b.

Równanie przeciwności można teraz napisać, analogicznie do (4.9a):

$$\Delta \bar{N}_1(p) = F_1 \| S_{N1}(p) \| \| \bar{X}_N(p) \| \quad (5.2c)$$

Można przyjąć, że w krótkim czasie potrzebnym do wyregulowania błędu grubości, zmienia się tylko jedna wielkość nastawiana, mianowicie  $X_1$  (np. napięcie twornika silnika napędowego bębna), podczas gdy inne wielkości nastawiana (np. prąd wzbudzenia) i zakłócenia pozostają stałe. Wpływ zakłóceń na naciąg i przeciwności przeanalizowano w następnym rozdziale, tu natomiast uwzględniono wpływ zakłóceń wejściowych i wewnętrznych na procesy zachodzące w szczelnie walców.

Rozpatrując zmiany przeciwności pod działaniem tylko jednej wielkości nastawianej  $X_1$ , otrzymano:

$$\Delta \bar{N}_1(p) = M R_{11}(p) \Delta h_2(p) \quad (5.2d)$$

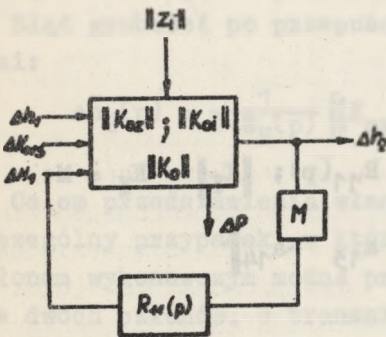
gdzie:

$$R_{11}(p) = F_1 s_{N1}(p) K'_{TY}(p)$$

Dla konkretnego układu w miejsce  $s_{N1}(p)$  należy podstawić

jedną z transmitancji podanych w punkcie 4.4.2, a w miejsce  $K'_{TY}(p)$  transmitancję regulatora. Uproszczony schemat blokowy, odpowiadający równaniu (5.2d) przedstawia rys. 5.3a.

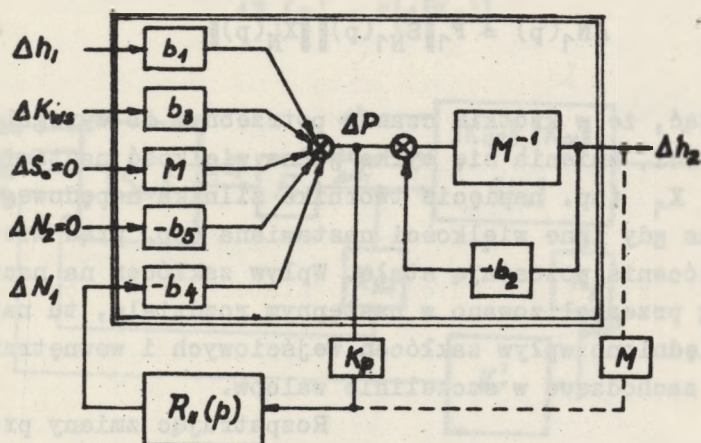
Na rys. 5.3b przedstawiono schemat układu regulacji z uwzględnieniem struktury szczeliny walców (por. rys. 1.4a). Linia kreskowaną zaznaczono obwód przyjęty do analizy układu regulacji (por. (5.2b) oraz rys. 5.2b).



Rys. 5.3a

Transmitancje walcarki dla zakłóceń otrzymuje się podstawiając do (4.6a) i (4.6b) następujące wyrażenia:

$$\|K_{Oz}\|; \|Z\| - \text{jak we wzorze (4.2)}$$



Rys. 5.3b

natomiast

$$\|K_o\| = K_o = a_{11}; \|K_{rY}(p)\| = K_{rY}(p) = R_{11}(p); \|K_Y\| = K_Y = M;$$

$$\|K_i\| = 0; \|Y_p\| = 0; \|K_{oi}\| = \begin{bmatrix} -a_{12} & a_{13} & -a_{14} \end{bmatrix}$$

$$\|\bar{Z}_i(p)\| = \begin{bmatrix} \Delta\bar{N}_2(p) \\ \Delta\bar{w}(p) \\ \Delta\bar{v}_w(p) \end{bmatrix}$$

Transmitancje walcarki:

$$\|K_{Wz}(p)\| = \frac{1}{1+W_N(p)} \|K_{Oz}\| \quad (5.3a)$$

$$\|K_{Wi}(p)\| = \frac{1}{1+W_N(p)} \|K_{oi}\| \quad (5.3b)$$



gdzie:

$$W_N(p) = a_{11} M R_{11}(p) \quad (5.4a)$$

jest transmitancją obwodu regulacji przeciwnością.  
Dla stanu ustalonego równanie (5.3a) można zapisać:

$$\|K_{Wzu}\| = \frac{1}{1+W_N} \|K_{Oz}\|$$

gdzie:

$$W_N = W_N(0) = a_{11} M r_{11} \quad (5.4b)$$

$r_{11}$  - współczynnik wzmocnienia regulatora wraz z członem wykonawczym.

$W_N$  nazwano elektromechanicznym współczynnikiem wzmocnienia obwodu regulacji przeciwnością.

Błąd grubości po przepuszczeniu obliczony z równania (4.7) wynosi:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \frac{1}{1+W_N(p)} \left[ \|K_{Oz}\| \|Z(p)\| + \|K_{O1}\| \|Z_1(p)\| \right] \quad (5.5)$$

Celem przedstawienia własności dynamicznych, rozpatrzono szczególny przypadek, w którym regulator przeciwności wraz z członem wykonawczym można przedstawić jako szeregową połączenie dwóch członów, o transmitancjach [43, 44]:

$$\frac{k_N}{1+pT_N} \exp[-\tau_N p] \text{ oraz } k_{11}$$

Uwzględniając, że  $\tau_N \ll T_N$  transmitancję regulatora przeciwności można napisać w postaci:

$$R_{11}(p) = \frac{\Delta \bar{N}_1(p)}{\Delta \bar{h}_2(p)} \cong \frac{k_N k_{11}}{1+p(T_N+2\tau_N)} = \frac{r_{11}}{1+pT_0} \quad (5.6)$$

$$\text{gdzie: } r_{11} = k_N k_{11}; \quad T_0 = T_N + 2\tau_N \quad (5.7)$$

Po podstawieniu (5.6) do (5.5) i pomnożeniu macierzy otrzymano wyrażenie dla błędu grubości w układzie zamkniętym:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \frac{1/T_0 + p}{(1+W_N)/T_0 + p} \left[ z_{11} \Delta \bar{h}_1(p) + z_{12} \Delta \bar{K}_{ws}(p) - a_{12} \Delta \bar{N}_2(p) + a_{13} \Delta \bar{w}(p) - a_{14} \Delta \bar{v}_w(p) \right] \quad (5.8)$$

W równaniu (5.8) pierwsze dwa składniki wyrażają wpływ zakłóceń wejściowych, a następne wpływ zakłóceń wewnętrznych procesu. Zmiany naciągu i prędkości walcowania, od wartości nastawionych, stanowią zakłócenia powodujące błąd grubości. Również zmiana odstępów walców spowodowana ich spłaszczeniem, ugięciem i ekscentrycznością, stanowi zakłócenie. Wpływ tego zakłócenia na grubość uwzględnia człon  $a_{13} \Delta \bar{w}(p)$ . Postać czasową równania (5.8), dla skoku zakłócenia wejściowego z uwzględnieniem definicji (4.3), wyraża równanie:

$$\Delta h_2(t) = \frac{1}{1+W_N} \left\{ 1+W_N \exp \left[ -(1+W_N) \frac{t}{T_0} \right] \Delta h_{2z} \mathbf{1}(t) \right. \quad (5.9)$$

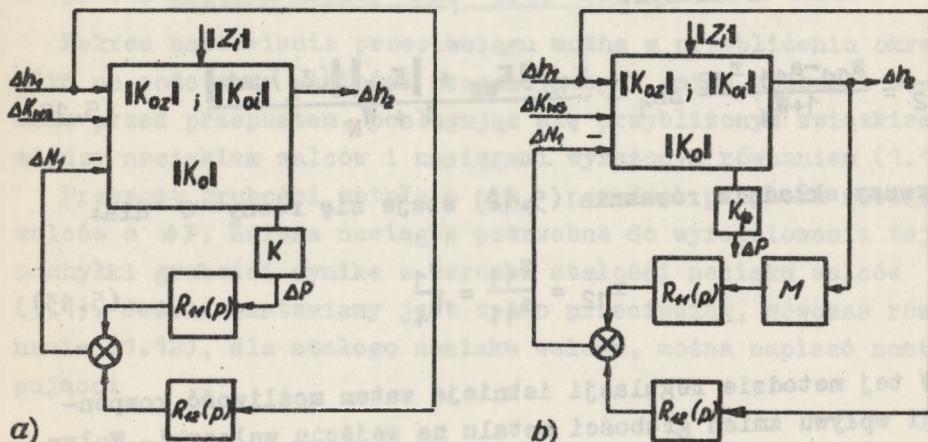
dla:  $\Delta N_2 = 0$ ;  $\Delta v_w = 0$ ;  $\Delta w = 0$ ;

Przebieg stanu nieustalonego zależy od współczynnika wzmocnienia elektromechanicznego, tzn. od iloczynu transmitancji szczeliny walców przy nastawianym naciągu, współczynnika sprężystości walcarki, wzmocnienia w obwodzie regulacji przeciwciąganiem oraz od stałej czasowej  $T_0$ . W [45] podano wykresy transmitancji walcarki w stanie ustalonym i wskazówki odnośnie doboru  $M$ .

### 5.3. Regulacja przeciwciąganiem z kompensacją zakłócenia $\Delta h_1$

Omówiony w 5.2 układ regulacji grubości, w funkcji nacisku walców, uzupełniono obwodem kompensacji zakłócenia wejściowego  $\Delta h_1$ . Uproszczony schemat blokowy nowego układu regulacji podano na rys. 5.4a. Dla uproszczenia dalszych rozważań założono, że pomiar  $\Delta h_1$  odbywa się tak blisko szczeliny walców, że opóźnienie transportowe jest pomijalne. Kompensacji  $\Delta K_{ws}$  nie

rozpatruje się ze względu na trudności pomiarowe tego zakłócenia. Podobnie jak w poprzednim punkcie, uwzględniając zależność (5.1), do analizy teoretycznej posłużono się uprosz-



Rys. 5.4

czonym schematem blokowym przedstawionym na rys. 5.4b. Zgodnie z tym schematem przeciwciąg jest funkcją zmierzonego zakłócenia wejściowego  $\Delta h_1$  i błędu grubości  $\Delta h_2$ :

$$\Delta \bar{N}_1(p) = R_{12}(p) \Delta \bar{h}_1(p) + R_{11}(p) M \Delta \bar{h}_2(p) \quad (5.10)$$

Równanie błędu regulacji otrzymuje się podstawiając do (4.7) wyrażenia jak w punkcie 5.2 oraz:

$$\|K_I(p)\| = K_I(p) = R_{12}(p); \quad \|K_Z\| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$\|K_{O1}\|$  - macierz prostokątna wierszowa stopnia  $1 \times n$ ;

$\|\bar{Z}_1(p)\|$  - macierz prostokątna kolumnowa stopnia  $n \times 1$ .

(Iloczyn  $\|K_{O1}\| \|\bar{Z}_1\|$  wyraża się po wykonaniu działań wielomianem).

Po podstawieniu:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \frac{z_{11} - a_{11} R_{12}(p)}{1 + W_N(p)} \Delta \bar{h}_1(p) + \frac{z_{12} \Delta \bar{K}_{ws}(p) + \|K_{oi}\| \|\bar{Z}_i(p)\|}{1 + W_N(p)} \quad (5.11)$$

lub w stanie ustalonym:

$$\Delta h_2 = \frac{z_{11} - a_{11} r_{12}}{1 + W_N} \Delta h_1 + \frac{z_{12} \Delta K_{ws} + \|K_{oi}\| \|(Z_i)_{ust}\|}{1 + W_N} \quad (5.12)$$

Pierwszy składnik równania (5.12) staje się równy 0 dla:

$$r_{12} = \frac{z_{11}}{a_{11}} = \frac{b_1}{b_4} \quad (5.13)$$

W tej metodzie regulacji istnieje zatem możliwość kompensacji wpływu zmian grubości metalu na wejściu walcarki. Wpływ innych zakłóceń na błąd regulacji, pozostaje niezmienny. Kompensacja jest możliwa wówczas gdy znane są parametry technologiczne metalu, które zmieniają się od przepustu do przepustu. Jeżeli  $r_{12}$  różni się od swej optymalnej wartości określonej równaniem (5.13)  $d$ -krotnie, wówczas wskaźnik regulacji dla ustalonej wejściowej odchyłki grubości metalu wynosi:

$$q = \frac{\Delta h_2 \text{ ust}}{z_{11} \Delta h_1} = \frac{1 - d}{1 + W_N} \quad (5.14)$$

Przy optymalnym wzmocnieniu ( $d = 1$ ), ustalony błąd regulacji spowodowany zmienną grubością na wejściu walcarki, jest równy 0. W innych przypadkach ( $d \neq 1$ ), ustalony błąd regulacji zależy od stopnia skompensowania zakłócenia i od elektromechanicznego współczynnika wzmocnienia.

W [45] podano wykresy błędu grubości dla różnego stopnia skompensowania zakłócenia wejściowego i opisano sposób auto-

matycznego nastawiania współczynnika wzmocnienia na podstawie funkcji korelacyjnej.

#### 5.4. Zakres nastawiania przeciwciągu

##### 5.4.1. Związek między $\Delta N_1$ oraz $\Delta h_1$

Zakres nastawiania przeciwciągu można w przybliżeniu określić na podstawie wartości przewidywanych zmian grubości metalu przed przepustem, posługując się przybliżonym związkiem między naciskiem walców i naciągami wyrażonym równaniem (1.12).

Przyrost grubości metalu o  $\Delta h_1$  powoduje przyrost nacisku walców o  $\Delta P$ . Zmiana naciągów potrzebna do wyregulowania tej odchyłki grubości wynika z warunku stałości nacisku walców (5.1). Jeżeli nastawiany jest tylko przeciwciąg, wówczas równanie (1.12), dla stałego nacisku walców, można napisać następująco:

$$P_N = P \left[ 1 - \frac{\sigma_1(1-m) + \sigma_2^m}{\eta K_{fs}} \right] = (P + \Delta P) \left[ 1 - \frac{(\sigma_1 + \Delta \sigma_1)(1-m) + \sigma_2^m}{\eta K_{fs}} \right]$$

dla  $N_2 = \text{const.}$

a stąd:

$$\frac{\Delta P}{\Delta \sigma_1} = \frac{P}{\frac{\eta K_{fs}}{1-m} \left[ 1 - \frac{\sigma_1(1-m) + \sigma_2^m}{\eta K_{fs}} \right]} \quad (1.15)$$

Uwzględniając, że  $\Delta P = b_1 \Delta h_1$  oraz  $\Delta N_1 = \Delta \sigma_1 F_1$

otrzymano:

$$\frac{\Delta N_1}{\Delta h_1} = \frac{b_1 \eta K_{fs} F_1}{P(1-m)} \left[ 1 - \frac{\sigma_1(1-m) + \sigma_2^m}{\eta K_{fs}} \right] \quad (5.16)$$

We wzorze (5.15) uwzględniono tylko zmiany grubości metalu na wejściu walcarki. Należy się liczyć z błędami spowodowanymi pominięciem zmian twardości i szerokości taśmy, tarcia

i prędkości walcowania. Szczególnie wpływ zmian prędkości przy rozruchu i hamowaniu może znacznie przekroczyć wpływ zmian grubości metalu przed przepustem.

Zakres regulacji potrzebny do skompensowania wpływu zmian prędkości walcowania może przekroczyć zakres dopuszczalnych zmian naciągu. Stosowanie dużych naciągów powoduje trudności przy zdejmowaniu kręgów i żarzeniu, a ponadto podraża koszt walcarki. W tych przypadkach konieczne jest stosowanie regulacji przez nastawianie walców.

#### 5.4.2. Związek między $\Delta N_1$ oraz $\Delta h_2$

Wartość zmiany przeciwności potrzebnej do zniesienia błędu grubości  $\Delta h_2$  otrzymano podstawiając w równaniu (5.15)  $\Delta P$  wyrażone zależnością (5.1).

$$\frac{\Delta N_1}{\Delta h_2} = \frac{M\eta K_{fs} F_1}{P(1-m)} \left[ 1 - \frac{\sigma_1(1-m) + \sigma_2 m}{\eta K_{fs}} \right] \quad (5.17)$$

Skuteczność regulacji grubości naciągiem i przeciwnością zależy między innymi od sztywności walcarki. Im sztywniejsza jest walcarka, tym większe są zmiany naciągu lub przeciwności potrzebne do wyregulowania jednakowego błędu grubości.

### 6. Regulacja grubości przez nastawianie walców

#### 6.1. Regulacja w funkcji $\Delta h_2$

Jeżeli pomiar  $\Delta h_2$  odbywa się w płaszczyźnie wyjściowej metalu z walców lub jeżeli opóźnienie transportowe można pominąć, wówczas równanie zmian odstępu walców można przedstawić:

w przypadku napędu o nastawianej prędkości

$$-\Delta \bar{S}_0(p) = R_{13}(p) \Delta \bar{h}_2(p) \quad (6.1)$$

lub w przypadku napędu o nienastawianej prędkości

$$-\Delta \bar{S}_0(p) = R_{13}(p) \text{sign } \Delta h_2 \quad (6.2)$$

Na podstawie [46, 56] przyjęto transmitancję regulatora z członem wykonawczym:

$$R_{13}(p) \cong \frac{k_{13}}{p(1+pT_0)} \quad (6.3)$$

Wychodząc z równań (4.5) i (4.11), wyprowadzono dla napędu nastawy walców, o nastawianej prędkości, transmitancję zamkniętego obwodu regulacji grubości:

$$K_z(p) = \frac{\Delta \bar{h}_2(p)}{\Delta h_{2z}(p)} = \frac{1}{1+a_{13}R_{13}(p)} \quad (6.4)$$

W przypadku napędu o nienastawianej prędkości obrotowej:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \Delta \bar{h}_{2z}(p) - a_{13}R_{13}(p) \text{sign } \Delta h_2 \quad (6.5)$$

Dla skoku zakłócenia wejściowego  $\Delta h_{2z} \mathbf{1}(t) = z_{11} \Delta h_1 \mathbf{1}(t) + z_{12} \Delta K_{ws} \mathbf{1}(t)$  obliczono:

$$\Delta h_2(t) = \Delta h_{2z} \mathbf{1}(t) - a_{13}k_{13} \left\{ t - T_0 \left[ 1 - \exp(-t/T_0) \right] \text{sign } \Delta h_2 \right\} \quad (6.6)$$

Stąd można obliczyć czas włączenia napędu, konieczny do wyregulowania błędu grubości:

$$t_z \cong \frac{\Delta h_{2z}}{a_{13}k_{13}} + T_0 \quad (6.7)$$

Dokładniejszy sposób obliczania  $t_z$ , podano w 7.2. Czas włączenia napędu śrub nastawczych jest zatem zależny od wartości zakłóceń na wejściu, od transmitancji szczeliny walców dla

zmiany odstępu walców i od współczynnika  $k_{13}$ , którego wartość zależy m.in. od wzmocnienia, prędkości obrotowej silnika napędowego i przełożenia mechanizmu nastawiania walców. Napęd śrub jest włączony tak długo, aż błąd zmaleje do 0 lub do wartości równej nastawionej strefie nieczułości regulatora.

## 6.2. Kompensacja zakłócenia $\Delta h_1$

Jeżeli  $\Delta h_1$  oznacza odchyłkę grubości w płaszczyźnie wejściowej metalu do walców, wówczas do zniesienia błędu grubości, spowodowanego tą odchyłką, potrzebna jest zmiana odstępu walców:

$$-\Delta S_0 = C_1 \Delta h_1 \quad (6.8)$$

Uwzględniając (6.8) ustalony błąd grubości można przedstawić:

$$\Delta h_2 = (z_{11} - a_{13} C_1) \Delta h_1 + z_{12} \Delta K_{ws} + \|K_{oi}\| \|Z_i\| \quad (6.9)$$

gdzie:

$\|K_{oi}\|$  - macierz prostokątna wierszowa stopnia 1 x n,

$\|Z_i\|$  - macierz prostokątna kolumnowa stopnia n x 1.

Wejściowa odchyłka grubości będzie skompensowana jeżeli:

$$C_1 = \frac{z_{11}}{a_{13}} = \frac{b_1}{M} \quad (6.10)$$

Równanie (6.8) można wtedy napisać:

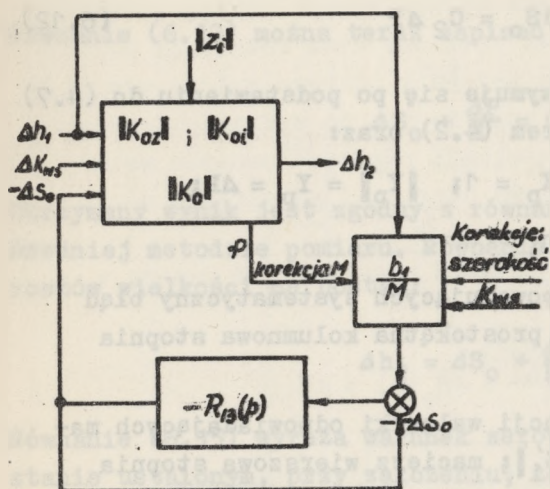
$$\Delta S_0 + \frac{b_1}{M} \Delta h_1 = 0 \quad (6.11)$$

Układ regulacji spełniający warunek (6.11) podany jest na rys. 6.1. Metoda ta posiada ograniczone praktyczne zastosowanie, ponieważ umożliwia kompensację tylko jednego, chociaż najważniejszego zakłócenia, mianowicie zmian grubości metalu przed przepustem. Nie uwzględnia się i nie wykrywa zmian opo-



ru odkształcenia, zmian tarcia w szczelinie walców (np. wskutek zmiany prędkości walcowania), ani zakłóceń spowodowanych wpływami termicznymi.

Istotną zaletą metody jest możliwość wykrywania zakłóceń i przeciwdziałania im, zanim spowodują one błąd grubości. Celem wyregulowania także innych zakłóceń, należy ten system regulacji połączyć z metodą regulacji w funkcji  $\Delta h_2$ , podobnie jak to opisano w punkcie 5.3. Pomiar odchyłki grubości na wejściu walcarki umożliwia regulację z predykcją,



Rys. 6.1

uwzględniającą czas odpowiedzi napędu nastawiania [57].

Wskutek zależności błędu grubości od warunków walcowania  $[b_1/M = f(\rho K_{ws}, P, b_s)]$ , zmieniających się od przepustu do przepustu, konieczne jest wprowadzenie do układu regulacji korekcji uwzględniającej nacisk walców, szerokość taśmy i średni opór odkształcenia [47, 48]. Wprowadzenie sprzężenia zwrotnego nie zapewnia z tych samych przyczyn, takich korzyści jak przy regulacji w funkcji  $\Delta P$  (por. punkt następny). Dokładność regulacji można poprawić przez wprowadzenie okresowych korekcji współczynnika wzmocnienia w obwodzie kompensacji [45].

### 6.3. Regulacja grubości w funkcji $\Delta P$

Analogicznie do regulacji przeciwciągiem (por. 5.2), istnieje możliwość regulacji grubości przez nastawianie odstępu walców w funkcji zmiany nacisku walców.

Niech zmiana odstępu walców będzie proporcjonalna do zmierzzonej zmiany nacisku walców, od stanu w którym błąd grubości był równy 0. Równanie ustalonego przyrostu odstępu walców ma postać:

$$-\Delta S_0 = C_2 \Delta P \quad (6.12)$$

Równanie błędu grubości otrzymuje się po podstawieniu do (4.7) macierzy zdefiniowanych wzorem (4.2) oraz:

$$\|K_R\| = K_R = C_2; \quad \|K_p\| = K_p = 1; \quad \|Y_p\| = Y_p = \Delta P;$$

$$\|K_Z\| = 0; \quad \|K_i\| = 0;$$

$\|Z'_i\|$  - macierz zakłóceń powodujących systematyczny błąd grubości; macierz prostokątna kolumnowa stopnia  $n \times 1$ ;

$\|K'_{oi}\|$  - macierz transmitancji walcarki odpowiadających macierzy zakłóceń  $\|Z'_i\|$ ; macierz wierszowa stopnia  $1 \times n$ .

Wówczas równanie ustalonego błędu grubości:

$$\Delta h_2 = \|K_{oz}\| \|Z\| + \|K_{oi}\| \|Z_i\| + \|K'_{oi}\| \|Z'_i\| - a_{13} C_2 \Delta P \quad (6.13)$$

Wyrażając  $\Delta P$  przy pomocy zależności (1.18), po przekształceniach, otrzymuje się:

$$\begin{aligned} \Delta h_2 = & \frac{z_{11} - a_{13} b_1 C_2}{1 + W_p} \Delta h_1 + \frac{z_{12} - a_{13} b_3 C_2}{1 + W_p} \Delta K_{ws} - \frac{a_{11} - a_{13} b_4 C_2}{1 + W_p} \Delta N_1 - \\ & - \frac{a_{12} - a_{13} b_5 C_2}{1 + W_p} \Delta N_2 - \frac{a_{14} - a_{13} b_6 C_2}{1 + W_p} \Delta v_w + \frac{\|K'_{oi}\| \|Z'_i\|}{1 + W_p} \end{aligned} \quad (6.14)$$

gdzie:  $W_p = -a_{13} b_2 C_2$

Liczniki współczynników równania (6.14) zawierające  $C_2$  stają się równe 0 dla:

$$C_2 = \frac{1}{M}$$

Równanie (6.12) można teraz zapisać

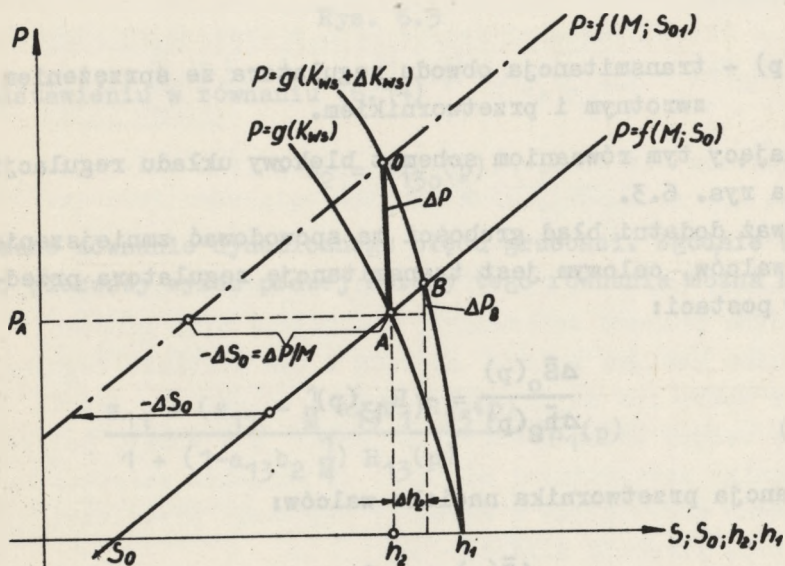
$$\Delta S_0 + \frac{\Delta P}{M} = 0 \quad (6.15)$$

Otrzymany wynik jest zgodny z równaniem błędu grubości w pośredniej metodzie pomiaru. Równanie (3.2) napisane dla przyrostów wielkości ma postać:

$$\Delta h_2 = \Delta S_0 + \frac{\Delta P}{M} \quad (3.2a)$$

Równanie (6.15) wyraża warunek zerowego błędu grubości, w stanie ustalonym, przy założeniu, że  $M = \text{const}$ .

Objaśnienie graficzne otrzymanego wyniku przedstawiono na rys. 6.2. Na wykresie, znamionowym warunkom walcowania odpo-



Rys. 6.2

wiada punkt A. W wyniku zakłócenia, np. wzrostu oporu odkształcenia walcowanego metalu, punkt równowagi sił przesuwa się do B, przy czym występuje błąd grubości  $\Delta h_2$ , a nacisk walców wzrasta o wartość  $\Delta P_B$ . Z wykresu wynika, że dla zniesienia tego błędu grubości, należy zmniejszyć odstęp walców o taką wartość, aby uzyskać nowy ustalony stan równowagi sił, w punkcie D. Przyrosty nacisku walców i odstępu walców odpowiadające ustalonemu stanowi, w punkcie D na wykresie, spełniają warunek (6.15). Podczas regulacji przyrost nacisku walców zmienia się od wartości  $\Delta P_B$  do nieznannej początkowo wartości  $\Delta P$ .

Równanie błędu regulacji w stanie nieustalonym wynika z (3.2a):

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \Delta \bar{S}_0(p) + \frac{\Delta P(p)}{M} = \Delta \bar{S}_0(p) + \Delta \bar{S}(p)$$

Równanie zmiany odstępu walców w stanie nieustalonym:

$$-\Delta \bar{S}_0(p) = \Delta \bar{P}(p) R_{130}(p)$$

gdzie:

$R_{130}(p)$  - transmitancja obwodu regulatora ze sprzężeniem zwrotnym i przetwornikiem.

Odpowiadający tym równaniom schemat blokowy układu regulacji podano na rys. 6.3.

Ponieważ dodatni błąd grubości ma spowodować zmniejszenie odstępu walców, celowym jest transmitancję regulatora przedstawić w postaci:

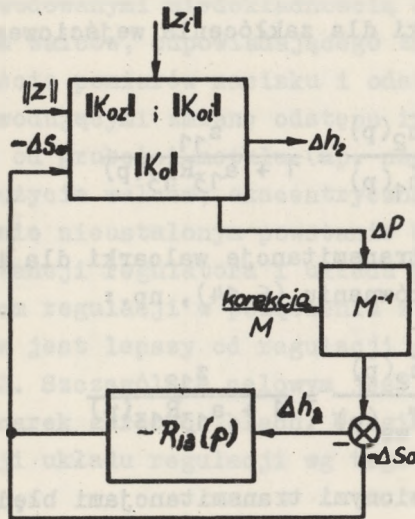
$$\frac{\Delta \bar{S}_0(p)}{\Delta \bar{h}_2(p)} = -R_{13}(p)$$

Transmitancja przetwornika nacisku walców:

$$\frac{\Delta \bar{S}(p)}{\Delta \bar{P}(p)} = M^{-1}$$

Transmitancja obwodu regulatora ze sprzężeniem zwrotnym:

$$R_{130}(p) = \frac{\Delta \bar{S}_0(p)}{\Delta \bar{P}(p)} = -\frac{1}{M} \frac{R_{13}(p)}{1+R_{13}(p)} \quad (6.16)$$



Rys. 6.3

Po podstawieniu w równaniu (6.14)

$$-C_2 = R_{130}(p)$$

otrzymano równanie dynamicznego błędu grubości. Zgodnie z (6.14) pierwszy wyraz prawej strony tego równania można napisać:

$$\frac{z_{11} + (z_{11} - \frac{1}{M} a_{13} b_1) R_{13}(p)}{1 + (1 - a_{13} b_2 \frac{1}{M}) R_{13}(p)} \Delta \bar{h}_1(p) \quad (6.17)$$

Posługując się wzorami definicyjnymi (1.19) i (1.21) stwierdzono, że:

$$z_{11} - \frac{a_{13}b_1}{M} = 0 \quad \text{oraz} \quad 1 - \frac{a_{13}b_2}{M} = a_{13} \quad (6.18)$$

Transmitancję walcarki dla zakłócenia wejściowego można teraz napisać:

$$\frac{\Delta \bar{h}_2(p)}{\Delta \bar{h}_1(p)} = \frac{z_{11}}{1 + a_{13}R_{13}(p)}$$

Podobnie wyraża się transmitancje walcarki dla innych zakłóceń występujących w równaniu (6.14), np.:

$$\frac{\Delta \bar{h}_2(p)}{\Delta \bar{K}_{ws}(p)} = \frac{z_{12}}{1 + a_{13}R_{13}(p)}$$

Posługując się znalezionymi transmitancjami błędu grubości można wyrazić:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{h}_2(p) = & \frac{1}{1 + a_{13}R_{13}(p)} (|K_{oz}| |Z| + |K_{oi}| |Z_i|) + \\ & + \frac{1 + R_{13}(p)}{a_{13} + R_{13}(p)} |K'_{oi}| |Z'_i| \end{aligned} \quad (6.19)$$

Z równania (6.14) i (6.19) wynika, że zakłócenia wejściowe i wewnętrzne procesu walcowania, powodujące błąd grubości przez zmianę nacisku walców, zostaną w tym systemie regulacji wykryte i wpływ ich na grubość zostanie zniesiony, jeżeli spełniony będzie warunek (6.15) i jeżeli  $M = \text{const}$ . Zależność współczynnika sprężystości walcarki od warunków walcowania, uwzględniono przewidując w układzie regulacji przedstawionym na rys. 6.3, korekcję wartości  $M$ .

Przy realizacji tego sposobu regulacji, należy się liczyć z systematycznym błędem grubości spowodowanym następującymi czynnikami:

- zmiennością współczynnika sprężystości walcarki (np. wskutek zmian szerokości walcowanego metalu);
- błędami spowodowanymi niedokładnością obliczeń znamionowego nacisku walców, odpowiadającego żądanej grubości i niedokładnością pomiarów nacisku i odstępu walców;
- wpływami powodującymi zmianę odstępu i nacisku walców, niezależnie od grubości metalu (np. nagrzewanie stojaka i walców, zużycie walców, ekscentryczność walców).

Ponadto w stanie nieustalonym powstanie błąd grubości zależny od transmitancji regulatora i układu pomiarowego  $\Delta P$  i  $\Delta S_0$ . Ten system regulacji w połączeniu z hydraulicznym nastawianiem walców jest lepszy od regulacji naciągami, opisaną w punkcie 5.2. Szczególnie celowym jest zastosowanie tej regulacji do walcarek gorących blach. Uwagi dotyczące praktycznej realizacji układu regulacji wg tego systemu podano w [45].

## 7. Regulacja obiektu z opóźnieniem transportowym

### 7.1. Uwagi ogólne

Ponieważ pośrednie metody pomiaru grubości nie umożliwiają pomiaru wartości bezwzględnych, a także dlatego że ich realizacja jest zbyt kosztowna, najczęściej walcarki zimnej blachy są wyposażone w mierniki grubości lub odchyłek grubości o działaniu bezpośrednim [11, 32, 39, 41, 42, 47]. Wskutek tego pomiar grubości następuje dopiero z opóźnieniem transportowym, wynikającym z rozdzielenia miejsca nastawiania i pomiaru. Opóźnienie transportowe zależy od zmiennej prędkości walcowania (patrz 3.1).

W przeanalizowanych poprzednio układach regulacji, przebieg prędkości nastawiania  $v_s$ , w funkcji czasu lub w funkcji  $\Delta S_0$ , nie odgrywał istotnego znaczenia. Natomiast, w przypadku układów regulacji rozpatrywanych w tym rozdziale, konieczna jest

znajomość przebiegu prędkości w funkcji czasu. Przebieg prędkości zależy od nacisku walców, kierunku ruchu śrub nastawczych i ich zużycia [48, 49]. Znając przebieg prędkości obrotowej silnika napędowego w czasie można wyeliminować pomiar odstępu walców, wprowadzając jako wielkość zadaną czas włączenia napędu. Do realizacji tego sposobu, potrzebna jest znajomość zależności funkcyjnej, między czasem włączenia napędu, a odpowiadającą mu zmianą odstępu walców.

Obiekty z opóźnieniem transportowym wielkości regulowanej, mogą być wyposażone w układy regulacji ciągłej [50] lub przerywanej [32, 40, 41, 42, 47]. Stosowanie w przypadku układów o regulacji przerywanej, dotychczasowego wyrażania skuteczności działania regulacyjnego, w stosunku do zakłóceń, przy pomocy wskaźnika regulacji (patrz 4.5), natrafia na trudności spowodowane nieliniowościami w regulatorze typu przekaźnikowego.

Rozważane w dalszej części tego rozdziału sposoby regulacji różnią się przede wszystkim czasem potrzebnym do wyregulowania błędu grubości. Dlatego, jako wielkość porównawczą, przyjęto długość metalu przewalcowaną w czasie od stwierdzenia błędu grubości, do jego wyregulowania. Porównanie takie należy przeprowadzić dla znamionowej i dla obniżonej prędkości walcowania, przy której walcuje się końce blachy i spawy, ponieważ w tych miejscach występują najczęściej odchyłki grubości.

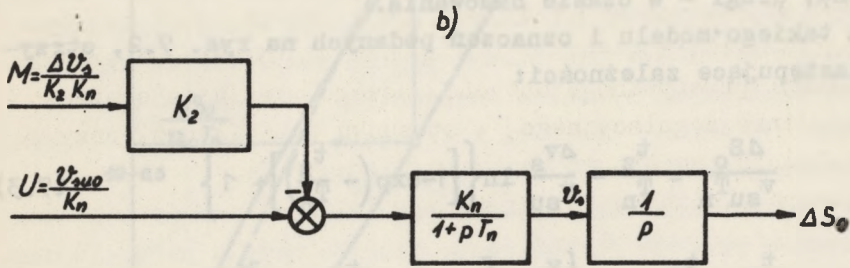
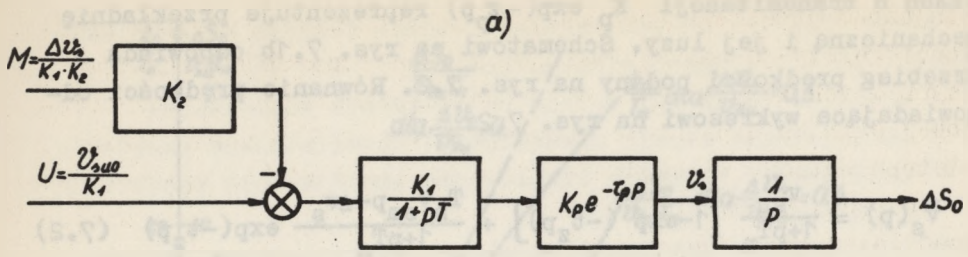
## 7.2. Wyprowadzenie zależności między czasem włączenia napędu a zmianą odstępu walców

Do obliczenia zależności między czasem włączenia napędu, a zmianą odstępu walców, posłużono się schematami blokowymi napędu na rys. 7.1.

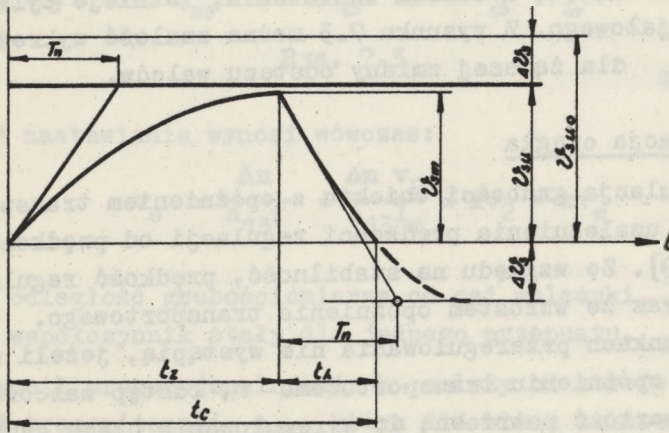
Statyczny moment obciążenia  $M$  silnika napędowego stanowi zakłócenie, powodujące, że prędkość ustalona  $v_{su}$  jest mniejsza od prędkości ustalonej w stanie jałowym  $v_{suo}$

$$v_{su} = v_{suo} - \Delta v_s \quad (7.1)$$





Rys. 7.1



Rys. 7.2

Człon o transmitancji  $K_p \exp(-\tau_p)$  reprezentuje przekładnię mechaniczną i jej luzy. Schematowi na rys. 7.1b odpowiada przebieg prędkości podany na rys. 7.2. Równanie prędkości odpowiadające wykresowi na rys. 7.2:

$$\bar{v}_s(p) = \frac{v_{su}}{1+pT_n} [1 - \exp(-t_z p)] + \frac{T_n v_{sm} p - \Delta v_s}{1+pT_n} \exp(-t_z p) \quad (7.2)$$

Pierwszy człon równania podaje przebieg prędkości w czasie rozruchu, drugi - w czasie hamowania.

Dla takiego modelu i oznaczeń podanych na rys. 7.2, otrzymano następujące zależności:

$$\frac{\Delta S_o}{v_{su} T_n} = \frac{t_z}{T_n} - \frac{\Delta v_s}{v_{su}} \ln \left\{ \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_z}{T_n}\right) \right] + 1 \right\} \quad (7.3)$$

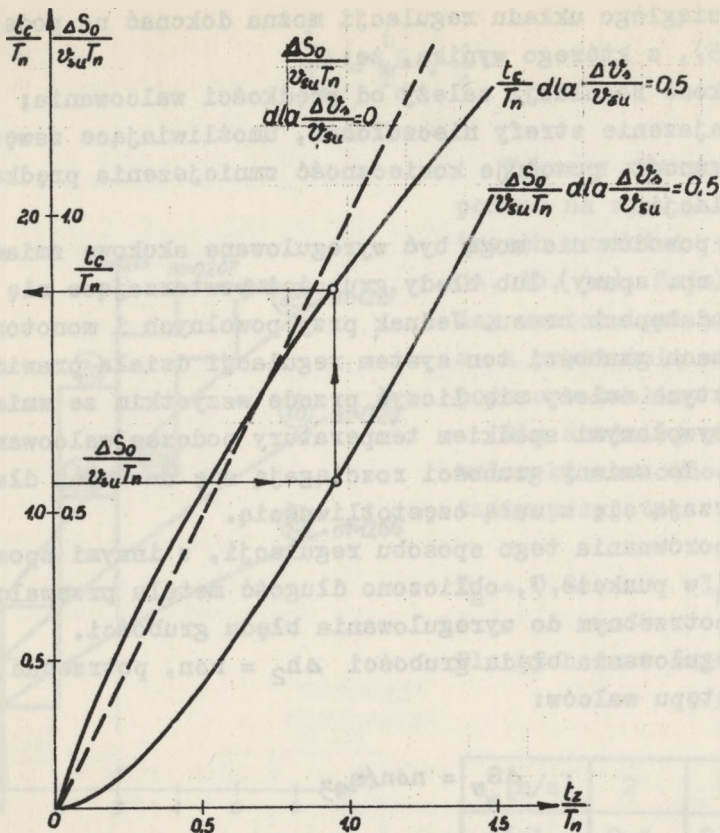
$$\frac{t_c}{T_n} = \frac{t_z}{T_n} + \ln \left\{ \frac{v_{su}}{\Delta v_s} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_z}{T_n}\right) + 1 \right] \right\} \quad (7.4)$$

Wykresy równania (7.3) i (7.4) dla  $\Delta v_s/v_{su} = 0,5$  podano na rys. 7.3. Z wykresów wynika, że liniowa zależność między zmianą odstępu walców, a czasem załączenia, istnieje tylko w stanie biegu jałowego. Z rysunku 7.3 można znaleźć wykreślnie wartość  $t_c/T_n$  dla żądanej zmiany odstępu walców.

### 7.3. Regulacja ciągła

Ciągła regulacja grubości obiektu z opóźnieniem transportowym, wymaga uzależnienia prędkości regulacji od prędkości walcowania [39]. Ze względu na stabilność, prędkość regulacji musi maleć, wraz ze wzrostem opóźnienia transportowego.

W tych warunkach przeregulowania nie wystąpią, jeżeli w czasie równym opóźnieniu transportowemu  $\tau$ , odstęp walców zmieni się o wartość potrzebną do wyregulowania błędu grubości, równego strefie nieczułości  $\Delta n$ , tzn. o wartość  $\Delta n/a_{13}$ .



Rys. 7.3

Prędkość nastawiania wynosi wówczas:

$$v_s = \frac{\Delta n}{a_{13} \tau} = \frac{\Delta n v_2}{a_{13} l_m} = kv_2 \approx kv_w \quad (7.5)$$

gdzie:

$l_m$  - odległość grubościomierza od osi walcarki,

$k$  - współczynnik stały dla jednego przepustu.

Współczynnik proporcjonalności  $k$  zależy od strefy nieczułości i od transmitancji  $a_{13}$ , która dla blach zimnowalcowanych zmienia się w granicach 0,6÷0. Należy zatem przewidzieć w regulatorze możliwość nastawiania tej wartości.

Oceny ciągłego układu regulacji można dokonać na podstawie wzoru (7.5), z którego wynika, że:

- prędkość regulacji zależy od prędkości walcowania;
- zmniejszenie strefy nieczułości, umożliwiające zawężenie tolerancji, powoduje konieczność zmniejszenia prędkości regulacji.

Z tych powodów nie mogą być wyregulowane skokowe zmiany grubości (np. spawy) lub błędy grubości powtarzające się w krótkich odstępach czasu. Jednak przy powolnych i monotonicznych zmianach grubości ten system regulacji działa prawidłowo. W praktyce należy się liczyć przede wszystkim ze zmianami grubości wywołanymi spadkiem temperatury podczas walcowania na gorąco. Te zmiany grubości rozciągają się na dużej długości lub powtarzają się z małą częstotliwością.

Celem porównania tego sposobu regulacji, z innymi sposobami omówionymi w punkcie 7, obliczono długość metalu przewalcowaną w czasie potrzebnym do wyregulowania błędu grubości.

Do wyregulowania błędu grubości  $\Delta h_2 = n\Delta n$ , potrzebna jest zmiana odstępu walców:

$$\Delta S_0 = n\Delta n/a_{13}$$

Jeżeli ustaloną prędkość nastawiania  $v_{su}$  występującą we wzorze (7.3) obliczyć z zależności (7.5), wówczas otrzymuje się:

$$\frac{\Delta S_0}{v_{su} T_n} = n m \quad (7.6)$$

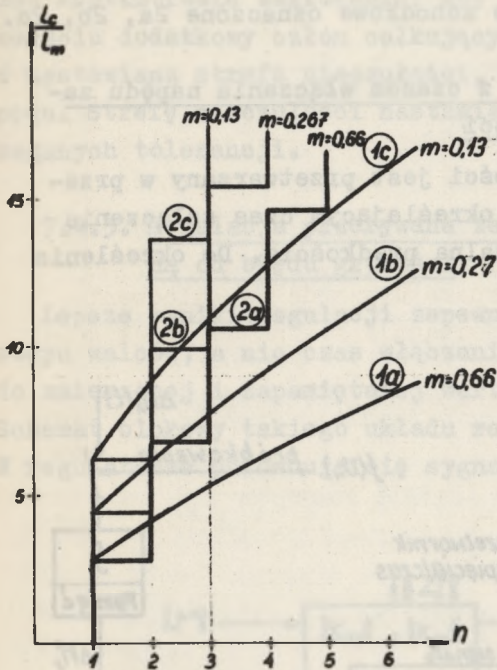
gdzie:  $m = \tau/T_n$

Stosunek  $t_c/T_n$  dla różnych wartości iloczynu  $nm$ , można odczytać z wykresów na rys. 7.3. Długość  $l_c$  metalu przewalcowanego w czasie  $t_c$ , można teraz obliczyć z wzoru:

$$l_c = v_w t_c = t_c \frac{l_m}{\tau} = \frac{t_c}{T_n} \frac{l_m T_n}{\tau}$$

lub

$$\frac{l_c}{l_m} = \frac{t_c}{T_n} \cdot \frac{1}{m} \quad (7.7)$$



Rys. 7.4

Wykresy równania (7.7) podano na rys. 7.4, dla trzech wartości  $m$  (krzywe 1a, 1b, 1c). Związek między wartościami parametru  $m$  a prędkością walcowania, podano w tabelicy I.

Dla średniej wielkości walcarki nawrotnej zimnej taśmy przyjęto:

$$T_n = 0,6s; \quad l_m = 0,8 m.$$

Dla tych wartości otrzymano:

Tabelica I

$v_w$ [m/s]	2	5	10
$\tau$ [s]	0,4	0,16	0,08
$m$	0,66	0,27	0,13

## 7.4. Regulacja przerywana

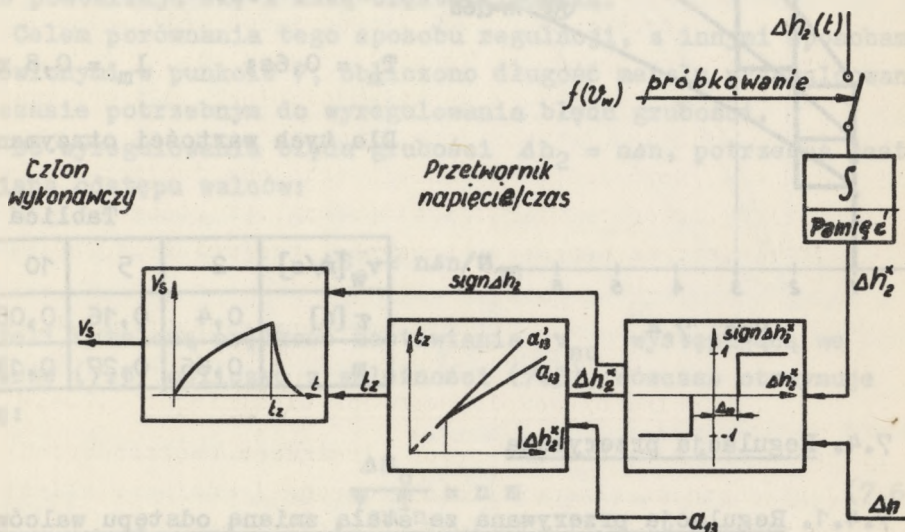
### 7.4.1. Regulacja przerywana ze stałą zmianą odstępów walców

W tym przypadku napęd nastawiania zostaje włączony do pracy z maksymalną prędkością, jeżeli błąd grubości przekroczy wartość strefy nieczułości, przy czym błąd grubości określa tylko znak  $\Delta S_0$ . Wyłączenie napędu następuje po określonym czasie lub po określonej zmianie odstępów walców niezależnej od wartości błędu grubości. W obu przypadkach w jednym cyklu powinien zostać zniesiony błąd grubości równy strefie nieczu-

łości. Zniesienie większych błędów wymaga dalszych cykli. Każdy następny cykl korekcyjny jest dozwolony dopiero po pomiarze grubości przy pomocy grubościomierza umieszczonego za walcarką. Zależność przewalcowanej długości od wartości błędu przedstawiają na rys. 7.4 linie schodkowe oznaczone 2a, 2b, 2c.

#### 7.4.2. Regulacja przerywana z czasem włączania napędu zależnym od błędu grubości.

W tym rozwiązaniu błąd grubości jest przetwarzany w przetworniku napięcie - czas [39], określającym czas załączenia  $t_z$  napędu, przy pracy z maksymalną prędkością. Do określenia



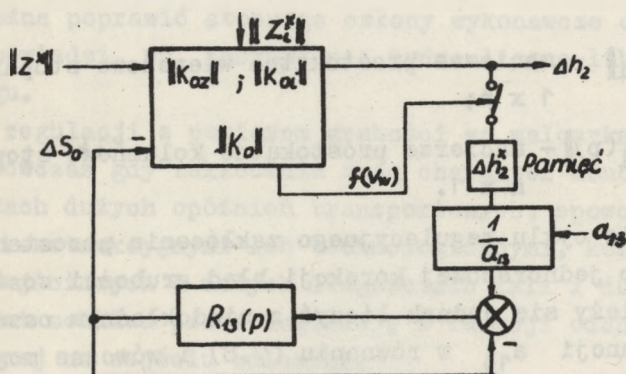
Rys. 7.5

zależności funkcyjnej  $t_z = f(\Delta h_2, a_{13})$  może posłużyć wzór (6.7). Zmienność transmitancji szczeliny walców uwzględnia się przez nastawianie nachylenia charakterystyki przetwornika napięcie - czas w zależności od wartości  $a_{13}$ . Schemat ideowy układu regulacji przedstawiono na rys. 7.5. Na rysunku tym

$\Delta h_2^*$  oznacza zmierzoną i zapamiętaną wartość błędu grubości. Oparcie regulacji na pomiarze chwilowych wartości błędu stwarzałyby możliwość uruchomienia członu wykonawczego przez bardzo krótkotrwałe zakłócenie. Aby temu zapobiec zastosowano na wejściu dodatkowy człon całkujący. Trójpołożeniowy przełącznik, z nastawianą strefą nieczułości, określa kierunek obrotów napędu. Strefę nieczułości nastawia operator w zależności od wymaganych tolerancji.

### 7.4.3. Regulacja przerywana ze zmianą odstępu walców zależną od błędu grubości

Lepsze wyniki regulacji zapewnia układ, w którym zmiana odstępu walców, a nie czas włączania napędu jest proporcjonalny do zmierzonej i zapamiętanej wartości błędu grubości  $\Delta h_2^*$ . Schemat blokowy takiego układu regulacji podano na rys. 7.6. W regulatorze porównuje się sygnał zadanej zmiany odstępu wal-



Rys. 7.6

ców, proporcjonalnej do  $\Delta h_2^*$ , z sygnałem sprzężenia zwrotnego od przebytej drogi. W przypadku napędu o nienastawianej prędkości obrotowej, włączenie napędu powinno nastąpić w chwili gdy przebyta droga jest mniejsza od zadanej, o wartość drogi

hamowania. W tym przypadku schemat należy uzupełnić układem wykonującym obliczenia drogi hamowania [49].

Zmiana odstepu walców potrzebna do zniesienia błędu grubości, obliczona z (1.20) wynosi:

$$\Delta S_0 = \frac{\Delta h_2^*}{a_{13}} = \frac{\|K_{Oz}\| \|Z^*\| + \|K_{O1}\| \|Z_1^*\|}{a_{13}}$$

gdzie:

$\|Z^*\|$ ;  $\|Z_1^*\|$  - macierze wartości zakłóceń występujących w czasie pomiaru błędu grubości.

Jeżeli transmitancję regulatora i członu wykonawczego oznaczyć przez  $R_{13}(p)$  i uwzględnić sprzężenie zwrotne jak na rys. 7.6, wówczas równanie błędu grubości można napisać:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \|K_{Oz}\| \|\bar{Z}(p)\| + \|K_{O1}\| \|Z_1(p)\| - \frac{R_{13}(p)}{1 + R_{13}(p)} \Delta h_2^*$$

gdzie:

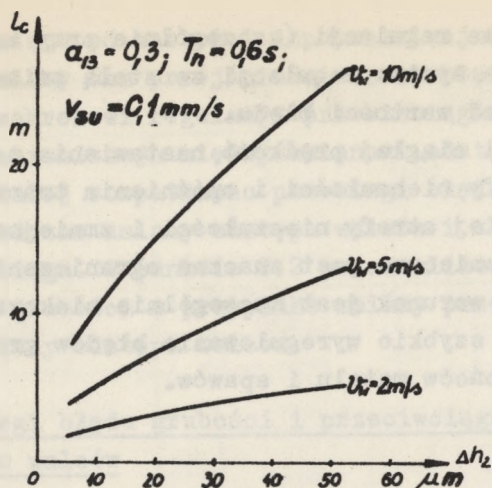
$\|K_{Oz}\|$ ;  $\|K_{O1}\|$  - macierze prostokątne wierszowe stopnia  $1 \times n$ ;

$\|\bar{Z}(p)\|$ ;  $\|Z_1(p)\|$  - macierze prostokątne kolumnowe stopnia  $n \times 1$ .

Jeżeli w czasie cyklu regulacyjnego zakłócenia pozostaną stałe, wówczas po jednorazowej korekcji błąd grubości zostanie zniesiony. Należy się jednak liczyć z niedokładnym oszacowaniem transmitancji  $a_{13}$  w równaniu (7.8) i wówczas mogą być potrzebne następne ruchy korekcyjne, po upływie czasu opóźnienia transportowego.

Wykresy  $l_c = f(\Delta h_2)$ , sporządzone dla sposobu regulacji opisanego w punkcie 7.4.2 i 7.4.3 podano na rys. 7.7. Jeżeli czas załączenia  $t_z$  będzie obliczony niedokładnie, wówczas błąd grubości zostanie wyregulowany w dwóch cyklach roboczych, co oczywiście powiększy  $l_c$ .





Rys. 7.7

### 7.5. Porównanie systemów regulacji z czasem transportu

Poza opóźnieniem transportowym, najważniejszym czynnikiem ograniczającym prędkość regulacji jest czas odpowiedzi napędu, zależny od prędkości nastawiania i stałej czasowej napędu. Regulację można poprawić stosując człony wykonawcze o krótkim czasie odpowiedzi, np. nastawianie hydrauliczne lub nastawianie naciągu.

Układy regulacji z pomiarem grubości za walcarką można stosować wówczas gdy zakłócenia mają charakter monotoniczny. W przypadkach dużych opóźnień transportowych, spowodowanych względami konstrukcyjnymi lub technologicznymi, kompensacja zakłóceń wejściowych o małych długościach fali i dużych amplitudach, jest możliwa przez regulację w funkcji odchyłki grubości mierzonej na wejściu walcarki.

System regulacji ze zmianą odstępu walców zależną od  $\Delta h_2$  umożliwia najszybsze wyregulowanie błędu grubości w jednym cyklu roboczym. Jest on także dokładniejszy od innych systemów regulacji z czasem transportu, dzięki sprzężeniu zwrotnemu od wielkości nastawianej.

Najdłuższy czas regulacji (szczególnie przy wąskiej strefie nieczułości) daje system regulacji ze stałą zmianą odstepu walców, niezależną od wartości błędu.

Przy regulacji ciągłej prędkość nastawiania należy dobrać do wartości strefy nieczułości i opóźnienia transportowego. W przypadku wąskiej strefy nieczułości i zmniejszonej prędkości walcowania konieczne jest znaczne ograniczenie prędkości nastawiania. Ten warunek jest szczególnie niekorzystny, ponieważ uniemożliwia szybkie wyregulowanie błędów grubości przy walcowaniu obu końców metalu i spawów.

### Rozdział III

#### DYNAMIKA PROCESU WALCOWANIA

##### 8. Dynamika procesu przy złożonej regulacji grubości

Regulacja grubości w szerokim zakresie jest możliwa przy zastosowaniu co najmniej dwu, uzupełniających się systemów regulacji. Przy małych błędach grubości, działa układ regulacji przeciwciałem lub prędkością walcowania. Po przekroczeniu zakresu regulacji przeciwciałem lub prędkością walcowania, zostaje włączona regulacja odstepem walców. Zakres regulacji przez nastawianie odstepu walców jest duży, ale przy napędach elektromechanicznych jej działanie jest powolne, w porównaniu z regulacją przez nastawianie przeciwciału.

Regulacja odstepem walców powinna być załączona w chwili, gdy zostanie osiągnięta granica regulacji przeciwciałem. Zmiana odstepu walców powinna spowodować zmniejszenie błędu grubości do zera lub do wartości określonej strefą nieczułości regulatora oraz powinna spowodować sprowadzenie przeciwciału do wartości znamionowej tak, aby po zakończonej regulacji mógł on być ponownie nastawiany. Nie można jednak spowodować nagłej

zmiany przeciwciągu od wartości dopuszczalnej do znamionowej, ponieważ wywołałaby ona przejściowo wzrost błędu grubości o wartość równą zakresowi regulacji przeciwciągiem. Konieczna jest zatem synchronizacja między zmianami odstępu walców i przeciwciągu. Dalej rozpatrzono przebiegi błędu grubości i przeciwciągu podczas zmiany odstępu walców i zależnej od niej zmiany przeciwciągu. W punkcie 8.2 przeanalizowano ponadto przebieg błędu grubości w przypadku zmiany przeciwciągu, niezależnej od zmiany odstępu walców.

### 8.1. Przebiegi błędu grubości i przeciwciągu podczas zmiany odstępu walców

#### 8.1.1. Napęd o nienastawianej prędkości

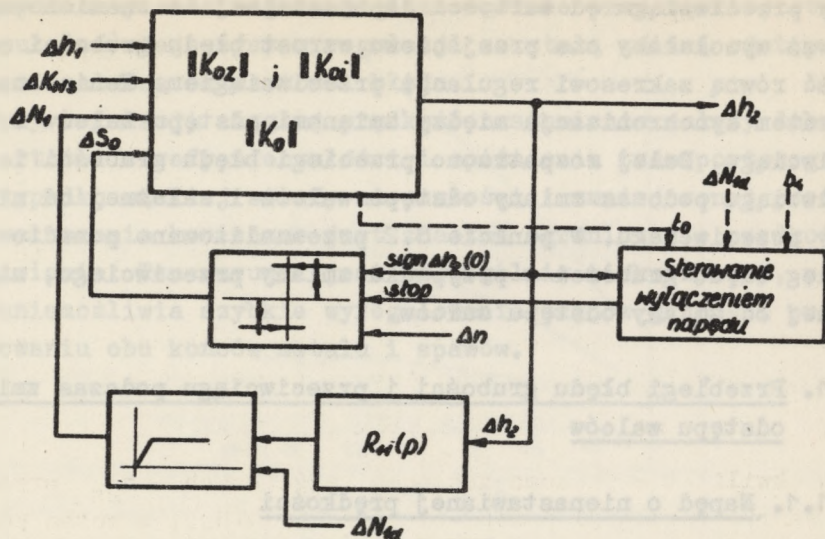
Większość walcarek nawrotnych zimnej taśmy jest wyposażona w asynchroniczny napęd mechanizmu nastawiania walców. Dlatego zostaną rozpatrzone przebiegi błędu grubości i przeciwciągu w stanach nieustalonych przy napędzie o nienastawianej prędkości. Celem tych rozważań jest wyprowadzenie zależności pozwalających obliczyć optymalny czas załączenia napędu nastawiania.

Strukturę układu regulacji przyjętego do analizy podaje rys. 8.1. Włączenie napędu nastawiania walców powoduje przekaznik o strefie nieczułości mniejszej od dopuszczalnego błędu grubości. Wyłączeniem napędu steruje osobny człon układu. Człon ograniczający zapobiega wzrostowi przeciwciągu powyżej wartości dopuszczalnej. Regulator w układzie przeciwciągu jest regulatorem całkującym. Założono, że podczas okresu regulacji, naciąg i zakłócenia wejściowe równe  $\Delta h_{2z}$  pozostają stałe, a zakłócenia wewnętrzne procesu są pomijalne.

Przyjęto oznaczenia:

$\Delta N_{1d}$  - dopuszczalny przyrost przeciwciągu,

$\Delta h_N = a_{11} \Delta N_{1d} = z_{11} \Delta h_1 + z_{12} \Delta K_{ws}$  suma wartości zakłóceń wejściowych, sprowadzonych na stronę wyjściową walcarki, które mogą być wyregulowane przez zmianę przeciwciągu,



Rys. 8.1

$t_0$  - czas w którym błąd grubości zmienia znak,

$t_c = t_z + t_h$  (patrz rys. 7.2).

W przypadku napędu o nienastawionej prędkości równanie zmiany odstępu walców można zapisać:

$$-\Delta \bar{s}_0(p) = \frac{1}{p} \bar{v}_s(p) \text{sign } \Delta h_2(0) [1 - \exp(-t_c p)] \quad (8.1)$$

gdzie:  $\Delta h_2(0) = \Delta h_{2z} - a_{11} \Delta N_{1d}$ , błąd grubości w chwili  $t = 0$  (8.1a)

Przeciwciąg, do chwili  $t = t_0$ , w której błąd grubości zmienia znak, jest utrzymywany na stałej wartości  $\Delta N_{1d}$ . Po zmianie znaku błędu grubości, przeciwciąg zmienia się wg równania:

$$\Delta \bar{N}_1(p) = \Delta N_{1d} [1 - \exp(-t_0 p)] + R_{11}(p) \Delta \bar{h}_2(p) \exp(-t_0 p) \quad (8.2)$$

Ogólne równanie błędu grubości otrzymuje się podstawiając (8.1) i (8.2) do (1.20):

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \Delta h_{2z} - a_{11} \Delta N_{1d} [1 - \exp(-t_0 p)] - a_{11} R_{11}(p) \Delta \bar{h}_2(p) \exp(-t_0 p) - a_{13} \frac{1}{p} \bar{v}_s(p) \text{sign} \Delta h_2(0) [1 - \exp(-t_c p)] \quad (8.3)$$

Celowym jest rozpatrywać przebiegi błędu grubości i przeciwności, oddzielnie dla trzech okresów regulacji.

Okres I:  $0 \leq t \leq t_0$

Jeśli w chwili  $t = 0$  suma zakłóceń wejściowych  $\Delta h_{2z}$  przekracza zakres regulacji przeciwności  $a_{11} \Delta N_{1d}$ , wówczas powstanie błąd grubości, który spowoduje włączenie napędu nastawiania walców. Równanie błędu grubości dla tego okresu wynika z (8.3):

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \Delta h_2(0) - a_{13} \frac{1}{p} \bar{v}_s(p) \text{sign} \Delta h_2(0) \quad (8.4)$$

$$\Delta \bar{N}_1(p) = \Delta N_{1d} = \text{const}$$

Postać czasową równania (8.4) znaleziono dla przebiegu prędkości określonego równaniem (7.2).

$$\Delta h_2(t) = \Delta h_2(0) - a_{13} v_{su} \left[ t - T_n + T_n \exp\left(-\frac{t}{T_n}\right) \right] \text{sign} \Delta h_2(0) \quad (8.5)$$

Dla założenia, że  $t_0 \gg T_n$  znaleziono z równania (8.5) czas  $t_0$ :

$$t_0 \cong \frac{\Delta h_2(0)}{a_{13} v_{su}} + T_n \quad (8.6)$$

W chwili  $t = t_0$  wartość błędu grubości i wielkości nastawianych są związane równaniem:

$$\Delta h_2(t_0) = \Delta h_2(0) + a_{13} \Delta S_0(t_0) = 0 \quad (8.7)$$

gdzie:  $\Delta S_0(t_0) = \int_0^{t_0} v_s(t) dt$

Okres II:  $t_0 \leq t \leq t_c$

Ten okres obejmuje przedział czasu od chwili zmiany znaku błędu grubości do chwili zatrzymania napędu. W tym okresie zmienia się błąd grubości, przeciwciąg i odstęp walców. Równanie błędu grubości dla tego okresu, otrzymano z równania (8.3), po uwzględnieniu zależności (8.7)

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \frac{a_{13} \Delta \bar{S}_0(p)}{1 + a_{11} R_{11}(p)}$$

Równanie przeciwciągu:  $\Delta \bar{N}_1(p) = R_{11}(p) \Delta \bar{h}_2(p)$

Okres III:  $t > t_c$

Dalej rozważa się przebiegi błędu grubości i przeciwciągu od zatrzymania napędu, w dowolnej chwili  $t_c$ .

Stan procesu regulacji w chwili zatrzymania napędu nastawiania walców opisują dla dowolnego przebiegu  $\Delta S_0(t)$ , równania:

$$\Delta h_2(t_c) = \Delta h_{2z} - a_{11} \Delta N_1(t_c) + a_{13} \Delta S_0(t_c) \quad (8.8)$$

$$\Delta N_1(t_c) = \Delta N_{1d} + k_{11} \int_{t_0}^{t_c} \Delta h_2(t) dt$$

gdzie:  $k_{11}$  jest stałą całkowania.

W chwili zatrzymania napędu istnieje zarówno błąd grubości jak i odchyłka przeciwciągu od wartości znamionowej. Dalsza regulacja grubości odbywa się tylko przeciwciągami. Równanie (8.3)

dla tego okresu, z uwzględnieniem zależności (8.8) można przepisać w postaci:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \Delta h_2(t_c) - a_{11} R_{11}(p) \Delta \bar{h}_2(p)$$

stąd

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \frac{\Delta h_2(t_c)}{1 + a_{11} R_{11}(p)} \quad (8.9a)$$

Przeciwciąg jest funkcją błędu grubości i od chwili zatrzymania napędu zmienia się wg równania:

$$\Delta \bar{N}_1(p) = \Delta N_1(t_c) + R_{11}(p) \Delta \bar{h}_2(p) \quad (8.9b)$$

Ogólnie transmitancję obwodu regulacji grubości przez nastawianie przeciwciagu, z członem całkującym, można przedstawić:

$$R_{11}(p) = \frac{k_{11}}{p} \prod_{k=1}^n \frac{1}{1 + pT_k}$$

Po podstawieniu tej transmitancji do równań (8.9a) i (8.9b), otrzymano:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{h}_2(p) &= \Delta h_2(t_c) \frac{p \prod_{k=1}^n (1 + pT_k)}{p \prod_{k=1}^n (1 + pT_k) + a_{11} k_{11}} \\ \Delta \bar{N}_1(p) &= \Delta N_1(t_c) + \Delta h_2(t_c) \frac{1}{a_{11} + \frac{p}{k_{11}} \prod_{k=1}^n (1 + pT_k)} \end{aligned} \right\} (8.10)$$

Dla stanu ustalonego znaleziono:

$$\Delta h_{2ust} = 0$$

$$\Delta N_{1ust} = \Delta N_1(t_c) + \frac{\Delta h_2(t_c)}{a_{11}} \quad (8.11)$$

Z równań stanu ustalonego wynika, że:

- błąd grubości w stanie ustalonym jest równy zero, niezależnie od chwili zatrzymania napędu nastawiania walców;
- ustalona wartość przeciwciągu jest funkcją całkowitego czasu pracy napędu nastawiania.

Zatrzymanie napędu powinno nastąpić w czasie  $t_c$  takim, że  $\Delta N_{1ust} = 0$ . Przyrównując (8.11) do zera znaleziono:

$$a_{11} \Delta N_1(t_c) + \Delta h_2(t_c) = 0 \quad (8.11a)$$

Z (8.11a) wynika już możliwość uzyskania sygnału do wyłączenia napędu. Utworzenie takiego sygnału wymaga pomiaru naciągu i błędu grubości oraz ich porównania. Inną możliwość uzyskuje się przez obliczenie całkowitego czasu pracy napędu, spełniającego warunek (8.11a). W tym celu znaleziono wartość odstępu walców, dla której ten warunek jest spełniony. Podstawiając (8.8) do (8.11a) otrzymano:

$$\Delta S_0(t_c) = -\Delta h_{2z}/a_{13}$$

Niech

$$\Delta S_0(t_c) = \Delta S_0(t_0) + \Delta S'_0$$

gdzie:

$S'_0$  - zmiana odstępu walców w czasie  $t_c - t_0$

$$\Delta S_0(t_0) = -\Delta h_2(0)/a_{13} \quad \text{wynika z (8.7).}$$



Uwzględniając (8.1a) otrzymano:

$$\Delta S'_0 = - \frac{\Delta h_{2z} - \Delta h_2(0)}{a_{13}} = \frac{a_{11} \Delta N_{1d}}{a_{13}}$$

oraz

$$\Delta S_0(t_c) = \Delta S_0(t_0) + \frac{a_{11} \Delta N_{1d}}{a_{13}} \quad (8.12)$$

Na podstawie (8.12) obliczono czas załączenia napędu przyjmując, że  $t_c \cong t_z$  oraz  $v_s \cong v_{su} = \text{const.}$  Założenia te są konieczne, aby otrzymać wyniki w formie nadającej się do praktycznego wykorzystania. Założenia te są dopuszczalne, ponieważ transmitancje szczeliny walców występujące w (8.12) zależą od zmiennych własności walcowanego metalu. Czas załączenia napędu nastawiania obliczony z wzorów (8.6) oraz (8.12) wynosi:

$$t_z = t_0 + \frac{a_{11} \Delta N_{1d}}{a_{13} v_{su}} = T_n + \frac{1}{a_{13} v_{su}} [h_2(0) + \Delta h_N] \quad (8.13)$$

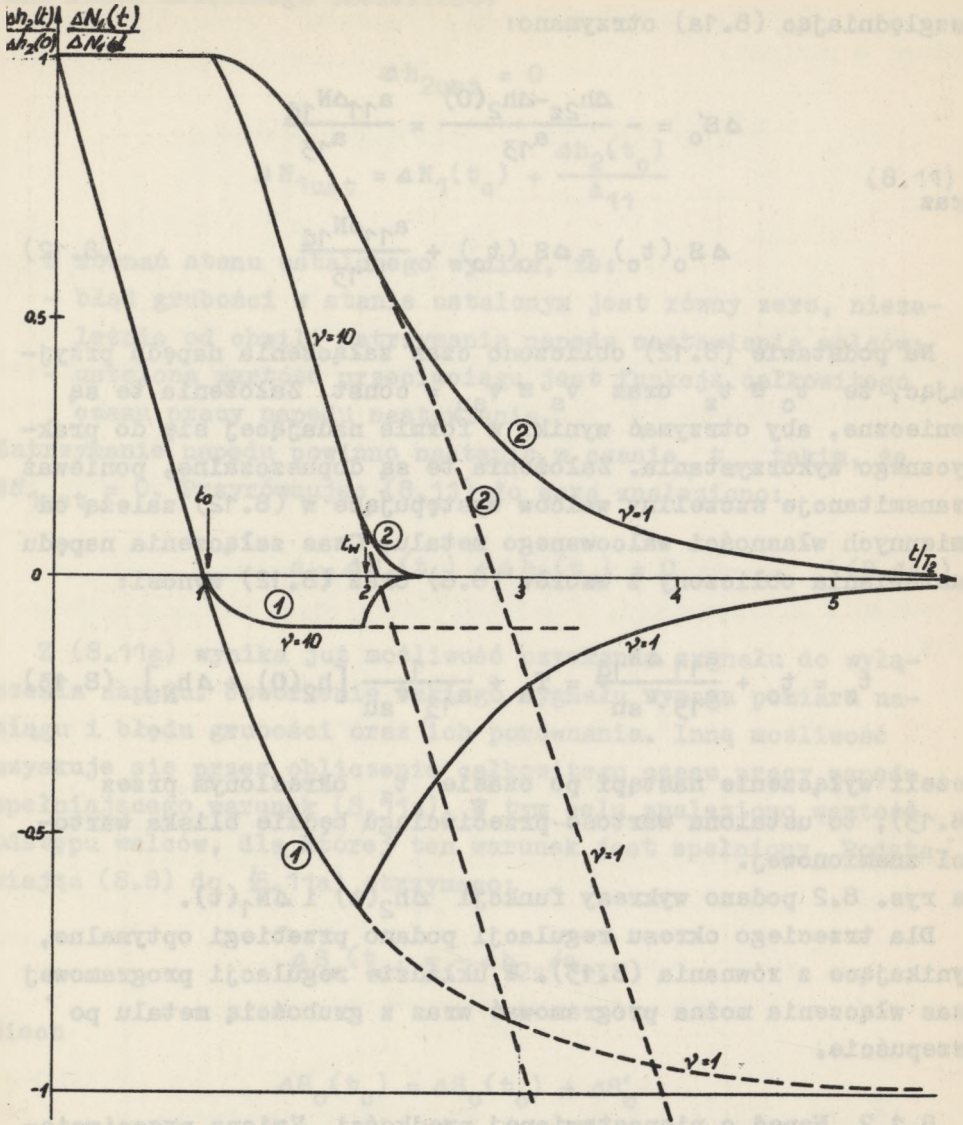
Jeżeli wyłączenie nastąpi po czasie  $t_z$  określonym przez (8.13), to ustalona wartość przeciwciągu będzie bliska wartości znamionowej.

Na rys. 8.2 podano wykresy funkcji  $\Delta h_2(t)$  i  $\Delta N_1(t)$ .

Dla trzeciego okresu regulacji podano przebiegi optymalne, wynikające z równania (8.13). W układzie regulacji programowej czas włączenia można programować wraz z grubością metalu po przepuszczeniu.

### 8.1.2. Napęd o nienastawianej prędkości. Zmiana przeciwciągu niezależna od zmiany $\Delta S_0$

Rozpatruje się w dalszym ciągu regulację złożoną za pomocą przeciwciągu (przy stałym naciągu) i odstępu walców, różniącą się od poprzedniej tym, że po osiągnięciu dopuszczalnego przyrostu, przeciwciąg zmniejsza się w sposób ciągły do swej war-



① - wykresy błędu grubości

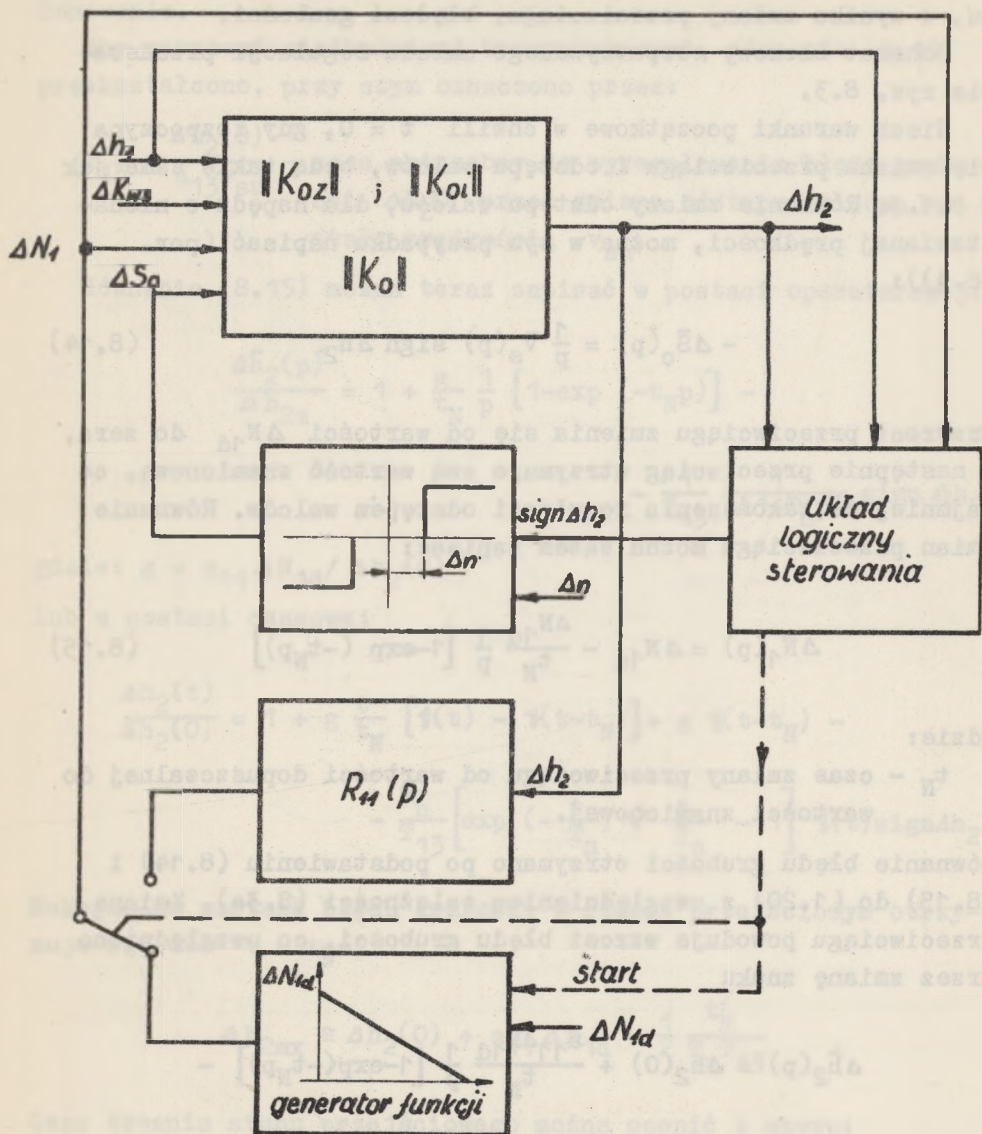
② - wykresy przecięcia

$$\gamma = 1/4 a_n v_{max}$$

$$T_1 = \frac{1}{a_n k_H}$$

$$T_2 = \frac{1}{a_{13} k_{13}}$$

Rys. 8.2



Rys. 8.3

tości znamionowej. Równocześnie zmienia się odstęp walców w takim kierunku, aby przeciwdziałać istniejącemu i powstającemu, w wyniku zmiany przeciwciaгу, błędowi grubości.

Schemat blokowy rozpatrywanego układu regulacji przedstawia rys. 8.3.

Niech warunki początkowe w chwili  $t = 0$ , gdy rozpoczyna się zmiana przeciwciaгу i odstępu walców, będą takie same jak w 8.1.1. Równanie zmiany odstępu walców, dla napędu o nienastawianej prędkości, można w tym przypadku napisać (por. (8.1)):

$$-\Delta \bar{S}_0(p) = \frac{1}{p} \bar{v}_s(p) \operatorname{sign} \Delta h_2 \quad (8.14)$$

Przyrost przeciwciaгу zmienia się od wartości  $\Delta N_{1d}$  do zera, a następnie przeciwciaгу utrzymuje swą wartość znamionową, co najmniej do zakończenia regulacji odstępem walców. Równanie zmian przeciwciaгу można zatem zapisać:

$$\Delta \bar{N}_1(p) = \Delta N_{1d} - \frac{\Delta N_{1d}}{t_N} \frac{1}{p} [1 - \exp(-t_N p)] \quad (8.15)$$

gdzie:

$t_N$  - czas zmiany przeciwciaгу od wartości dopuszczalnej do wartości znamionowej.

Równanie błędu grubości otrzymano po podstawieniu (8.14) i (8.15) do (1.20) z uwzględnieniem zależności (8.3a). Zmiana przeciwciaгу powoduje wzrost błędu grubości, co uwzględniono przez zmianę znaku

$$\begin{aligned} \Delta \bar{h}_2(p) = \Delta h_2(0) + \frac{a_{11} \Delta N_{1d}}{t_N} \frac{1}{p} [1 - \exp(-t_N p)] - \\ - a_{13} \frac{1}{p} \bar{v}_s(p) \operatorname{sign} \Delta h_2 \end{aligned} \quad (8.16)$$

Dalej rozpatrzono przebiegi przy zmianie prędkości nastawiania wg równania (7.2), pomijając zmianę odstępu walców w czasie hamowania.

Aby operować wielkościami bezwymiarowymi, równanie (8.16) przekształcono, przy czym oznaczono przez:

$$T_{13} = \frac{\Delta h_2(0)}{a_{13} v_{su}} - \text{czas potrzebny do wyregulowania błędu grubości } \Delta h_2(0) \text{ przez zmianę odstępu walców, ze stałą prędkością } v_{su}.$$

Równanie (8.15) można teraz zapisać w postaci operatorowej:

$$\frac{\Delta \bar{h}_2(p)}{\Delta h_{2z}} = 1 + \frac{g}{t_N} \frac{1}{p} [1 - \exp(-t_N p)] - \frac{1}{T_{13}} \frac{1}{p(1+T_n p)} \text{sign } \Delta h_2$$

gdzie:  $g = a_{11} \Delta N_{1d} / \Delta h_2(0)$

lub w postaci czasowej

$$\frac{\Delta h_2(t)}{\Delta h_2(0)} = 1 + g \frac{t}{t_N} [1(t) - 1(t-t_N)] + g 1(t-t_N) - \frac{T_n}{T_{13}} \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_n}\right) + \frac{t}{T_n} - 1 \right] 1(t) \text{sign} \Delta h_2$$

Maksymalną wartość błędu grubości w stanie przejściowym otrzymuje się dla  $t = t_N$ :

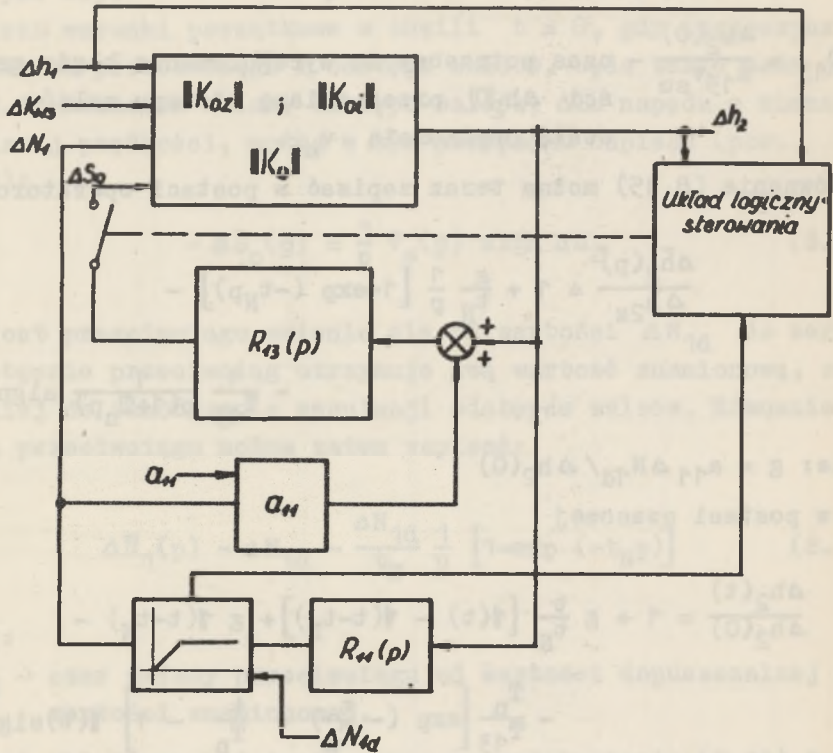
$$\Delta h_{2mx} \cong \Delta h_2(0) + a_{11} \Delta N_{1d} - \frac{1}{2} \frac{t_N^2}{T_n T_{13}}$$

Czas trwania stanu przejściowego można ocenić z wzoru:

$$t_c \cong t_N + \Delta h_{2 \max} / a_{13} v_{su}$$

## 8.2. Napęd o nastawianej prędkości

Podobne obliczenia przeprowadzono dla napędu o nastawianej prędkości. Schemat blokowy rozpatrzonego układu regulacji podano na rys. 8.4. Założono, że regulator w obwodzie przeciw-

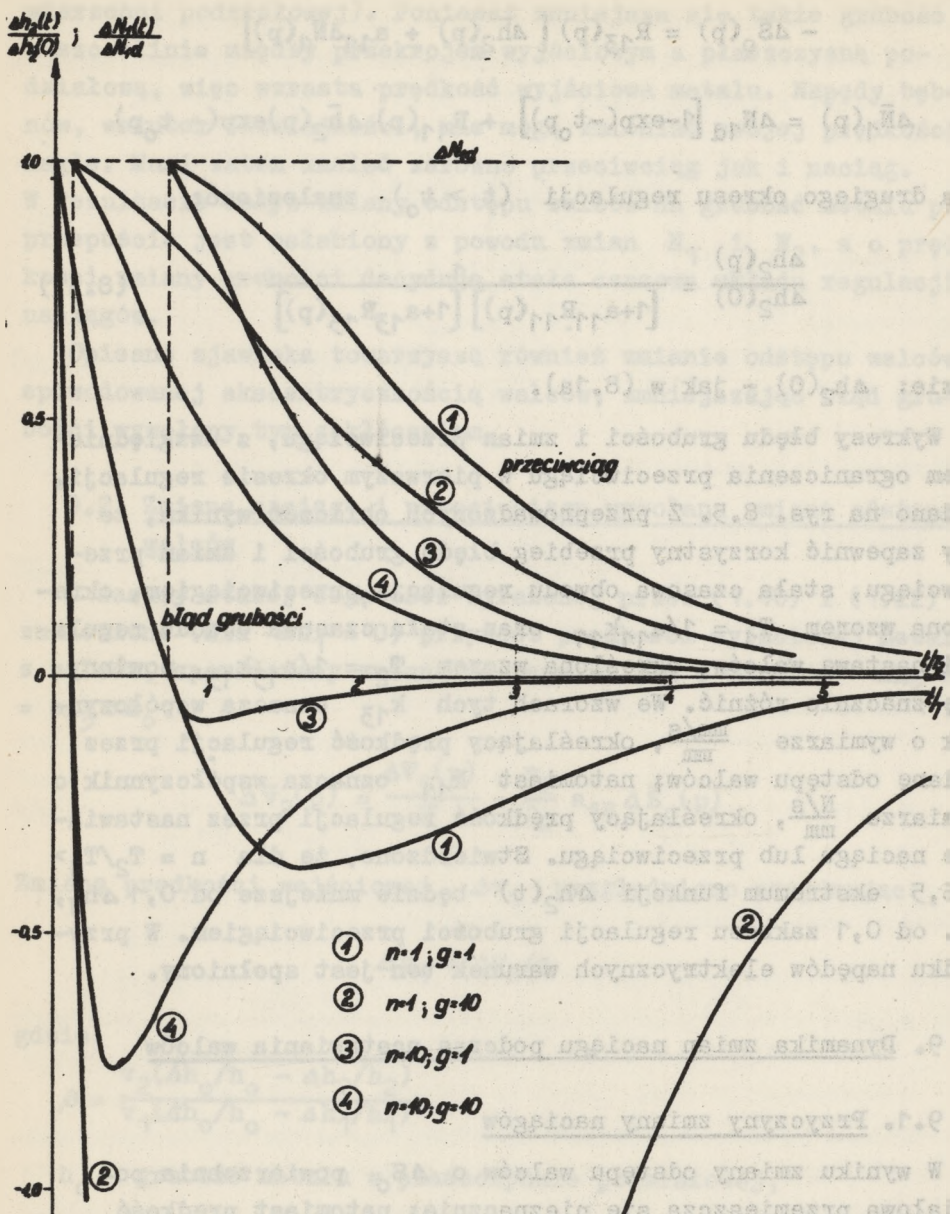


Rys. 8.4

ciągu jest regulatorem całkującym oraz że istnieje ograniczenie wartości przeciwiągu. Przebieg błędu grubości podczas zmiany odstępu walców wyraża równanie:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = \Delta h_{2z} - a_{11} \Delta \bar{N}_1(p) + a_{13} \Delta \bar{S}_0(p)$$

dla  $\Delta h_{2z} = \text{const}$ ;  $\Delta N_2 = 0 = \text{const}$ .



Rys. 8.5

gdzie:

$$-\Delta S_0(p) = R_{13}(p) [\Delta \bar{h}_2(p) + a_{11} \Delta \bar{N}_1(p)]$$

$$\Delta \bar{N}_1(p) = \Delta N_{1d} [1 - \exp(-t_0 p)] + R_{11}(p) \Delta \bar{h}_2(p) \exp(-t_0 p)$$

Dla drugiego okresu regulacji ( $t > t_0$ ) znaleziono:

$$\frac{\Delta h_2(p)}{\Delta h_2(0)} = \frac{1}{[1 + a_{11} R_{11}(p)] [1 + a_{13} R_{13}(p)]} \quad (8.17)$$

gdzie:  $\Delta h_2(0)$  - jak w (8.1a).

Wykresy błędu grubości i zmian przeciwności, z uwzględnieniem ograniczenia przeciwności w pierwszym okresie regulacji, podano na rys. 8.5. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że aby zapewnić korzystny przebieg błędu grubości i zmian przeciwności, stała czasowa obwodu regulacji przeciwności, określona wzorem  $T_1 = 1/a_{11}k_{11}$  oraz stała czasowa obwodu regulacji nastawą walców, określona wzorem  $T_2 = 1/a_{13}k_{13}$ , powinny się znacznie różnić. We wzorach tych  $k_{13}$  oznacza współczynnik o wymiarze  $\frac{\text{mm/s}}{\text{mm}}$ , określający prędkość regulacji przez zmianę odstepu walców; natomiast  $k_{11}$  oznacza współczynnik o wymiarze  $\frac{\text{N/s}}{\text{mm}}$ , określający prędkość regulacji przez nastawianie naciągu lub przeciwności. Stwierdzono, że dla  $n = T_2/T_1 > 6,5$  ekstremum funkcji  $\Delta h_2(t)$  będzie mniejsze od  $0,1 \Delta h_N$ , tj. od 0,1 zakresu regulacji grubości przeciwności. W przypadku napędów elektrycznych warunek ten jest spełniony.

## 9. Dynamika zmian naciągu podczas nastawiania walców

### 9.1. Przyczyny zmiany naciągów

W wyniku zmiany odstepu walców o  $\Delta S_0$  powierzchnia podziałowa przemieszcza się nieznacznie; natomiast prędkość wejściowa metalu maleje, a prędkość wyjściowa wzrasta. Zmniejszenie prędkości wejściowej jest spowodowane zmniejszeniem grubości metalu w szczelinie, między przekrojem wejściowym a



powierzchnią podziałową (przy stałej prędkości metalu na powierzchni podziałowej). Ponieważ zmniejsza się także grubość w szczelinie między przekrojem wyjściowym a płaszczyzną podziałową, więc wzrasta prędkość wyjściowa metalu. Napędy bębnowe, wskutek bezwładności, nie mogą zmieniać swojej prędkości nagle. Musi zatem zmaleć zarówno przeciwciąg jak i naciąg. W rezultacie wpływ zmiany odstępu walców na grubość metalu po przepuszczeniu jest osłabiony z powodu zmian  $N_1$  i  $N_2$ , a o prędkości zmiany grubości decyduje stała czasowa układu regulacji naciągów.

Opisane zjawiska towarzyszą również zmianie odstępu walców spowodowanej ekscentrycznością walców, zmniejszając błąd grubości wywołany tym zakłóceniem.

### 9.2. Zmiana naciągu i przeciwciągu wywołana zmianą odstępu walców

Z zasady stałej objętości wyrażonej przez (1.4b) i (1.22) znaleziono (dla  $\Delta h_1 = 0$ ) przyrost prędkości wyjściowej metalu z walców, spowodowany zmianą odstępu walców o wartość  $\Delta h_2 = a_{13} \Delta S_0$

$$\Delta \bar{v}_2(p) = \frac{\Delta \bar{v}_1(p)}{\gamma} - \frac{v_2}{h_2} a_{13} \Delta \bar{S}_0(p)$$

Zmianę prędkości wejściowej  $\Delta v_1$  uwzględniono przyjmując:

$$\Delta v_1 = \Delta v_2 / \beta$$

gdzie:

$$\beta = \frac{v_2(\Delta h_0/h_0 - \Delta h_2/h_2)}{v_1(\Delta h_0/h_0 - \Delta h_1/h_1)}$$

$h_0$  - grubość metalu w płaszczyźnie podziałowej,

$$\Delta \bar{v}_2(p) = - \frac{1}{1 - 1/\beta \gamma} \frac{v_2}{h_2} a_{13} \Delta \bar{S}_0(p). \quad (9.1)$$

Zmiana prędkości  $v_2$  powoduje zmianę naciągu i zmianę prędkości bębna nawijającego. Zależność między prędkością liniową taśmy nawijanej na kręgu, a przyrostem naciągu wyraża równanie wynikające z podstawienia (2.19) oraz

$$\Delta \bar{u}_M(p) = \frac{D_2 k_2}{2} F_2 \Delta \bar{\sigma}_2(p)$$

do równania (2.18). Po podstawieniu otrzymano:

$$\Delta \bar{v}_{zw}(p) = - \frac{F_2 D_2^2 k_2}{4J_2} \frac{T_{M2}}{1+pT_{M2}} \Delta \bar{\sigma}_2(p) \quad (9.2)$$

Odpowiednie równanie dla taśmy rozwijanej z bębna:

$$\Delta \bar{v}_{rw}(p) = \frac{F_1 D_1^2 k_1}{4J_1} \frac{T_{M1}}{1+pT_{M1}} \Delta \bar{\sigma}_1(p) \quad (9.3)$$

Po podstawieniu (9.1) i (9.2) do (2.7a) otrzymano po przekształceniach:

$$s_{17}(p) = \frac{\Delta \bar{\sigma}_2(p)}{a_{13} \Delta \bar{S}_0(p)} = - \frac{1}{1-\beta\gamma-1} \frac{s_w}{C_s h_2} \frac{1 + pT_{M2}}{T_{M2} T_\sigma p^2 + T_\sigma p + \xi_2} \quad (9.4)$$

Analogiczne równania dla przeciwnością:

$$s_{18}(p) = \frac{\Delta \bar{\sigma}_1(p)}{a_{13} \Delta \bar{S}_0(p)} = - \frac{1}{1-\beta\gamma} \frac{s_0}{C_s h_1} \frac{1 + pT_{M1}}{T_{M1} T_\sigma p^2 + T_\sigma p + \xi_1} \quad (9.5)$$

Zmiana grubości spowodowana równoczesną zmianą odstepu walców, naciągu i przeciwnością, obliczona z (1.20) wynosi:

$$\Delta \bar{h}_2(p) = [1 - a_{11} F_1 s_{18}(p) - a_{12} F_2 s_{17}(p)] a_{13} \Delta \bar{S}_0(p) \quad (9.10)$$

Zmiana odstępów walców może być spowodowana ekscentrycznością walców. Dla sinusoidalnego przebiegu tego zakłócenia wpływ zmiany naciągu i przeciwnaciągu, wynikający z (9.10) można przedstawić następująco:

$$\frac{\Delta h_2(j\omega)}{\Delta S_0(j\omega)} = \left\{ 1 - \frac{f_1 \xi_1}{A_1^2 + T_\sigma^2 \omega^2} - \frac{f_2 \xi_2}{A_2^2 + T_\sigma^2 \omega^2} - \right. \\ \left. - j\omega \left[ \frac{f_1 (T_{M1} A_1 - T_\sigma)}{A_1^2 + T_\sigma^2 \omega^2} + \frac{f_2 (T_{M2} A_2 - T_\sigma)}{A_2^2 + T_\sigma^2 \omega^2} \right] \right\}^{a_{13}}$$

gdzie:

$$A_1 = \xi_1 - T_\sigma T_{M1} \omega^2; \quad A_2 = \xi_2 + T_\sigma T_{M2} \omega^2$$

$f_1; f_2$  - współczynniki wynikające z równania (9.10) oraz (9.4) wzgl. (9.5).

Obliczono, że przy praktycznie występujących częstotliwościach zakłócenia, spowodowanego ekscentrycznością walców, dodatkowy wpływ zmian naciągu i przeciwnaciągu powoduje zaledwie kilkuprocentowe zmniejszenie błędu grubości, spowodowanego tym zakłóceniem. W literaturze [10, 45] omówiono właściwe sposoby przeciwdziałania tym zakłóceniom.

## 10. Wnioski dotyczące wyboru i projektowania układów regulacji grubości

Dzięki prostocie, dokładności i stosunkowo niskim kosztom inwestycyjnym, najczęściej stosowany jest, przy walcowaniu na zimno, bezpośredni pomiar grubości.

Wadą bezpośredniego pomiaru grubości jest występowanie, zależnego od prędkości walcowania, opóźnienia transportowego, spowodowanego rozdzieleniem miejsca nastawiania i pomiaru. Opóźnienie transportowe ogranicza stabilność układu regulacyjnego.

W układach z pośrednim pomiarem grubości opóźnienie transportowe jest wyeliminowane. Jako wielkości nastawiane należy

wówczas stosować naciąg lub szybkodziałający (hydrauliczny) napęd nastawiania walców. Ze względu na uchyby systematyczne metody pośredniej, opartej na pomiarze odstepu i nacisku walców, konieczne jest okresowe wprowadzanie korekcji z układu bezpośredniego pomiaru grubości. W wyniku otrzymuje się skomplikowany układ, o stosunkowo małej dokładności pomiaru. Ten system pomiaru jest obecnie stosowany najczęściej na walcowniach ciągłych i na walcowniach grubej blachy.

Pośredni system pomiaru oparty na obliczeniu grubości wyjściowej, na podstawie pomiaru grubości na wejściu walcarki i wydłużenia, okazuje się w praktycznej realizacji skomplikowany i również wymaga kontroli przez porównanie z pomiarem bezpośrednim.

Szereg zalet posiada regulacja z kompensacją najważniejszego zakłócenia wejściowego, jakim jest odchyłka grubości metalu przed przepustem. W tym przypadku celowym jest nastawianie wzmocnienia w gałęzi kompensacyjnej, na podstawie pomiaru grubości metalu po przepuszczeniu. Ten sposób regulacji powinien znaleźć szersze zastosowanie, dzięki swej prostocie i zaletom.

Nastawianie jednej tylko wielkości ogranicza zakres regulacji, dlatego konieczne jest stosowanie regulacji złożonej, np. przez nastawianie odstepu walców i naciągów. W stacjach przejściowych, gdy pracują obydwa układy, konieczna jest synchronizacja ich pracy zapewniająca ograniczenie błędów grubości i uzyskanie żądanych parametrów stanu ustalonego.

Tak ze względów ekonomicznych, jak i ze względu na pewność ruchu, należy dążyć do możliwie prostych układów regulacyjnych. Szczególnie przy małych walcarkach konieczna jest bardzo staranna analiza techniczna i ekonomiczna, ponieważ przy walcowaniu małych kręgów powstają duże straty podczas rozruchu i hamowania. Wówczas złożony układ regulacyjny może znaleźć uzasadnienie, pomimo zwiększenia kosztów inwestycyjnych.

Skuteczność regulacji grubości zależy w równym stopniu od samego układu regulacji, jak i od wejściowych odchyłek grubości, od parametrów konstrukcyjnych walcarki oraz od działania układów regulacji naciągów i prędkości.

Wybór układu regulacji grubości zależy w sposób istotny od rozkładu odchyłek grubości wzdłuż metalu, maksymalnej wartości odchyłek, ich częstotliwości i gradientu, grubości końcowej i tolerancji.

Najczęściej wielkością nastawianą jest odstęp walców. Niezależnie od rodzaju napędu, dobór optymalnej prędkości nastawiania, przystosowanej do spodziewanych odchyłek grubości, tolerancji i programu walcowania odgrywa bardzo istotną rolę.

#### LITERATURA

- [1] Przeróbka plastyczna - walcownictwo - słownictwo i określenia. IMZ - ZPDU 1962.
- [2] Wusatowski Z.: Podstawy walcowania. WGH Katowice 1960.
- [3] Lark E.C.: The rolling of strip sheet and plate. Chapman and Hall, Londyn 1963.
- [4] Orowan E.: The calculation of roll pressure in hot and cold flat rolling. Proc. Instn. Mech. Engrs., 150 (1948), s. 152.
- [5] Müller H.G.: Bedeutung der Grundlagen für die heutige Walz- und Antriebstechnik. Stahl u. Eisen 84 (1964), nr 11.
- [6] Danen G., Oliva L.: Conduite d'un Laminoir á Toles Fortes en Moyen d'un Calculateur. Internationale Eisenhüttentagung, Düsseldorf 1965.
- [7] Sims R.B.: Calculation of Roll Force and Torque in Hot Rolling Mills. Proc. Instn. Mech. Engr., 168 (1954).
- [8] Tretjekow A.W.: Teoria raszczot i isledowanje stanow chłodnoy prokatki. Metalurgia 1966.
- [9] Gorecki W.; Mniszek K.: Wyznaczenie i wpływ stałej sprężystości klatki walcarki kwarto na samoczynne wyrównywanie grubości taśm walcowanych na zimno. Prace Instytutów Hutniczych 19 (1967) nr 2.
- [10] Hagel R.: Wpływ odkształceń sprężystych walcarki na działanie układów regulacji grubości. Problemy Projektowe. W druku.

- [11] Lenze J.; Schliehpake G.; Schoele B.: Neuzeitliche Regelmöglichkeiten für Schnellaufende Tandem Kaltwalzwerke. Blech 1961 nr 11.
- [12] Funke P.: Einfluss von Walzkraft, Walzgeschwindigkeit und Schmierstoffmenge auf die Masshaltigkeit des kaltgewalzten Bandes. Stahl u. Eisen 77 (1957) s. 874-881.
- [13] Marrs R.E.: Recent developments and operating experience in Control of gage and setup of strip mills. Iron and Steel Engr., 39 (1962).
- [14] Briggs P.R.A.: Servo-control of strip thickness in rolling mills. Automation Progress, Sierpień 1958.
- [15] Sims R.B.; Briggs P.R.A.: Control of strip thickness in hot and cold rolling by automatic screwdown. Sheet Met. Ind. 31 (1954), s. 181.
- [16] Biesiekierskij W.A., Popow E.P.: Teoria sistem awtomatycznego regulirowanija. Nauka Moskwa 1966.
- [17] Czjeljustkin A.B., Rozenman E.A.: Awtomatyczeskije uprawleńje prokatnymi stanami. Izd. Cwietnoj Met., Moskwa 1955.
- [18] Byczkow W.P.: Elektropriwod i awtomatizacja metalurgicznego proizwodstwa. Wyd. Wysszaja Szkoła, Moskwa 1966.
- [19] Fajnberg Ju.M.: Awto regulirowanije pri chołodnoj prokatie. Metalurgizdat, 1960.
- [20] Campbell D.P.: Dynamika procesów. PWN Warszawa 1962.
- [21] Grzybowski W.: Kompensacja składowej dynamicznej i wpływu strat mechanicznych w nawrotnych walcarkach taśmy. Zeszyty Naukowe AGH w Krakowie, Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa nr 12 (1957).
- [22] Magnetic hardness gage measures strip at Gary sheet and tin. Iron and Steel Engr. 41 (1964) nr 1.
- [23] Fox T.A.: Strip mill shape and contour control. Iron and Steel Engr. 1966 r., nr 7.
- [24] Hagel R.: Opracowanie i budowa urządzenia do pomiaru metodą stykową grubości taśm zimnowalcowanych. IMZ, Sprawozdanie nr 735.
- [25] Brodskij I.A.: Eksploatacja priborow dla awtomatycznego kontrolija tołszczyzny lenty pri prokatie. Dokład na Wsiesojuznom Sowieszczanii po Awtomatizacji Proizwodstwiennych Processow, Magnitogorsk 1956.
- [26] Grüner H.: Untersuchungen über maschinenbedingte Einflüsse auf die Gleichmässigkeit kalt gewalzter Bänder. Stahl u. Eisen 77 (1957), nr 6.
- [27] Albrecht G.: Verfahren und Geräte zur berührungslosen Bandstahl-Dickenmessung. Industrie - Anzeiger 78 (1956).

- [28] Czeljustkin A.B.: Niepreriwnyj kontrol razmierow profilja w processe prokatki. Jak 25.
- [29] Kieper Z.: Banddickenmessgeräte für Walzwerke. ZfMStR 4 (1961), nr 10.
- [30] Hessenberg W.C.F., Sims R.B.: The principles of continuous gauge control in sheet and strip rolling. Proc. Inst. Mech. Eng. (A) 166 (1952), nr 1.
- [31] Sims R.B.: Vorrichtung zum Erfassen der Abweichung der Ist-Dicke von der Soll-Dicke von aus einer Walzeinrichtung austretendem Walzgut. Patentschrift nr 977352, wyd. styczeń 1966 NRF.
- [32] Fibieg E.: Banddickenregelungen bei Kaltwalzwerken. AEG. Mitteilungen 49 (1959) nr 12 oraz Blech 1961 nr 11.
- [33] Lueg W., Funke P.: Eine rechnerische Betrachtung über den Einfluss der Walzgeschwindigkeit auf Walzkraft und Banddicke beim Kaltwalzen. Stahl und Eisen 77 (1957), nr 20.
- [34] Maxwell H.S.: Automatic Thickness regulator for strip rolling mills. US Patent 3, 186, 200.
- [35] A fresh approach to automatic gage control on rolling mills. AISE Yearly Proceedings 1960, s. 235.
- [36] Hütte, wyd. 5, Berlin 1961, rys. 9, s. 999.
- [37] Sujarow D.I., Benjakowskij M.A.: Kacstwo tonkich stalnych listow. Izd. Metallurgija Moskwa, 1964.
- [38] Jones S.J., Sills R.M.: The use of frequency - Response tests in the analysis of a foil mill automatic gage control. AJEE Transactions Applications and Industry, maj 1959.
- [39] Steinbrecher O.: Neuzeitliche Banddickenregelungen für Kaltwalzwerke. Bänder Bleche Rohre, 1966, nr 4.
- [40] Wallace J.: Fundamentals of strip mill automatic gage controll systems. Iron a. Steel Engineer, Year Book 1964, s. 752.
- [41] Ullmann J.: Digitale Dickenregelung bei Kaltwalzwerken Blech, 1963, nr 4.
- [42] Kenyon A.K.: Automatic gage control on reverssing cold strip mills. Iron Steel Engr., 1961, t. 38, nr 8.
- [43] Doganowskij S.S., Iwanow W.A.: Ustrojstwa zapazdywanja i ich primienienie w awtomatycznych sistemach. Izd. Maszynostrojenie, Moskwa 1966.
- [44] Feldbaum A.A.: Wycisliatelnyje ustrojstwa w awtomatycznych sistemach. Fizmatgiz, Moskwa 1959.
- [45] Hagel R.: Optymalizacja procesu walcowania blachy przez automatyzację. IMŻ Sprawozdanie nr R-1576.

- [46] Wright W.G.: Modeling Steel mills on a digital computer. Iron and Steel Engr. 1962, nr 3.
- [47] Hagel R.: Opracowanie i zbadanie układu automatycznej regulacji grubości taśmy w procesie walcowania. IMŻ, Sprawozdanie nr B-1508.
- [48] Hagel R., Żyła F.: Opracowanie automatycznej nastawy walców dla walcarki nawrotnej taśmy zimnej. Sprawozdanie IMŻ, nr 1133.
- [49] Hagel R.: Układy numerycznego programowania w zastosowaniu do walcowni wstępnego przerobu. Praca doktorska, Gliwice, 1962.
- [50] Kriz J.: Automatická regulace tloušťky pásu při válcování za studena. Hutnické listy, 1966, nr 8.
- [51] Hagel R., Jońca J., Kazior Z.: Pośrednie pomiary nacisków podczas walcowania. Prace IH 1959, nr 2.
- [52] Hagel R.: Magnetoelastické snímace pro měření namáhání. Hutnické listy, 1962, nr 2.
- [53] Hagel R., Gołek J.: Pomiary napędów zimnej walcarki nawrotnej. Prace IH, 1959, nr 2.
- [54] Hagel R., Jońca J.: Selsynowy układ nadążny do pomiaru położenia górnego walca zgniatacza. Prace IH, 1962, nr 2.
- [55] Hagel R.: Automatyczna nastawa walców z cyfrowym programowaniem. Archiwum Automatyki i Telemechaniki, t. VII, 1962, nr 3-4.
- [56] Modelowanie Regulacji Nastawy Walców Walcowni Zgniatacz Huty Warszawa. Biprohut. Praca nr S 3001903.
- [57] Porębski Jan: Określenie algorytmu dla układu sterującego procesem walcowania na zimno. Praca doktorska AGH Kraków, 1966.

#### STRESZCZENIE

Nowoczesne tendencje zmierzają do automatyzacji kompleksowej procesu walcowania, obejmującej całość czynności związanych z produkcją na danym obiekcie. Stwarza to konieczność rozpatrywania walcarki jako całości, od procesów zachodzących w szczelinie walców począwszy, a na współpracy napędów i układów regulacji kończąc.



W pracy autor przedstawia sposób identyfikacji walcarki nawrotnej, umożliwiający ocenę działania wielkości nastawianych i zakłóceń w stanach ustalonych i nieustalonych. Posługując się wyprowadzonymi transmitancjami szczeliny walców i opisem matematycznym, opartym na linearyzacji równań opisujących proces walcowania, opracowano schemat blokowy walcarki ze sprzężeniami zwrotnymi, pomiarem i kompensacją zakłóceń. Na podstawie przedstawionego schematu blokowego, obliczono transmitancje walcarki, uwzględniające zarówno transmitancje szczeliny walców jak i transmitancje członów układów regulacji. Dalej uzupełniono schemat blokowy walcarki, rozszerzając go na napędy bębnowe. Ten schemat, wraz z obliczonymi transmitancjami dla naciągu, umożliwił analizę dynamiki naciągu i przeciwnaciągu, z uwzględnieniem wpływu zakłóceń występujących w procesie. Przedstawiony sposób identyfikacji walcarki autor zastosował do analizy i porównania znanych systemów regulacji grubości i do badania dynamiki procesu przy złożonej regulacji grubości. Wynikające stąd ogólne wnioski, stanowią podstawę dla wyboru i projektowania systemów regulacji grubości walcarek nawrotnych. Wnioski wynikające z analizy przebiegów błędu grubości i naciągów podczas zmiany odstępu walców, z uwzględnieniem napędu o nastawianej i nienastawianej prędkości, zawierają nowe informacje o działaniu złożonych układów regulacji grubości.

## ИЗМЕРЕНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОЛОСЫ В ПРОЦЕССЕ РЕВЕРСИВНОЙ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

### Р е з ю м е

В работе приведены связи существующие в процессе прокатки между электрическими и электромеханическими величинами с одной стороны, и технологическими параметрами с другой стороны.

На основании точного анализа технологии прокатки разработана математическая модель прокатного стана, как сложного многопараметрного объекта регулирования. Введены соответственные передаточные функции, разработана блок схема прокатного стана с измерением и компенсацией помех.

Пользуясь математической моделью прокатного стана как объектом регулирования произведен анализ и сравнение систем регулирования толщины путем установки натяжений, путем настройки межвалкового зазора и путем совместного регулирования натяжением и межвалковым зазором. Отдельно подвергнуто анализу влияние транспортного запаздывания на систему регулирования при непосредственном измерении толщины полосы.

Приведен анализ косвенного измерения толщины полосы.

В части посвященной динамике процесса прокатки рассмотрено действие сложных систем регулирования толщины и динамические процессы происходящие во время прокатки с натяжением. Подвергнуто анализу также явления выступающие при совместной работе систем регулирования натяжением и межвалковым зазором, указывая на необходимость синхронизации изменения межвалкового зазора и натяжения.

В итоге приведены указания по выбору и проектированию систем регулирования толщины полосы.



# GAUGE MEASUREMENT AND CONTROL IN REVERSING COLD STRIP MILLS

## S u m m a r y

In the paper relationships between electrical and electro-mechanical quantities and technological parameters are given. Mathematical model of a rolling mill as a multivariable process is presented on the basis of an analysis of rolling technology. Transfer functions are derived and an equivalent network circuit of rolling mill with feedbacks, measurement and compensation of external random disturbances is described. On the basis of a mathematical model of single stand reversing mill, various automatic gauge control systems (screw control, tension control and combined methods) are analyzed and compared. Time lag in thickness measuring systems is also considered. An analysis of indirect thickness measurement systems is presented.

The chapter "Process dynamics" deals with theoretical approach to the problems of combined control systems (screw and tension) and dynamics of rolling with tension. The need of synchronisation of screw and tension settings is pointed out. Recommendations for selection and design automatic gauge controls systems are given.

## ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

ukazują się w następujących seriach:

- A. AUTOMATYKA
- B. BUDOWNICTWO
- Ch. CHEMIA
- E. ELEKTRYKA
- En. ENERGETYKA
- G. GÓRNICCTWO
- IS. INŻYNIERIA SANITARNA
- MF. MATEMATYKA-FIZYKA
- M. MECHANIKA
- NS. NAUKI SPOŁECZNE

Dotychczas ukazały się zeszyty  
serii E.

- Elektryka z. 1, 1954 r., s. 76, zł 9,10
- Elektryka z. 2, 1956 r., s. 82, zł 11,—
- Elektryka z. 3, 1956 r., s. 102, zł 14,50
- Elektryka z. 4, 1957 r., s. 113, zł 21,75
- Elektryka z. 5, 1959 r., s. 152, zł 20,—
- Elektryka z. 6, 1960 r., s. 131, zł 23,45
- Elektryka z. 7, 1961 r., s. 42, zł 3,40
- Elektryka z. 8, 1961 r., s. 147, zł 11,30
- Elektryka z. 9, 1961 r., s. 128, zł 26,25
- Elektryka z. 10, 1961 r., s. 52, zł 3,90
- Elektryka z. 11, 1961 r., s. 128, zł 22,80
- Elektryka z. 12, 1962 r., s. 162, zł 12,20
- Elektryka z. 13, 1962 r., s. 127, zł 9,80
- Elektryka z. 14, 1963 r., s. 157, zł 9,40
- Elektryka z. 15, 1963 r., s. 58, zł 3,50
- Elektryka z. 16, 1963 r., s. 219, zł 11,40
- Elektryka z. 17, 1964 r., s. 272, zł 15,60
- Elektryka z. 18, 1964 r., s. 161, zł 8,30
- Elektryka z. 19, 1964 r., s. 119, zł 6,50
- Elektryka z. 20, 1966 r., s. 184, zł 13,—
- Elektryka z. 21, 1966 r., s. 263, zł 16,—
- Elektryka z. 22, 1967 r., s. 114, zł 7,—

BIBLIOTEKA GŁÓWNA  
Politechniki Śląskiej

P 3347 / 68

Cena zł 7,-