

Wacław NIEMIEC

## ANALIZA UKŁADÓW STEROWANIA ADAPTACYJNEGO PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

**Streszczenie.** Przedyskutowano w publikacji definicję pojęcia - "Sterowanie adaptacyjne", podając własną definicję tego sterowania. Analizę tę poparto rozwiązaniami przemysłowych układów sterowania adaptacyjnego.

### 1. Wstęp

Obiekty sterowania w szeregu procesach wszystkich branż przemysłowych są nieliniowe i niestacjonarne. Zastosowanie klasycznego sterowania nie prowadzi do pożądaných wyników. Przez określony opis procesów można wykazać, że zastosowanie sterowania adaptacyjnego może polepszyć dobroć regulacji procesu - zmniejszyć błędy i poprawić dynamikę przebiegów nieustalonych. U podstaw koncepcji sterowania adaptacyjnego znajdują się takie oddziaływania na proces, przy pomocy których można skompensować:

- I - zmiany parametrów procesu (zmiany stałej czasowej, czasu martwego i wzmoocnienia),
- II - wpływ nieliniowości statycznych i dynamicznych,
- III - wpływ zakłóceń wewnętrznych i zewnętrznych.

### 2. Zagadnienie adaptacji

Sterowanie adaptacyjne jest przedłużeniem sterowania klasycznego. Pętla podstawowa regulacji - klasyczna, jest uzupełniona układem dopasowującym, realizującym zagadnienia adaptacji. Biorąc pod uwagę brak ujednoliconego poglądu na zagadnienie adaptacyjnego sterowania, zestawiono definicje znalezione w najbardziej reprezentatywnej literaturze: [1 - 7]

#### a) Zgodnie z [1]:

" Jako układ regulacji adaptacyjnej rozumiemy taki układ, którego własności (parametry, struktury, własności sygnałów wejściowych) są zmienne lub a priori nieznanne, zaś te własności układu, na które można wpływać nstawiane są automatycznie w myśl założonego kryterium dobroci".

b) Podobnie w [2]:

" Pod pojęciem adaptacyjnego układu regulacji rozumiemy taki układ, którego określone własności (najczęściej struktura lub parametry obiektu, lub też jego sygnały wejściowe) zmieniają się w sposób z góry nieokreślony, a inne dostępne własności układu (najczęściej własności regulatora, np.: jego struktura lub parametry) są nastawiane samoczynnie dla utrzymania pożądanych warunków pracy układu".

c) W myśl [3]:

"Jako układ adaptacyjny rozumiemy taki, w którym dokonujemy pomiaru pewnego wskaźnika jakości, używając wejść, stanów i wyjść strojonego układu regulacji.

Na podstawie porównania zmierzonych i zadanego wskaźnika jakości, mechanizm adaptacji modyfikuje parametry strojonego układu lub generuje pomocnicze sygnały wejścia dla zachowania bieżącego wskaźnika jakości zgodnym z zadaniem".

d) Również [4] podaje następującą definicję J.Z. Cypkina:

"Przez adaptację, rozumiemy proces o zmiennych parametrach lub strukturze, możliwy do sterowania na bazie informacji otrzymanych podczas poprzedniego okresu sterowania, gdy warunki procesu są w stanie początkowym niekompletnie zdefiniowane lub zmienne".

e) W rodzimej literaturze zgodnie z [5]:

"Układy adaptacyjne stanowią grupę układów sterowania, których własności dynamiczne są dostosowywane do aktualnych warunków pracy obiektu, zmieniających się w sposób nieprzewidziany a priori. Dostosowywanie się polega najczęściej na odpowiednim nastrojeniu parametrów regulatora lub zmianie jego struktury".

Autor dzieli działanie układów adaptacyjnych na: [5]

- adaptacyjną identyfikację,
- adaptacyjne nastrojenie parametrów regulatora w układach:
  - z otwartym torem adaptacji (kompensowanie zakłóceń)
  - z zamkniętym torem adaptacji (sterowanie wg zadanych własności dynamicznych).

Autor nie zalicza do sterowania adaptacyjnego układów sterowania ekstremalnego, tworząc z nich osobną nieadaptacyjną grupę.

f) Znana książka "Sterowanie i systemy dynamiczne" - Y. Takahashi i inni [6] zawiera następujące określenia:

"Pojęcie adaptacji stosuje się do klasy układów sterowania automatycznego, które mają zdolności automatycznego pomiaru własności dynamicznych procesu i automatycznego przestrajania (lub zmian) algorytmu sterowania".

g) Najogólniejszą, ale za to najmniej precyzyjną definicję układu sterowania adaptacyjnego podają Mishkin i Braun w [7]:

"Układem adaptacyjnym będzie każdy układ fizyczny, który jest rozpatrywany z adaptacyjnego punktu widzenia".

Wobec takiej różnorodności podejścia do pojęcia adaptacji, dla celów niniejszej publikacji przyjęto następującą definicję sterowania adaptacyjnego:

" Pod pojęciem sterowania adaptacyjnego będziemy rozumieć relację pewnego wskaźnika jakości lub przebiegów dynamicznych, w stosunku do zadanych wartości tych wielkości, do realizacji których używamy wejść, wyjść i stanów sterowanego układu regulacji".

W powyższej definicji pod adaptacyjnie sterowanym układem regulacji rozumiemy taki, który jest zdolny do modyfikacji swych parametrów lub też wewnętrznej struktury, jak również modyfikacji swych sygnałów wyjścia (wejścia w przypadku obiektów zlinearyzowanych).

Dla sprawdzenia słuszności powyższej definicji sterowania adaptacyjnego, przy jego realizacji w układach przemysłowych, oraz stworzenia modelu strukturalnego sterowania adaptacyjnego, rozważano następujące przykłady układów sterowania.

### 3. Adaptacja w przemysłowych rozwiązaniach układów regulacji

#### 3.1. Regulacja adaptacyjna powrotnika klatki walcowni pielgrzymowej [8]

Przy produkcji bezszwowych dużych rur na walcowni pielgrzymowej istnieją wysokie jakościowe wymagania odnośnie stanu powierzchni i dokładności grubości ścian. Podczas pracy walcarki pielgrzymowej występują następujące trzy fazy:

- przyspieszenie materiału walcowanego do szczeliny walcowniczej,
- hamowanie,
- pozycja tulei przed uchwyceniem przez walce.

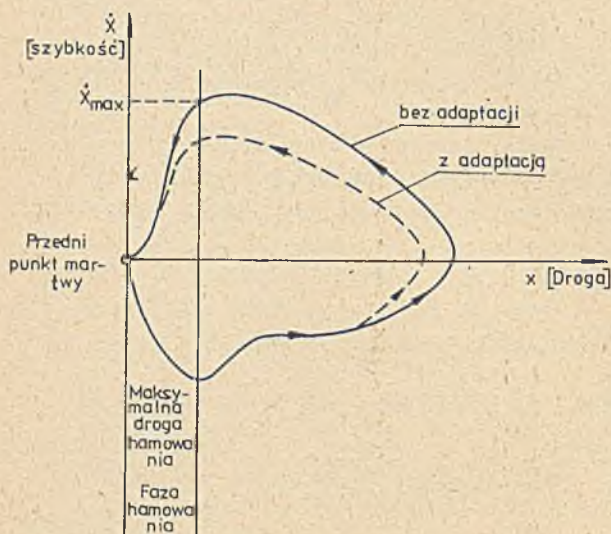
Konieczność adaptacji wynika z takiego sterowania przebiegu powrotnika (jego przyspieszeń i hamowań) by dojście do "przedniego martwego punktu" odbywało się z optymalną szybkością i dokładnością. Ten "martwy punkt" musi być osiągnięty z dokładnością  $\pm 0,1\%$  drogi powrotnika (rys. 1), krótko przed uchwyceniem elementu przez walce.

System regulacji obejmuje regulator położenia, a więc regulator hamowania i regulator przyspieszenia z wymaganymi urządzeniami pomocniczymi. Optymalizacja szybkości, zabezpieczona techniką adaptacyjną, jako problem regulacyjny powstała ze względu na duże zmiany masy materiału walcowanego (o 2 do 8 ton) i na gruncie zmiennej siły tarcia rury (5-30% wydajności kompresyjnej wyciskającego przebijaka). Uwzględnić również należy wielkość ciśnienia w systemie hamulcowym oraz ograniczenia zwłoki czasowej

podczas hamowania. Całkowity przebieg powrotnika i walców odbywa się w ciągu 0,7-1 [s], przy czym faza hamowania trwa 100-150 [ms]. Czasowo zmienne wielkości walcarki pielgrzymowej to:

- zmiany masy tulei,
- zmiany masy przebijaka,
- zmiany siły tarcia rury za klatką walcowniczą,
- różne drogi powrotne walców.

Zmiany masy i siły tarcia, źle dopasowane ciśnienie w komorze powietrznej, prowadzą do silnych zmian prędkości po fazie przyspieszenia. Małe różnice prędkości mogą być wyregulowane przez odpowiednie ustawienie regulatora hamowania. Duże zmiany szybkości jako następstwo zmiennej siły tarcia są kompensowane tylko przez adaptację ciśnienia w komorze przyspieszającej. Ta adaptacja służy żądanej optymalizacji szybkości całego biegu powrotnika. Optymalne trajektorie dla czasowo zmiennych wielkości są wyliczane i podawane w formie sygnałów dla regulatorów położenia i hamowania.



Rys. 1. Przebieg ruchu powrotnika z adaptacją i bez adaptacji

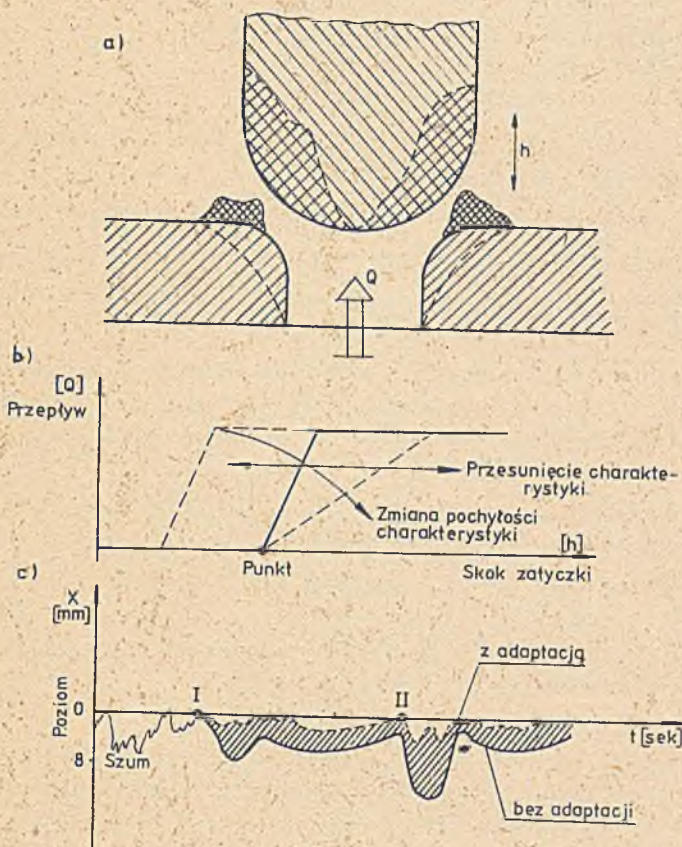
Z rys. 1 widać, że adaptacja obniża maksymalną szybkość hamowania oraz zmniejsza drogę powrotnika.

### 3.2. Regulacja adaptacyjna stanowiska wlewniczego instalacji ciągłego odlewania [9]

Do stosowanych tu urządzeń można zaliczyć kołowe i owalnołukowe maszyny odlewnicze pracujące z rozdzielaczem. Z kadzi płynie stal przez otwór z żerdzią zatykową w rozdzielaczu, w którym odpowiednio przyporządkowane strugi płyną do chłodzonych wodą krystalizatorów [10]. Wpływ stali z rozdzielacza (1 - 5 [ton/min]) jest określony pozycją ceramicznego korka o napędzie hydraulicznym. Ceramiczny materiał organu wykonawczego o charakterystyce zaworu posiada przy tak wysokiej temperaturze stali bardzo małą wytrzymałość mechaniczną.

Plastyczne odkształcenia prowadzą do dużych zmian charakterystyk organu wykonawczego i stąd do zmiany wzmocnienia w pętli regulacyjnej. Charakterystyka ceramicznego organu wykonawczego zmienia się podczas dwugodzinnego czasu odlewania stale, przy czym skokowa zmiana charakterystyki na-

stępuje przez obłamanie części ceramicznej korka, co prowadzi do przesunięcia punktu zerowego przepływu.



Rys. 2. Zmiana charakterystyki zatyczki regulacyjnej

- a) uszkodzenie zatyczki b) wywołane nimi zmiany charakterystyki zatyczki  
 c) dynamika zmiany poziomu w maszynie odlewniczej (reakcja na zaburzenie)  
 I - zaburzenie w postaci zmiany poziomu wlewnego metalu (o 50%), II - zaburzenie w postaci dynamicznej zmiany punktu zerowego przepływu (o 30%)

Dla uzyskania właściwego wskaźnika regulacji poziomu w kadzi należy uwzględnić zmiany charakterystyki zatyczki (rys. 2a):

- zmiany pochyłości charakterystyki przy zachowaniu punktu zerowego przepływu (rys. 2b),
- przesunięcie całej charakterystyki, więc także punktu zerowego przepływu (rys. 2b).

Efekty uzyskane przez wprowadzenie regulacji adaptacyjnej, kompensującej omawiane wpływy pokazuje rys. 2c.

### 3.3. Adaptacyjne sterowanie procesem walcowania blach grubych [11]

Zadaniem sterowania w procesie walcowania blach grubych jest takie ustalenie planu przebiegów, aby zapewnić:

- a) - utrzymanie osi blachy zgodnej z osią wlewka,
  - odwalcowanie poprzeczne do osi wlewka,
  - odwalcowanie pasma bez poszerzania,
- b) - pokłamanie zgorzeliny w pierwszych przepustach (odpowiednie włączenie natrysków zbijających zgorzelinę),
- c) - jak najmniejsze wpływy boczne (dobranie momentu rozszerzania)
- d) - prostokątny kształt blachy poprzez dobór nacisku walców,
- e) - regulowanie temperatury końca walcowania (przerobu) w ostatnich przepustach,
- f) - odpowiednie stopniowanie nacisków w przepustach wykańczających, umożliwiające osiągnięcie grubości blachy z określoną dokładnością przy minimalnej wypukłości blachy oraz niedopuszczenie do jej pofałdowania.

W rzeczywistości realizacja wyżej przedstawionych zadań napotyka na trudności, gdyż występują różnice pomiędzy:

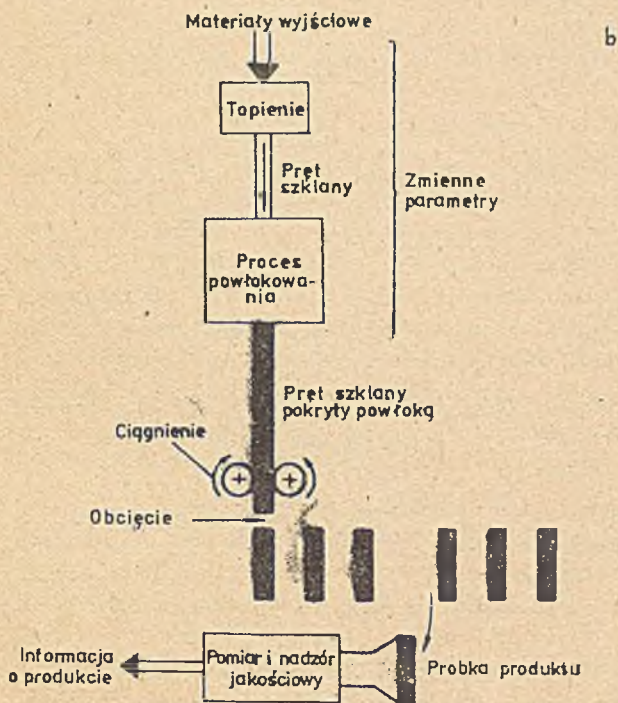
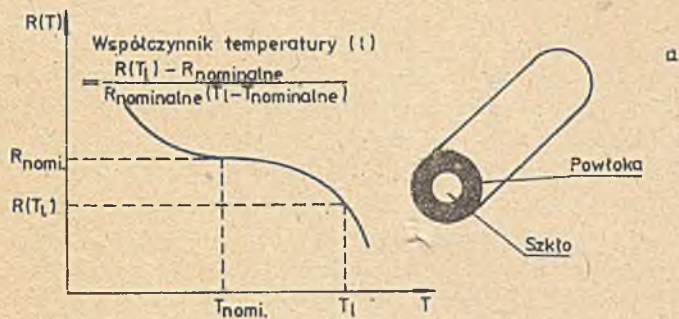
- zadanymi i rzeczywistymi nastawami walców,
- wyliczonym, a zamierzonym naciskiem,
- temperaturą wyliczoną wstępnie, a skorygowaną na podstawie rzeczywistego przebiegu walcowania,
- grubością końcową, wyliczoną i zmierzoną.

Sterowanie adaptacyjne jest tu oparte na sprzężeniu zwrotnym od czujników mierzących charakterystyczne wielkości procesu. Adaptacja ma na celu takie korygowanie przebiegu procesu walcowania, aby odbywał się on zgodnie z ustalonym planem przepustów. W przypadku zbyt dużych błędów, może nastąpić przeliczenie planu dla kilku przepustów - zwłaszcza przy nieosiągnięciu szerokości. Ze względu na dużą ilość danych i skomplikowane przeliczenia sterowanie adaptacyjne prowadzone jest przez maszynę cyfrową.

### 3.4. Adaptacyjne sterowanie procesu pokrywania szkła metalową powłoką [12]

W procesie tym, szkło jest pokrywane metalową warstwą konduktywną. Pokrywany pręt szklany jest następnie użyty w produkcji stabilizowanych, wysokowytrzymałych rezystorów. Rys. 3 przedstawia pręt szklany pokryty warstwą przewodzącą oraz charakterystykę termiczną rezystancji otrzymanego w ten sposób produktu.

Proces pokrywania pręta jest pokazany schematycznie na rys. 3b.



Rys. 3a. Produkt i charakterystyka temperaturowa jego rezystancji b. Schemat procesu powłokowania prętów szklanych

Materiały wyjściowe szkła są topione w formach, w których otrzymujemy znormalizowane ciągłe pręty. Pręt przechodzi przez układ pokrywający warstwę metaliczną, osadzaną w myśl określonej technologii, która zależy od:

- rozwiązania przepływów osadzających warstwę powłokową (kombinacji przepływów),
- komponentów,
- temperatury i innych zmiennych.

Najważniejszą charakterystyką jest charakterystyka temperaturowa rezystancji pokazana na rys. 3a - musi ona posiadać z góry zadany przebieg.

Zależność zmian rezystancji z temperaturą jest regulowana poprzez sterowanie parametrami procesu powłokowania. Po pokryciu powłoką, pręt jest obcinany na określoną długość i przesyłany do następnych operacji określonych produkcją rezystorów. Próbkę produktu pobierane okresowo i ich parametry są mierzone dla otrzymania informacji o jakości produktu. Proces posiada wielowymiarową naturę, ze względu na sprzężenia skrośne między 8 wyjściami i 19 wejściami sterującymi. Największe odchylenia parametrów produktu od normy jak stwierdzono - pochodzą od zmiany przepływów osadzających warstwę powłokową.

Zadaniem adaptacji jest bieżące wyznaczenie (za pomocą komputera pracującego "on-line") nieznanych parametrów przepływów osadzających.

### 3.5. Adaptacyjne sterowanie młyna kulowego [13]

Młyn posiada obracający się bęben, który w 10-20% swej objętości wypełniony jest stalowymi kulami. Proces mielenia przebiega wzdłuż bębna, który obraca się ze zmienną szybkością. Siła odśrodkowa (określona liczbą obrotów młyna) powoduje wznoszenie mielonego medium do pewnej wysokości, a następnie jego swobodne opadanie. Energia rozdrabniająca - tylko w pewnej niewielkiej części wykonuje właściwą pracę, reszta jest tracona w postaci energii cieplnej. Młyn pracuje w układzie dzielącym materiał zmielony na:

- materiał o wystarczającej dobroci zmielenia  $x_{fg}$  (tony/godzinę),
- pozostałość - grys  $x_g$  (tony/godzinę), który będzie z powrotem podany na wejście do młyna.

Podział następuje w cyklonie - rozdzielaczu.

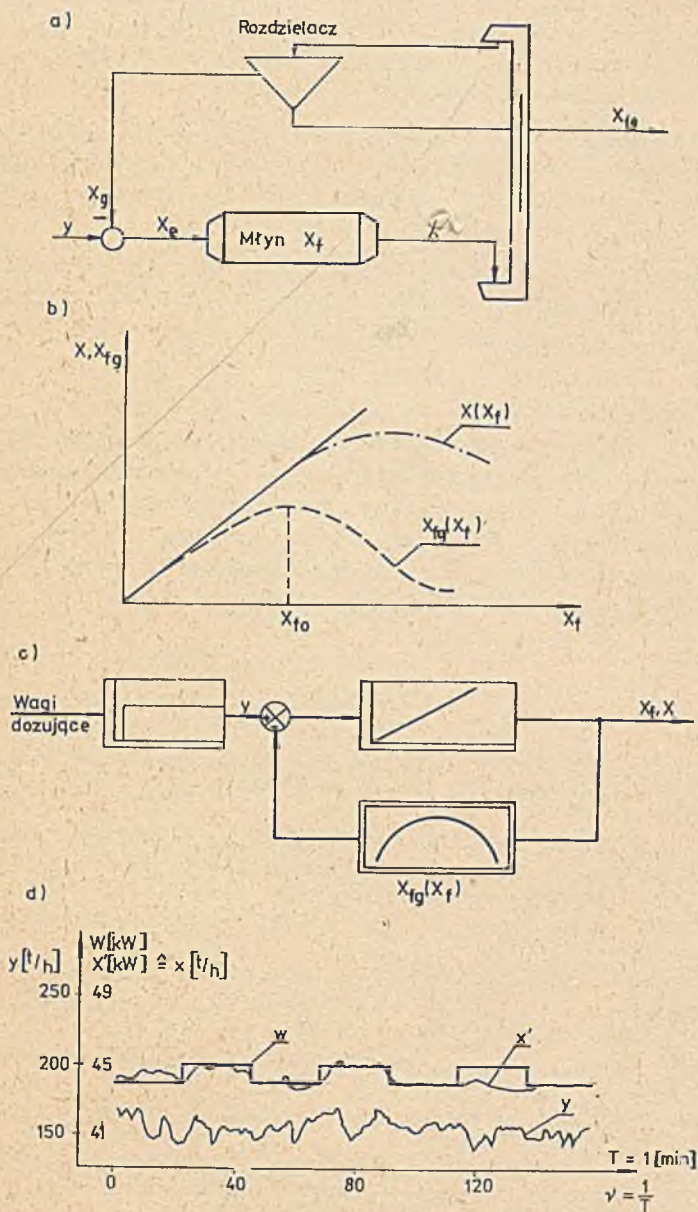
Schemat działania układu młyna kulowego przedstawia rys. 4a. Wyjście z młyna  $x$  (tony/godzinę) jest w interesującym zakresie przybliżone przez stopień wypełnienia młyna. Szacunkowy przebieg  $x_f$ ,  $x_{fg}$  przedstawia rys. 4b.

Między stopniem wypełnienia, a wyjściami z młyna, istnieje nieliniowa zależność. Przy niskim stopniu wypełnienia młyna stosunek tych wielkości wynosi 1 : 1, a maksimum osiągane jest dla  $x_f = x_{f0}$ . Stopień wypełnienia określa w przybliżeniu całkę (po czasie) z różnicy  $y$  (tony/godzinę) i  $x_{fg}$  (tony/godzinę), co zachodzi dzięki liniowej zależności  $x$  i  $x_f$  w pewnym zakresie (rys. 4b). Z dotychczasowych rozważań przy zanedbywalnym czasie transportu (1-3 min) do młyna i innych przebiegów czasowych podczas mielenia, otrzymujemy model procesu pokazany na rys. 4c.

Powyższe rozważania pozwalają wyciągnąć wnioski:

- a) Praca młyna powinna być prowadzona w punkcie maksimum  $x_{fg}$  (pobór mocy przez napęd winien być stały).
- b) Przy dodatnich odchyleniach od zadanych wartości  $x_{f0}$ , układ przechodzi w stan niestabilny i to zarówno pod względem wydajności produkcji jak i poboru mocy mielenia. Dla takiego procesu pożądana jest więc szybka regulacja (mimo dużych stałych czasowych).





Rys. 4a. Schemat działania układu młyna kulowego:

y - doprowadzona gruboziarnista postać tłuczni, x - postać wyjściowa produktu z młyna,  $x_{fg}$  - pożądana postać pyłu wyjściowego młyna,  $x_g$  - grys,  $x_e$  - postać wejściowa surowca do młyna (tłuczeń + grys),  $x_f$  - stopień wypełnienia młyna (stopień zmielenia)

b. Postać wyjściowa produktu z młyna (x) i jego pożądana postać ( $x_{fg}$ ) jako funkcja stopnia wypełnienia młyna.

c. Schemat blokowy młyna kulowego

d. Dynamika przemiału młyna kulowego

c) Ze względu na zużycie kul wymagany jest możliwie spokojny przebieg wielkości  $x$  (obrotów bębna młyna).

Spełnienie wymagań przedstawionych w punktach a,b,c jest zagadnieniem skomplikowanym, ponieważ stosowanymi w praktyce wielkościami sterującymi są obroty bębna młyna i stopień wypełnienia. Regulacja winna więc rozwiązywać zmiany:

- stopnia wypełnienia dla uzyskania właściwego  $x_{fg}$ , w zależności od stopnia twardości surowca,
- wartości stopnia wypełnienia w zależności od stanu zużycia kul mielących,
- obrotów młyna.

Jest to więc typowy przykład obiektu regulacji, w którym występują zmiany zarówno obiektu jak też sygnału wejściowego. Przebiegi czasowe charakterystycznych wielkości młyna kulowego przedstawia rys. 4d.

Ze względu na powyższe własności, regulację młyna kulowego rozwiązano w oparciu o technikę adaptacyjną z użyciem komputera, który do oszacowania wartościowo postaci modelu adaptuje bieżąco parametry regulatora.

#### LITERATURA

- [1] H. UNBEHAUEN, CH. SCHMID - Industrielle Anwendung Adaptiver Systeme VDI/VDE - Gesellschaft für Mess- und Regelungstechnik. 2/3. April 1973 Freiburg, Universität.
- [2] W. WEBER - Adaptive Regelungssystem. 1971 r. Oldenburg, München.
- [3] I.D. LANDAU - A survey of Model Reference Adaptive Techniques - Theory and Applications. Automatica Vol 10/1974 p.p. 353-379.
- [4] J.Z. CYPKIN - Adaptation and Learning in Automatic Systems Vol 73. Akademik Press. New York 1971.
- [5] J. GUTENBAUM - Problemy teorii regulatorów, WNT Warszawa 1975 r.
- [6] Y. TAKAHASHI, M.J. RABINS, D.M. AUSLANDER - Sterowanie i systemy dynamiczne. WNT, Warszawa 1976 r.
- [7] E. MISHKIN, L. BRAUN - Adaptacyjne układy sterowania automatycznego - WNT Warszawa 1965 r.
- [8] W. WEBER - Regulacja adaptacyjnego powrotnika klatki walcowni pielgrzymowej. Interkama 1974 r.
- [9] W. BRÜDLER, P. SCHIEFER, W. WEBER - Dynamische Probleme bei der Gießspiegelregelung einer Stranggießanlage Regelungstechnische Praxis und Prozess-Rechentechnik. 14 (1974) s. 77-112.
- [10] K. FILASIEWICZ - Technologia metali. WNT, Warszawa 1964 r.
- [11] Materiały adaptacyjnego sterowania walcowni blach grubych Huty "Batory" 1977 r.
- [12] R.L. THOMAS - Adaptive computer control of a glass coating process. Proceedings of the IFAC 5-th World Congress. Paris. France.
- [13] R. SCHULZ - Application of adaptive Methods for the Digital Control of Ball Mills, VDI/VDE - Gesellschaft für Mess- und Regelungstechnik 2/3. April (1973) Freiburg, Universität s. 57-73.

## АНАЛИЗ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

## Р е з ю м е

В статье обсуждено определение понятия "Управление адаптивных систем", представляя собственное определение этого управления. Анализ обоснован решениями промышленных адаптивных систем управления.

## THE ANALYSIS OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS OF INDUSTRIAL PROCESSES

## S u m m a r y

In the paper the definitions of the notions of "adaptive control" have been discussed, and the author's own definition proposed. This analysis was supported with the industry-scale solutions of adaptive control systems.