

074

ZESPÓŁ AUTOMATYKI ELEKTRONICZNEJ

A

Nazwa ONB/ZNB

Główny wykonawca ..... mgr inż. Zbigniew Pietrusiński ..... *Pietrusiński*

Wykonawcy: ..... mgr inż. Zbigniew Pietrusiński .....

Metoda adaptacji parametrów regulatorów mikroprocesorowych

Etap 1: Przygotowanie algorytmów adaptacji do badań oraz sprecyzowanie metodyki badań

(Tytuł pracy, numer i tytuł etapu)

Zleceniodawca ..... Komitet Badań Naukowych .....

..... projekt badawczy promotorski .....

Kierownik Zespołu

Z-ca Dyrektora d/s Bad.-Rozw.

*J. Korytkowski*  
.....  
doc. dr inż. J. Korytkowski*Jan Jabłkowski*  
.....  
dr inż. Jan Jabłkowski

Pracę zakończono dnia ..... 30.06.1997r. ....

Nr arch. .... 7439 .....

Nr zlecenia ..... 1771G .....

## Analiza deskrytorowa

REGULATORY ELEKTRONICZNE + OPROGRAMOWANIE:  
ADAPTACJA

## Abstrakt

Praca zawiera sprecyzowanie metody i określenie zakresu badań algorytmów adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych, będących przedmiotem przygotowywanej rozprawy doktorskiej pt. „Metoda adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych”.

## Tytuły poprzednich sprawozdań

1. Opracowanie analityczne i sprawdzenie doświadczalne podstawowych tez metody adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych w oparciu o analizę widma odchyłki regulacji.  
Etap 2: Opracowanie pierwszej redakcji pracy doktorskiej:  
„Metoda adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych”.  
Sprawozdanie z pracy PIAP nr arch. 7258

## Rozdzielnik

Egz. 1. .... OIN .....

Egz. 2. .... ZAE .....

Egz. 3. .... ZAE-2 .....

# SPIS TREŚCI

- 1 Wstęp
2. Cel pracy
3. Zasadnicza idea proponowanej metody i sposoby realizacji algorytmu adaptacji
4. Adaptacja w oparciu o algorytm szybkiej transformaty Fourier'a
5. Program i zakres badań
  - 5.1 Badania algorytmu zrealizowanego w oparciu o szybkie przekształcenie Fourier'a i prostokątne charakterystyki strojenia
  - 5.2 Badania przy nieznannej strukturze obiektu regulacji
6. Wnioski

# 1. WSTĘP

Praca jest kontynuacją zlecenia "Opracowanie analityczne i sprawdzenie doświadczalne podstawowych tez metody adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych w oparciu o analizę widma odchyłki regulacji", które zawierało następujące etapy:

Etap 1. Opracowanie analityczne i sprawdzenie doświadczalne podstawowych tez metody adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych.

Etap 2. Opracowanie pierwszej redakcji pracy doktorskiej pt.: "Metoda adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych".

Etap 3. Weryfikacja i uzupełnienie tekstu pierwszej redakcji pracy doktorskiej pt.: „Metoda adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych”.

Prace te umożliwiły mgr inż. Z. Pietrusińskiemu otwarcie w lutym 1995r. przewodu doktorskiego na Wydziale Elektrycznym PW i przygotowanie wstępnej wersji pracy doktorskiej. Promotorem pracy doktorskiej jest prof. dr hab. T. Kaczorek.

Realizowany obecnie projekt badawczy promotorski, finansowany przez Komitet Badań Naukowych, powinien umożliwić uzupełnienie i zweryfikowanie materiału opracowanego w poprzednich etapach pracy.

Głównymi zaletami algorytmu adaptacji są:

- brak zewnętrznego eksperymentu do identyfikacji parametrów obiektu regulacji,
- możliwość strojenia parametrów regulatora zarówno do parametrów obiektu jak i do charakteru sygnałów zakłócających,
- quasi-ciągła adaptacja parametrów regulatora przeprowadzana jedynie w oparciu o analizę sygnału odchyłki regulacji, dzięki czemu algorytm adaptacji może być traktowany jako przystawka współpracująca z różnymi typami regulatorów przemysłowych (regulatory ciągłe, krokowe, trójpołożeniowe).

## 2. CEL PRACY

Celem pracy jest analiza możliwości praktycznego wykorzystania zaproponowanej metody adaptacji parametrów dynamicznych uniwersalnych mikroprocesorowych regulatorach typu PID. Koncepcja realizacji algorytmu adaptacji parametrów oparta jest na analizie widma sygnału odchyłki regulacji. Praktyczne wykorzystanie tej koncepcji wymaga zawężenia rozważań do pewnej klasy obiektów regulacji. Przyjęto dość szeroką klasę obiektów opisanych przybliżoną transmitancją

typu  $k \cdot G_{(j \cdot \omega)} = K_o \cdot \frac{e^{-j \cdot \omega \cdot \tau}}{1 + j \cdot \omega \cdot T}$ , gdzie:  $K_o$  oznacza wzmocnienie obiektu regulacji,  $T$

jest zastępczą stałą czasową obiektu, a  $\tau$  czasem opóźnienia obiektu. Dla tego typu obiektu można wyznaczyć w oparciu o opisaną powyżej metodę tzw. charakterystyki strojenia poszczególnych parametrów dynamicznych, stanowiące podstawę do obliczenia pożądanych zmian parametrów. Strojenie parametrów regulatora powinno odbywać się równocześnie z wprowadzaniem odpowiednich zmian do charakterystyk strojenia, które zależą od parametrów regulatora i parametrów obiektu. Główną zaletą algorytmu jest dostrojenie parametrów regulatora zarówno do zmian obiektu jak i do charakterystyki sygnałów zakłócających oraz brak zewnętrznego eksperymentu identyfikacyjnego.

Praca powinna umożliwić sprawdzenie podstawowego sposobu realizacji algorytmu adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów, co może stanowić podstawę do przyszłej implementacji algorytmu w przemysłowych rozwiązaniach regulatorów mikroprocesorowych.

Zasadniczym celem pracy jest przygotowanie przez wykonawcę rozprawy doktorskiej.

### 3. Zasadnicza idea proponowanej metody i sposoby realizacji algorytmu adaptacji

Zaproponowany sposób adaptacji oparty jest na analizie przebiegu charakterystyki częstotliwościowej zamkniętego układu automatycznej regulacji. Zmieniając wartości parametrów dynamicznych regulatora możemy zmieniać przebieg tej charakterystyki. Z fizycznego punktu widzenia zamknięty układ automatycznej regulacji przypomina filtr środkowo przepustowy, a zadaniem układu adaptacyjnego jest taki dobór odpowiednich wartości parametrów dynamicznych, aby uzyskać maksymalne tłumienie sygnału odchyłki regulacji. Optymalne nastawy zależą nie tylko od parametrów obiektu ale także od charakteru zakłóceń oddziaływających na układ regulacji tj. od widma sygnałów zakłócających oraz widma sygnału wartości zadanej.

Analiza analityczna pozwala na sprecyzowanie warunku optymalnego dostrojenia, parametrów regulatora do obiektu i zakłóceń, w postaci

$$\frac{\partial J}{\partial p_n} = \int_0^{\infty} |\varepsilon(j\omega)|^2 f_n d\omega = 0 \quad (1)$$

przy czym 
$$f_n(\omega) = \frac{\partial |G_z(j\omega)|^2}{\partial p_n} \frac{1}{|G_z(j\omega)|^2} \quad (2)$$

gdzie:

$J$  - wskaźnik jakości regulacji w postaci całki kwadratu odchyłki regulacji;

$p_n$  - kolejny parametr regulatora;

$\varepsilon(j\omega)$  - odchyłka regulacji;

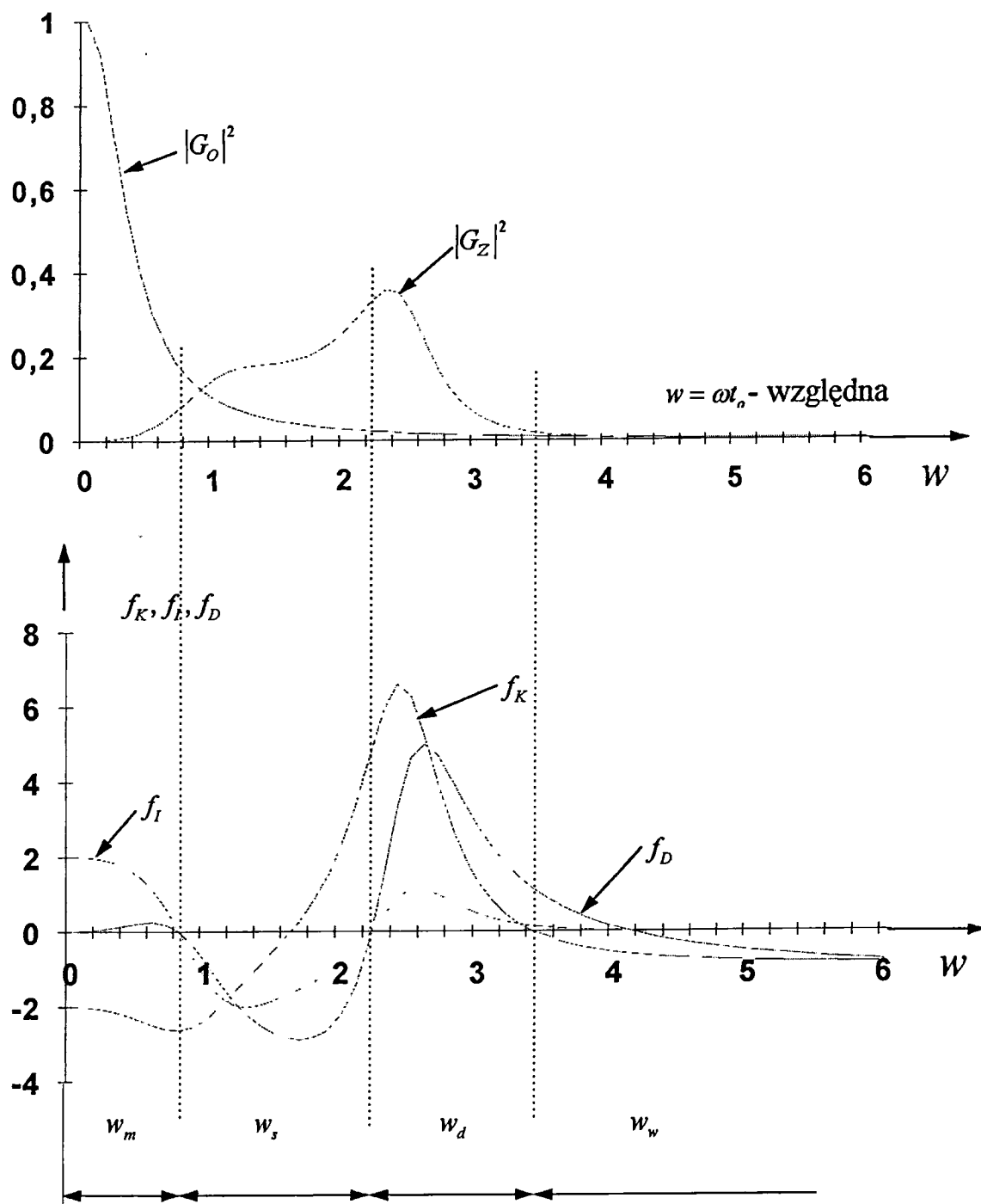
$f_n(\omega)$  - charakterystyka strojenia parametrów regulatora;

$G_z(j\omega)$  - transmitancja zamkniętego układu regulacji;

$\omega$  - pulsacja

Zasadniczo proponowany algorytm adaptacji przeznaczony jest do stosowania w mikroprocesorowych regulatorach PID uniwersalnego zastosowania. Ogólna zasada pracy algorytmu umożliwia jednak wykorzystanie jej także w innych układach regulacyjnych, o większej liczbie strojonych parametrów.

Tytuł pracy sugeruje stosowanie algorytmu głównie w regulatorach mikroprocesorowych. Wynika to przede wszystkim ze złożoności algorytmu, wymagającej zapewnienia odpowiedniej mocy obliczeniowej, co zresztą pozostaje w zgodzie z ogólnym trendem rozwojowym regulatorów elektronicznych. Nic nie stoi jednak na przeszkodzie, aby algorytm lub jego uproszczone wersje znalazły zastosowanie w aparatach zrealizowanych w technice analogowej.



Rys.1 Typowy przebieg rzeczywistych charakterystyk strojenia parametrów regulatora PID: wzmacnienia -  $f_K(w)$ , czasu zdwojenia -  $f_I(w)$ , czasu wyprzedzenia -  $f_D(w)$  oraz charakterystyka obiektu  $|G_o(jw)|^2$  i charakterystyka zamkniętego układu regulacji  $|G_z(jw)|^2$ .

Typowe przebiegi charakterystyk strojenia poszczególnych parametrów dynamicznych regulatora, stanowiące podstawę do obliczenia pożądanych zmian parametrów zostały przedstawione na rys.1. W użytecznym zakresie pulsacji  $w$  ( $w < w_w$ ) można wyodrębnić trzy podzakresy częstotliwości:

- podzakres małych częstotliwości  $w_m$ ,
- podzakres średnich częstotliwości  $w_s$ ,
- podzakres dużych częstotliwości  $w_d$ .

Działanie regulatora jest skuteczne jedynie w zakresie małych częstotliwości. Dla średnich i dużych częstotliwości tłumienie zakłóceń w zamkniętym układzie regulacji jest mniejsze niż w układzie otwartym.

Analiza charakterystyk zamkniętego układu regulacji dla różnych parametrów obiektu i regulatora wskazuje, że istnieje możliwość realizacji układu strojenia w oparciu o stałe niezmiennie charakterystyki strojenia parametrów tzw. charakterystyki wzorcowe, niezależne od parametrów obiektu i od charakteru zakłóceń na niego oddziałujących. Jedynym parametrem wymagającym dopasowania charakterystyki strojenia do rzeczywistych parametrów obiektu jest czas opóźnienia  $\tau$  obiektu. Założony dla układu adaptacyjnego czas opóźnienia  $\tau$  powinien być strojony, podobnie jak parametry dynamiczne, w trakcie procesu adaptacji.

Możliwe są różne sposoby realizacji technicznej proponowanej metody adaptacji:

- bezpośrednia metoda zgodna z wyżej podanymi zależnościami analitycznymi,
- alternatywny sposób adaptacji oparty na pewnym przekształceniu podstawowych zależności analitycznych,
- realizacja oparta o transmitancje aproksymujące,
- metoda z zastosowaniem charakterystyk wzorcowych,
- adaptacja z zastosowaniem metody szybkiej transformaty Fourier'a.

Ostatnia pozycja zostanie dokładniej omówiona w następnym paragrafie, gdyż wydaje się, że jest najbardziej odpowiednia dla zastosowań przemysłowych. Będzie ona podlegać badaniom w następnym etapie niniejszej pracy.



## 4. Adaptacja w oparciu o algorytm szybkiej transformaty Fourier'a

Zależności (1) i (2) stwarzają możliwość realizacji przestrajania parametrów dynamicznych regulatora w oparciu o obliczenia oparte bezpośrednio na znajomości widma sygnału odchyłki regulacji, bez przechodzenia na przebiegi czasowe. Zasadniczym problemem jest uzyskanie widma sygnału  $\varepsilon(j\omega)$  na podstawie zarejestrowanego przebiegu odchyłki regulacji  $\varepsilon(t)$ . Metoda szybkiej transformaty Fourier'a pozwala na przezwycięzenie tej trudności, przy zachowaniu rozsądnej komplikacji i czasochłonności obliczeń.

Dyskretne przekształcenie Fourier'a (zagadnienie analizy) sprowadza się do obliczenia wielkości

$$c(j) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=0}^n e(k) e^{-j \frac{2\pi k}{t_p(n+1)}} \quad \text{gdzie } j = 0, 1, \dots, n \quad (3)$$

przy czym:  $e(0), e(1), \dots, e(k)$  oznaczają wartości sygnału w chwilach  $0, 1, \dots, k$ ,  
 $t_p$  - okres próbkowania sygnału  $e(k)$ .

W wyniku przekształcenia Fourier'a otrzymujemy składowe widma sygnału wejściowego określone przy pulsacjach

$$\omega_0 = 0, \omega_1 = \frac{2\pi}{t_p} \frac{1}{n+1}, \omega_2 = \frac{2\pi}{t_p} \frac{2}{n+1}, \dots, \omega_n = \frac{2\pi}{t_p} \frac{n}{n+1}$$

Wyrażając pulsację  $\omega$  w jednostkach względnych odniesionych do czasu opóźnienia obiektu  $\tau$  otrzymujemy

$$w_0 = 0, w_1 = 2\pi \frac{\tau}{t_p} \frac{1}{n+1}, w_2 = 2\pi \frac{\tau}{t_p} \frac{2}{n+1}, \dots, w_n = 2\pi \frac{\tau}{t_p} \frac{n}{n+1}$$

Interesujący zakres pulsacji względnych, z punktu widzenia strojenia parametrów dynamicznych można określić jako

$$0 \leq w \leq 3,5$$

Uzyskane w wyniku przekształcenia Fourier'a widmo powinno co najmniej pokrywać zakres częstotliwości wykorzystywany w procesie strojenia parametrów regulatora. Odpowiada to w przybliżeniu warunkowi

$$t_p \leq \frac{\tau}{2} \quad (4)$$

Oznacza to, że okres próbkowania regulatora powinien być co najmniej dwukrotnie mniejszy od czasu opóźnienia regulatora. Warunek ten jest prawie zawsze spełniony w typowych regulatorach mikroprocesorowych przeznaczonych do realizacji układów automatycznej regulacji wolnozmiennych procesów technologicznych.

Zaleca się na ogół, aby

$$t_p \leq 0,1 \tau \quad (5)$$

Przy takim założeniu, użyteczne pasmo częstotliwości zawiera się w 20-procentowym zakresie użytecznego widma sygnału uzyskanego w wyniku przekształcenia FFT. W celu zapewnienia odpowiedniej dokładności strojenia parametrów, użyteczne pasmo powinno zawierać co najmniej kilkadziesiąt dyskretnych wartości widma. Wydaje się zasadnym przyjęcie założenia, że

$$n \geq 100 \quad (6)$$

Z (5) oraz z (6) wynika, że czas obserwacji procesu przejściowego w układzie regulacji, potrzebny do określenia pożądanych zmian parametrów dynamicznych, nie powinien być mniejszy niż

$$T_s = n * t_p \geq 10 * \tau \quad (7)$$

Szacunek czasu  $T_s$  według wyrażenia (7) jest w przybliżeniu zgodny z szacunkiem związanym z dynamiką układu regulacji. Z punktu widzenia dynamiki, czas  $T_s$  powinien być wystarczający do zaobserwowania całego procesu przejściowego, wywołanego np. zakłóceniem skokowym na wejściu obiektu regulacji, co przy dobrze dostrojonym regulatorze wymaga od 5 do 10 zastępczych czasów opóźnienia obiektu.

Klasyczny algorytm rozwiązania dyskretnego przekształcenia Fourier'a, w przypadku przekształcenia dyskretnego przebiegu wejściowego złożonego z  $n$  punktów pomiarowych, na widmo sygnału zawierające  $n$  składowych częstotliwościowych, wymaga około  $(n+1)^2$  zespolonych mnożeń i dodawań oraz obliczenia wartości wyrażenia  $e^{-ij \frac{2\pi k}{T_s(n+1)}}$ . Znacznie tańszy jest zaproponowany przez Cooleya i Tukeya algorytm szybkich transformacji Fourier'a (oznaczany w skrócie FFT). Najczęściej FFT stosuje się przy  $n+1=2^k$ . Wymaga on w tym wypadku wykonania rzędu  $n \log_2 n$  działań. Spełnienie wyrażenia (6) wymaga spełnienia warunku

$$k \geq 7$$

mamy wówczas następujące możliwości

$$n = 127 \text{ przy } k = 7;$$

$$n = 255 \text{ przy } k = 8;$$

$$n = 511 \text{ przy } k = 9;$$

$$n = 1023 \text{ przy } k = 10; \quad \text{itd..}$$

Zwiększenie wartości  $k$  powoduje zwiększenie dokładności strojenia kosztem zwiększenia obciążenia procesora większą ilością operacji obliczeniowych.

Uproszczony schemat realizacji układu adaptacji, wykorzystującego algorytm FFT, przedstawiony jest na rys. 5.76. Dyskretny sygnał odchyłki regulacji  $\varepsilon(k)$ , składający się z  $(n+1)$  kolejnych próbek sygnału ciągłego  $\varepsilon(t)$  zarejestrowanych w czasie pomiaru  $t_{pom}$  ( $t_{porz} \leq t_{pom} \leq t_{porz} + T_s$ ), zostaje przetworzony w bloku obliczania szybkiej transformaty Fourier'a FFT na  $(n+1)$  wartości widmowych  $\varepsilon(j\omega_k)$ , które wprowadzane są następnie na blok obliczania kwadratu z modułu sygnału, a stąd na

wejścia bloków przekształcania sygnału według odpowiednich charakterystyk strojenia  $F_K, F_I, F_D$ . Charakterystyki te mogą być swobodnie ukształtowane i zapisane w tablicach. Obliczone sygnały strojenia  $\partial_K, \partial_I, \partial_D$  stanowią podstawę do wyznaczania sygnałów przestrajania poszczególnych parametrów dynamicznych regulatora  $\Delta K, \Delta I, \Delta D$ .

Przy obliczaniu wartości sygnałów  $\Delta K, \Delta I, \Delta D$  należy uwzględnić jeszcze kompensację oddziaływań skrośnych, w celu zapewnienia większej przejrzystości proponowanego rozwiązania układowego.

Stosując metodę FFT powinniśmy zapewnić, aby czas obserwacji procesu przejściowego  $T_s$  był proporcjonalny do czasu opóźnienia obiektu, zgodnie z zależnością (7). Jednocześnie przebieg ten powinien zawierać stałą ilość próbek pomiarowych (np.  $n=127$  lub  $255$ ), która musi także odpowiadać rozmiarowi tablicowanych charakterystyk strojenia poszczególnych parametrów regulatora.. Znając szacunkową wartość czasu opóźnienia obiektu oraz czas próbkowania regulatora, nasuwają się dwie możliwości rozwiązania tego problemu:

- przestrajanie okresu próbkowania regulatora tak, aby pozostawał w stałej proporcji w stosunku do zidentyfikowanego w procesie adaptacji zastępczego czasu opóźnienia obiektu,

- zachowanie stałego okresu próbkowania, lecz odpowiednie rozrzedzenie próbek pomiarowych sygnału odchyłki regulacji, drogą opuszczania części próbek, przy zapewnieniu możliwie równomiernego rozłożenia sygnałów, w całym okresie obserwacji  $T_s$ .

Pierwszy sposób pozwala na dokładniejsze spełnienie postawionych wymagań, natomiast drugi umożliwia łatwiejszą realizację techniczną układu adaptacji.

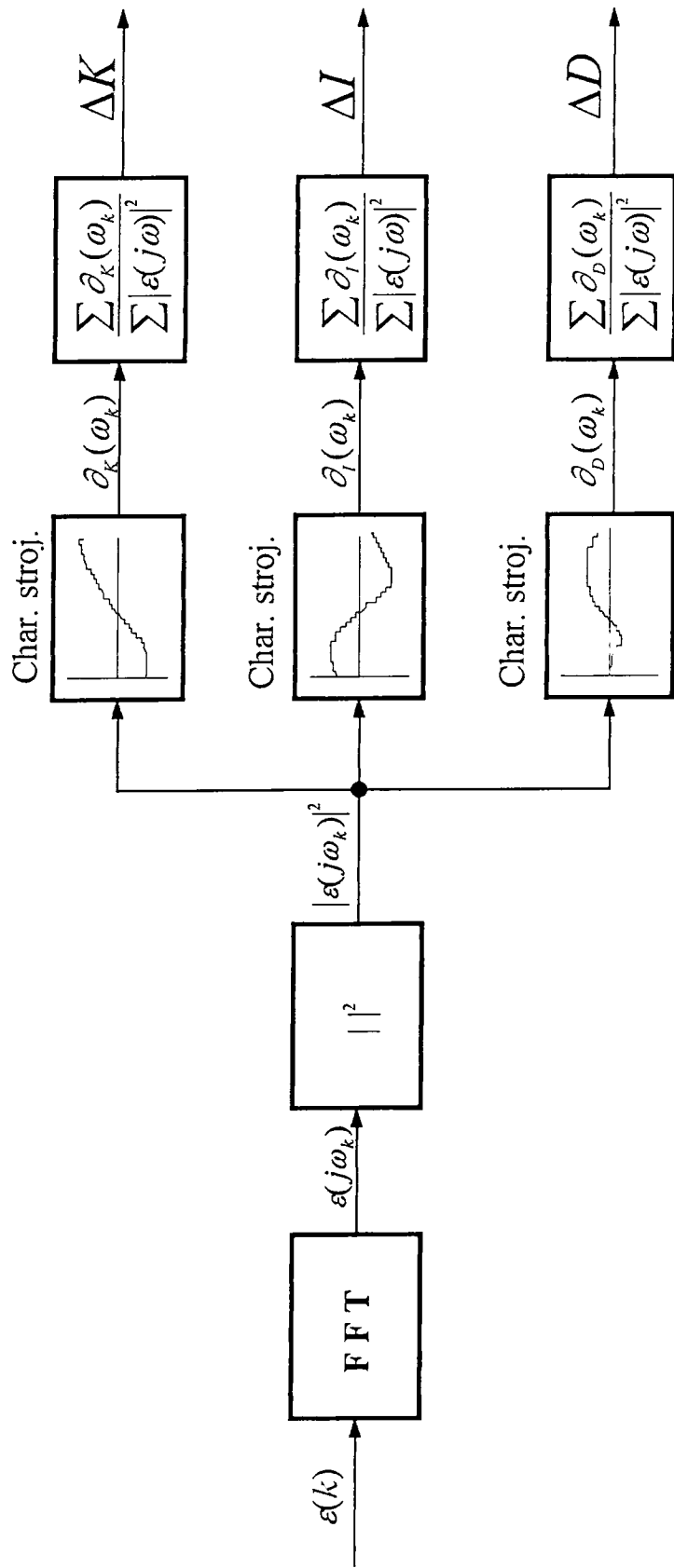
Metoda FFT daje możliwość wprowadzenia pewnych ulepszeń działania algorytmu adaptacji, które zostaną pokrótce omówione poniżej. Są to:

- prostokątne charakterystyki strojenia ,
- przesuwne okno pomiarowe.

#### Prostokątne charakterystyki strojenia

Obserwacja charakterystyk strojenia wskazuje, że w pewnych zakresach częstotliwości przebiegi tych charakterystyk mogą różnić się dość znacznie w zależności od parametrów obiektu i regulatora. Użycie metody FFT pozwala na dowolne ukształtowanie wzorcowych charakterystyk strojenia.

Pozwala to na wykluczenie pewnych zakresów częstotliwości, w których przebiegi charakterystyk są niejednoznaczne, na przykład w okolicach przekraczania zera przez charakterystyki strojenia wzmocnienia  $f_k(w)$ . Można w ten sposób skonstruować charakterystykę, która przyjmuje jedynie wartości: +1, -1 i 0. Wartości +1 i -1 przyjmowane są w zakresach częstotliwości, w których nie ma wątpliwości co do znaku przebiegu rzeczywistej charakterystyki strojenia. W pozostałym zakresie częstotliwości wartość  $f_k(w)$  jest równa zero. Charakterystyka taka powinna zapewnić większą skuteczność działania algorytmu adaptacji, to jest możliwość szybszego dochodzenia do nastaw optymalnych, bez obawy wystąpienia cyklu granicznego lub obawy dostrojenia do nastaw znajdujących się poza zakresem stabilności układu regulacji. Prostokątna charakterystyka wpływa także na uproszczenie obliczeń i obniżenie wymagań dotyczących pamięci mikroprocesora.



Rys. 2 Uproszczony schemat realizacji układu adaptacji wykorzystującego algorytm FFT

### Przesuwne okno pomiarowe

Wymaganie zapewnienia szybkiego dochodzenia do nastaw optymalnych związane jest z koniecznością wprowadzania stosunkowo dużych zmian parametrów regulatora w poszczególnych krokach strojenia, co grozi przekroczeniem optymalnych wartości nastaw i związanym z tym niebezpieczeństwem pracy na granicy stabilności. Metoda FFT pozwala na poprawę właściwości algorytmu adaptacji w tym zakresie, drogą wprowadzenia „przesuwne okna pomiarowego”. Stosując przesuwne okna pomiarowe, w kolejnym kroku strojenia wykorzystuje się większość pomiarów, z zapamiętanego przebiegu odchyłki regulacji z kroku poprzedniego. Zostaje tylko odrzucona pewna ilość pomiarów początkowych, a przebieg sygnału podlegający przekształceniu FFT w danym kroku jest uzupełniany taką samą ilością pomiarów końcowych. Dzięki temu poszczególne kroki strojenia przeprowadzane są częściej, a zmiana parametrów w pojedynczym kroku jest mniejsza. Praca algorytmu staje się quasi-ciągła, a niebezpieczeństwo wystąpienia w procesie strojenia nastaw leżących poza zakresem stabilności maleje.

Należy podkreślić, że dostrojenie regulatora w pewnym kroku pracy do nastaw, przy których praca układu regulacji jest niestabilna, nie oznacza jeszcze automatycznie, że praca całego układu regulacji pozostanie niestabilna. W następnym kroku strojenia algorytm adaptacji może skorygować odpowiednio nastawy parametrów regulatora, wprowadzając je ponownie do zakresu pracy stabilnej. Jednak przekraczanie zakresu stabilności wydłuża czas dochodzenia do nastaw optymalnych. W czasie kiedy parametry regulatora nie są dostrojone optymalnie, do parametrów obiektu i do rodzaju zakłóceń na niego oddziałujących, jakość regulacji może być dużo gorsza od jakości, którą uzyskuje się po osiągnięciu optymalnego dostrojenia parametrów regulatora.

## 5. Program i zakres badań

Przewiduje się, że badania które zostaną przeprowadzone w następnym etapie pracy będą dotyczyć następujących zagadnień:

- sprawdzenie algorytmu zrealizowanego w oparciu o szybkie przekształcenie Fourier'a i prostokątne charakterystyki strojenia,
- analiza pracy algorytmu adaptacji przy innym typie obiektu regulacji niż jednoinercyjny z opóźnieniem.

### 5.1 Badania algorytmu zrealizowanego w oparciu o szybkie przekształcenie Fourier'a i prostokątne charakterystyki strojenia

Zgodnie z rozważaniami przeprowadzonymi w rozdziale 4, poniżej w tablicach 1, 2 i 3 zostały zaproponowane przebiegi prostokątnych charakterystyk strojenia parametrów  $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  regulatora.

Tablica 1

Proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia wzmocnienia  $F_K(w)$

$w$	0 ..... 1	> 1 ... <2,0	2,0...2,6	> 2,6
$F_K(w)$	$-A_K$	0	$+B_K$	0

Tablica 2

Proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia stałej czasu zdwojenia  $F_I(w)$

$w$	0 ... 0,2	>0,2... <1,5	1,5 ...2	>2 ... <2,4	2,4 ... 2,6	>2,6
$F_I(w)$	$+A_I$	0	$-B_I$	0	$+B_I$	0

Tablica 1

Proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia czasu wyprzedzenia  $F_D(w)$

$w$	0 ... <1,4	1,4 ... 2,0	>2,0 .. <2,4	2,4 .... 3	>3
$F_D(w)$	0	$-A_D$	0	$+B_D$	0

Ustalenie przebiegów poszczególnych charakterystyk przeprowadzono na podstawie przebiegów rzeczywistych charakterystyk, obliczonych przy różnych parametrach obiektu i przy różnych sygnałach zakłócających.

Charakterystyki widmowe mocy sygnałów zakłócających wyznaczono przy założeniu, że poszczególne sygnały zostały odniesione do wejścia regulatora, niezależnie od rzeczywistego miejsca oddziaływania sygnału zakłócającego. Wybrano typowe, łatwe do stosowania w obliczeniach, rodzaje sygnałów zakłócających, a mianowicie:

a) Sygnał liniowo narastający podany na wejście obiektu regulacji (LO):

$$|Z_{LO}(jw)|^2 = \frac{G_o(jw)G_o(-jw)}{w^4} \quad (8)$$

b) Sygnał liniowo narastający podany na wejście regulatora (LR):

$$|Z_{LR}(jw)|^2 = \frac{1}{w^4} \quad (9)$$

c) Impuls Dirace'a podany na wejście obiektu regulacji (IO):

$$|Z_{IO}(jw)|^2 = G_o(jw)G_o(-jw) \quad (10)$$

d) Skok jednostkowy wprowadzony na wejście obiektu regulacji (SO):

$$|Z_{SO}(jw)|^2 = \frac{G_o(jw)G_o(-jw)}{w^2} \quad (11)$$

f) Skok jednostkowy wprowadzony na wejście regulatora (SR):

$$|Z_{SR}(jw)|^2 = \frac{1}{w^2} \quad (12)$$

Tego typu zakłócenia są równoważne dość szerokiej gamie zakłóceń stochastycznych, z którymi mamy do czynienia w rzeczywistych warunkach pracy. Wyniki badań, otrzymane przy tych zakłóceniach, mogą być traktowane jako miarodajne, przy ocenie jakości dostrajania się układu do rzeczywistych zakłóceń oddziałujących na obiekt regulacji.

Na rysunkach 3 do 11 przedstawiono przebiegi rzeczywistych charakterystyk strojenia i charakterystyk prostokątnych przewidzianych do badań algorytmu

adaptacji zrealizowanego w oparciu o szybkie przekształcenie Fourier'a i prostokątne charakterystyki strojenia, traktowane jako charakterystyki wzorcowe.

W celu eliminacji błędów związanych z samym przekształceniem Fourier'a oraz w celu zmniejszenia pracochłonności obliczeń, badania zostaną oparte bezpośrednio na wykorzystaniu sygnału widma odchyłki regulacji, wyznaczonego analitycznie na podstawie parametrów obiektu i regulatora.

Strojenie nastaw poszczególnych parametrów regulatora będzie następowało dotąd dopóki nie zostaną spełnione następujące zależności

$$\int_0^{+\infty} |Z_x(jw)|^2 |G_z(jw)|^2 F_k(w) dw = 0 \quad (13)$$

$$\int_0^{+\infty} |Z_x(jw)|^2 |G_z(jw)|^2 F_l(w) dw = 0 \quad (14)$$

$$\int_0^{+\infty} |Z_x(jw)|^2 |G_z(jw)|^2 F_D(w) dw = 0 \quad (15)$$

gdzie:  $x = jw t_m$  przy czym:  $t_m = 0.5$

$Z_x(jw) = Z_{LO}(jw)$  lub  $Z_{LR}(jw)$  lub  $Z_{IO}(jw)$  lub  $Z_{IR}(jw)$  lub  $Z_{SO}(jw)$   
lub  $Z_{SR}(jw)$  - zgodnie z (5.22)÷ (5.27).

$G_z(jw)$  - transmitancja zamkniętego układu regulacji

przy czym

$$|G_z(jw)|^2 = \frac{|G_o(jw)|^2}{1 + 2KP(w) - 2KQ(w)X(w) + K^2|G_o(jw)|^2(X^2(w) + 1)} \quad (16)$$

gdzie:  $R(w) = K[1 + jX(w)]$

$G_o(w) = P(w) + jQ(w)$

oraz

$$X(w) = wD - \frac{1}{wI}$$

$$P(w) = \frac{\cos wT - wT \sin wT}{1 + w^2 T^2}$$

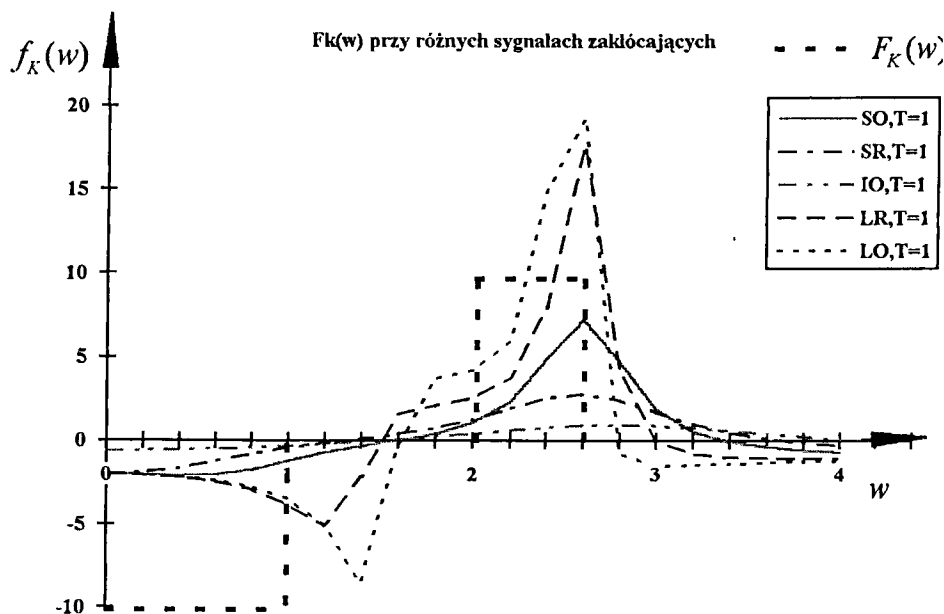
$$Q(w) = -\frac{wT \cos wT + \sin wT}{1 + w^2 T^2}$$

$$|G_o(jw)|^2 = \frac{K_o^2}{1 + w^2 T^2}$$

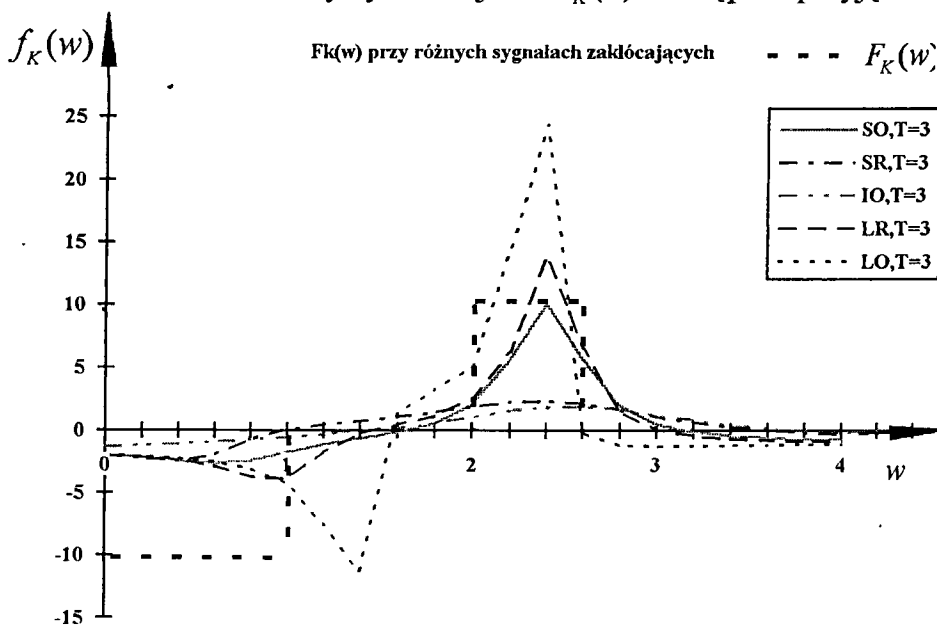


Zależności (13) do (16) pozwalają na wyznaczenie nastaw, do których będzie następowało dostrajanie się regulatora w procesie adaptacji. Znajomość tych nastaw umożliwi obliczenie odpowiadających im wskaźników jakości regulacji, przy różnych parametrach obiektu i na oszacowanie tą drogą jakości układu adaptacyjnego.

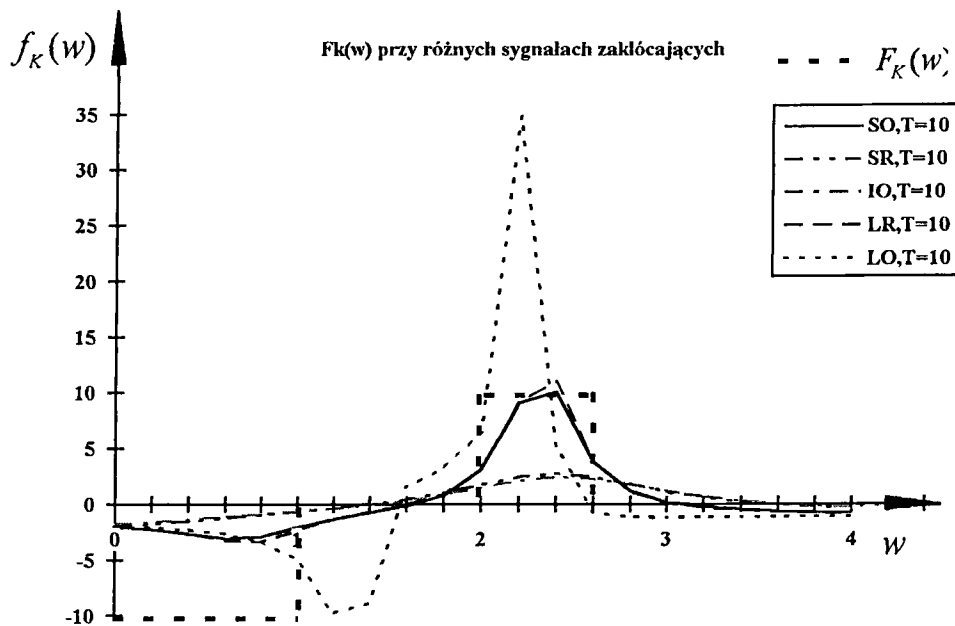
W tablicach 1, 2 i 3 nie została jeszcze jednoznacznie sprecyzowana amplituda charakterystyk strojenia. Wstępne wartości parametrów  $A_x$  i  $B_x$  zostały podane na rysunkach 3 do 11. Zakłada się, że przed przystąpieniem do właściwych badań nastąpi bardziej dokładne dostrojenie przebiegów charakterystyk strojenia. Będzie ono polegało na dobraniu wartości współczynnika  $A_x$  w charakterystykach strojenia poszczególnych parametrów tak, aby uzyskać minimalną wartość wskaźnika jakości przy obiekcie o stałej czasowej  $T=3$  oraz przy zakłóceniu w postaci skoku jednostkowego na wejściu obiektu regulacji. Określony w ten sposób przebieg charakterystyki będzie uważany za wzorcowy i pozostanie nie zmieniony także w trakcie badań jakości regulacji w układach zawierających inne obiekty regulacji i inne rodzaje zakłóceń.



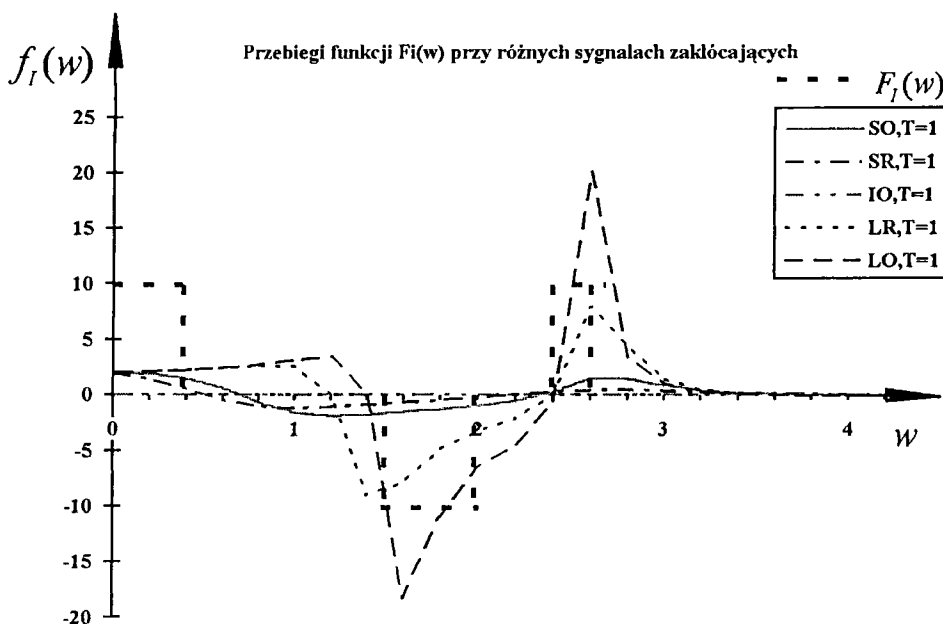
Rys.3 Przebiegi charakterystyk  $f_K(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=1$  i regulator PID z nastawami optymalnymi, wyznaczonymi zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_K(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_K=B_K=10$ .



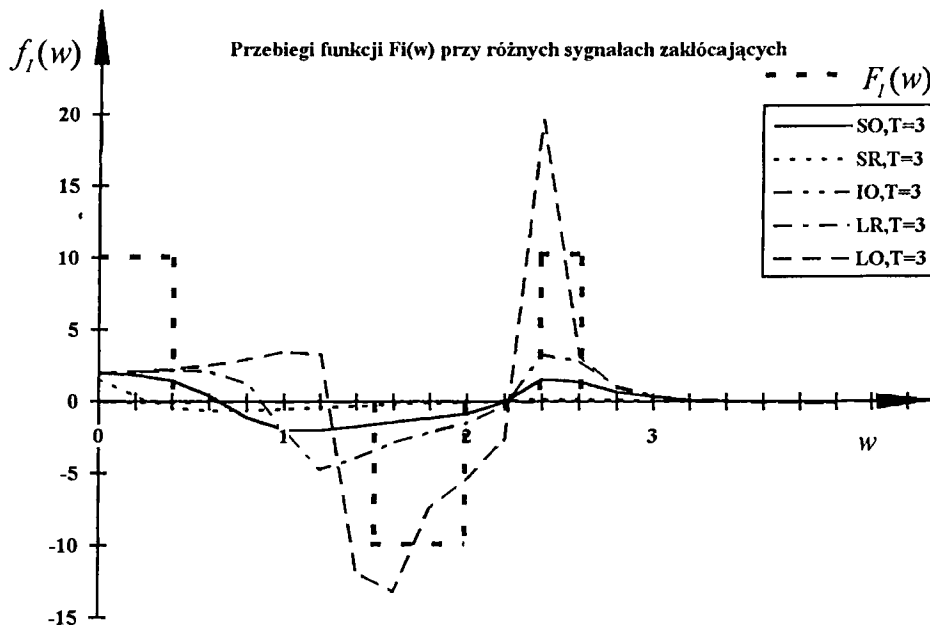
Rys.4 Przebiegi charakterystyk  $f_K(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=3$  i regulator PID o nastawach optymalnych, wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_K(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_K=B_K=10$ .



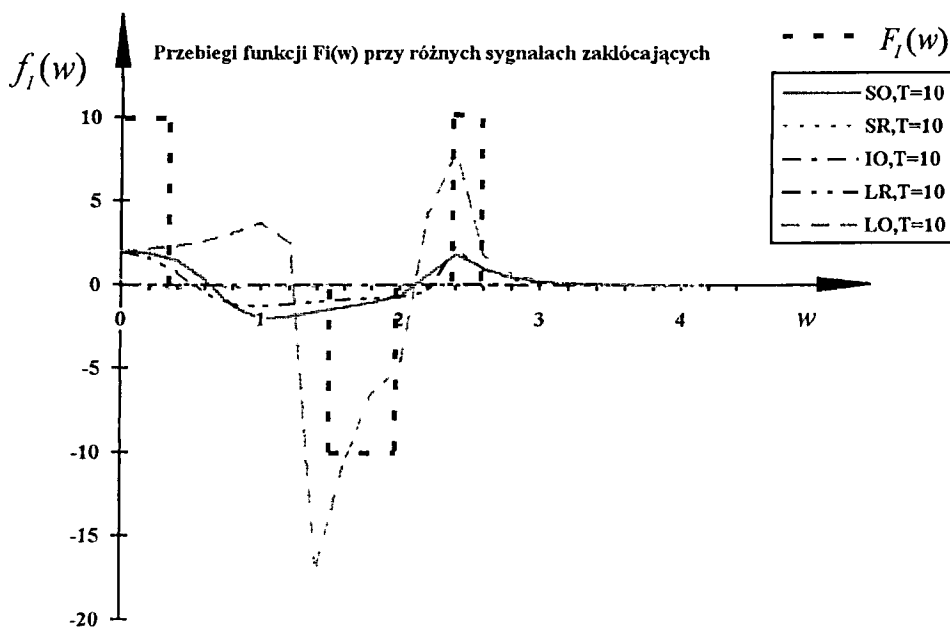
Rys.5 Przebiegi charakterystyk  $f_k(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=10$  i regulator PID o nastawach optymalnych, wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_k(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_k=B_k=10$ .



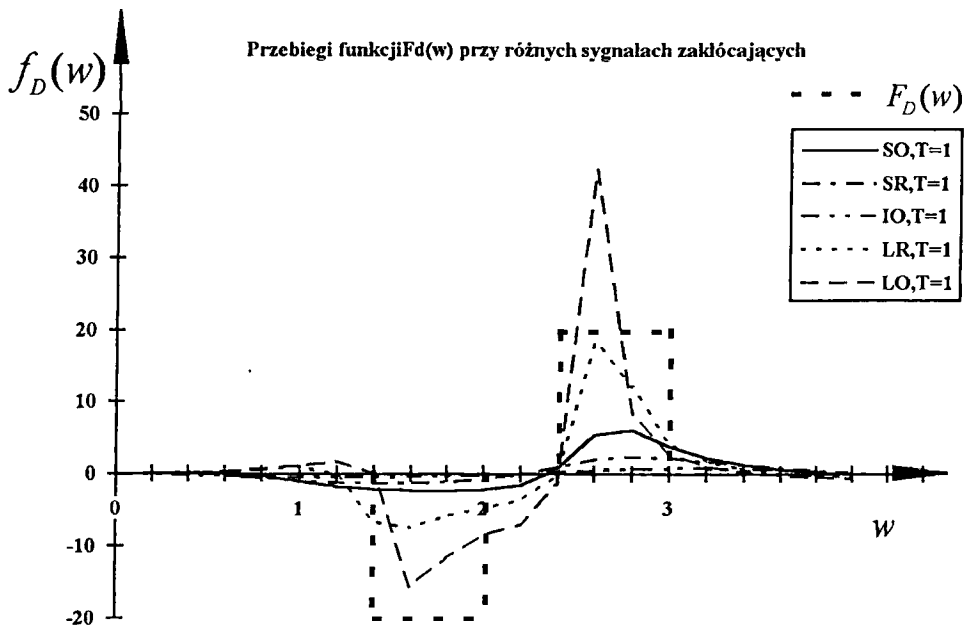
Rys.6 Przebiegi charakterystyk  $f_l(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=1$  i regulator PID o nastawach optymalnych, wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_l(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_l=B_l=10$ .



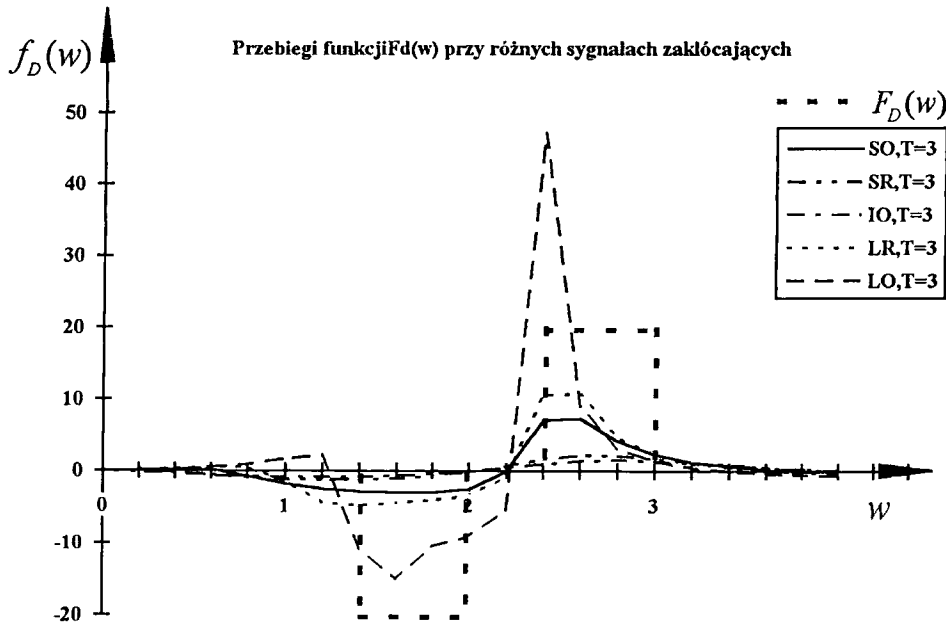
Rys.7 Przebiegi charakterystyk  $f_i(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=3$  i regulator PID o nastawach optymalnych, wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_i(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_i=B_i=10$ .



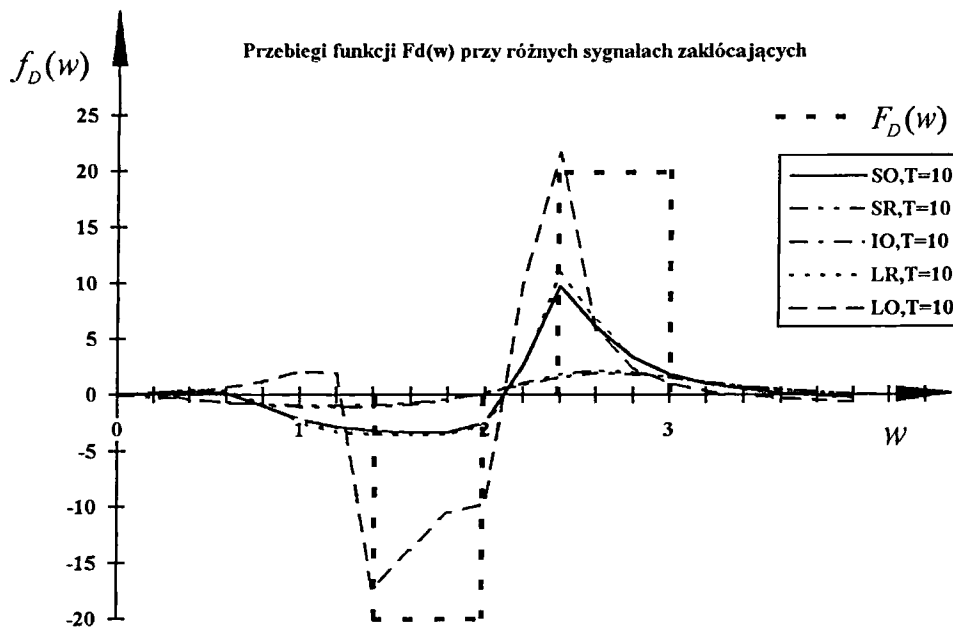
Rys.8 Przebiegi charakterystyk  $f_i(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=10$  i regulator PID o nastawach optymalnych, wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_i(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_i=B_i=10$ .



Rys.9 Przebiegi charakterystyk  $f_D(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=1$  i regulator PID o nastawach optymalnych, wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_D(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_D=B_D=20$ .



Rys.10 Przebiegi charakterystyk  $f_D(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=3$  i regulator PID o nastawach optymalnych, wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_D(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_D=B_D=20$ .



Rys.11 Przebiegi charakterystyk  $f_D(w)$  w układzie zawierającym obiekt o  $T=10$  i regulator PID o nastawach optymalnych, wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji i różnych sygnałach zakłócających oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia  $F_D(w)$ . Wstępnie przyjęto  $A_D=B_D=20$ .

## 5.2 Badania przy nieznannej strukturze obiektu regulacji

Celem badania jest stwierdzenie jakości dostrojenia jakie może zapewnić algorytm adaptacji jeśli nieznanne są nie tylko parametry obiektu ale także jego struktura.

Wszystkie dotychczasowe rozważania dotyczyły założenia, że obiekt regulacji jest

typu  $k \cdot G_{(j\omega)} = K_o \cdot \frac{e^{-j\omega\tau}}{1+j\omega \cdot T}$ , gdzie:  $K_o$  oznacza wzmocnienie obiektu regulacji,  $T$

jest zastępczą stałą czasową obiektu, a  $\tau$  czasem opóźnienia obiektu. Transmittancja ta stanowi dobre przybliżenie w zakresie dość dużej grupy obiektów. Nie ma jednak pewności czy korzystanie z wzorów przybliżonych związane jest z wyraźnym pogorszeniem jakości pracy algorytmu adaptacji. Przeprowadzenie tego typu badań nie może jednak opierać się na założeniu znajomości czasu opóźnienia obiektu gdyż nie jest ona znana. Wyznaczanie zastępczej stałej czasowej obiektu regulacji  $t_m$  niezbędne jest w celu zapewnienia zestrojenie wzorcowych charakterystyk strojenia z charakterystyką widma mocy odchyłki regulacji.

Wyznaczanie zastępczej stałej czasowej opóźnienia obiektu  $t_m$ , polegać będzie na oszacowaniu zakresu częstotliwości występujących w widmie sygnału odchyłki regulacji. Pasma dominujących częstotliwości zawartych w sygnale odchyłki, zamkniętego układu regulacji automatycznej, zależy głównie od stałej opóźnienia obiektu regulacji, nawet jeśli dostrojenie regulatora jest dość dalekie od optymalnego.

Proponuje się obliczanie wartości stałej  $t_m$  w oparciu o zależność:

$$\frac{\int_0^{\pi/t_m} |\varepsilon(j\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{\infty} |\varepsilon(j\omega)|^2 d\omega} = C_r \quad (17)$$

gdzie:

$C_r$  jest stałą, której wartość powinna być dobrana w trakcie badań.

Wstępnie zakłada się  $C_r \cong 0,9$ . Wartość stałej  $t_m$  wyznacza się jako taką, przy której wyrażenie (17) zostaje spełnione.

Przewiduje się przeprowadzenie badań z obiektem regulacji typu

$$G_o(j\omega) = \frac{1}{(1 + T_o j\omega)^n} \quad (18)$$

gdzie:

$T_o$  - stała czasowa,

$n$  - liczba naturalna.

Obliczenie nastaw, do których nastąpi dostrojenie w układzie adaptacyjnym, zostanie przeprowadzone w oparciu o zależności (13) do (18). W zależnościach (13)

do (17) charakterystyka obiektu  $G_o(jw)$  i związane z nią wyrażenia  $P(w)$ ,  $Q(w)$ ,  $|G_o(jw)|^2$ ,  $|G_z(jw)|^2$  muszą być zastąpione odpowiednimi wyrażeniami odpowiadającymi założonej strukturze obiektu regulacji(18).

W celu oszacowania jakości adaptacji konieczne jest wyznaczenie rzeczywistych optymalnych nastaw dla tego typu obiektu i odpowiadających im wskaźników jakości regulacji. Rzeczywiste optymalne nastawy zostaną wyznaczone w oparciu o wyrażenia

$$\int_0^{+\infty} |Z_x(jw)|^2 K \frac{[P(w) - Q(w)X(w) + K|G_o(jw)|^2(X^2(w) + 1)]|G_o(jw)|^2}{[1 + 2KP(w) - 2KQ(w) + K^2|G_o(jw)|^2(X^2(w) + 1)]^2} dw = 0 \quad (19)$$

$$\int_0^{+\infty} |Z_x(jw)|^2 \frac{[K^2|G_o(jw)|^2 X(jw) - KQ(jw)]|G_o(jw)|^2}{wI[1 + 2KP(w) - 2KQ(w) + K^2|G_o(jw)|^2(X^2(w) + 1)]^2} dw = 0 \quad (20)$$

$$\int_0^{+\infty} |Z_x(jw)|^2 \frac{wD[K^2|G_o(jw)|^2 X(jw) - KQ(jw)]|G_o(jw)|^2}{[1 + 2KP(w) - 2KQ(w) + K^2|G_o(jw)|^2(X^2(w) + 1)]^2} dw = 0 \quad (21)$$

Wskaźnik jakości regulacji wyznaczony natomiast będzie w oparciu o wyrażenie

$$J = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} |Z_x(jw)|^2 \frac{|G_o(jw)|^2}{1 + 2KP(w) - 2KQ(w)X(w) + K^2|G_o(jw)|^2(X^2(w) + 1)} dw \quad (22)$$

W wyrażeniach (19) do (22) wykorzystana będzie transmitancja obiektu regulacji (18) podobnie jak w wyrażeniach (13) do (17).



## 6. Wnioski

Zaproponowane do przeprowadzenia w następnym etapie pracy badania pozwolą na lepszą ocenę właściwości algorytmu adaptacji.

Analiza pracy algorytmu adaptacji, przy innym typie obiektu regulacji niż jednoinercyjny z opóźnieniem, pozwoli na właściwą ocenę jakości algorytmu przy pracy w układach regulacji zawierających rzeczywiste obiekty technologiczne.

Sprawdzenie algorytmu, zrealizowanego w oparciu o szybkie przekształcenie Fourier'a i prostokątne charakterystyki strojenia, może mieć duże znaczenie praktyczne i stanowić podstawę do prac nad implementacją algorytmu w przemysłowych rozwiązaniach regulatorów mikroprocesorowych.