

440

ZESPÓŁ AUTOMATYKI ELEKTRONICZNEJ

BE 10

Nazwa ONB/ZNB

Główny wykonawca

mgr inż. Zbigniew Pietrusiński

Pietrusiński

Wykonawcy:

mgr inż. Zbigniew Pietrusiński

techn. Michał Zychowicz

Opracowanie analityczne i sprawdzenie doświadczalne podstawowych  
tez metody adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikro-  
procesorowych w oparciu o analizę widma odchyłki regulacji.

Etap 1: Opracowanie analityczne i sprawdzenie doświadczalne podstawo-  
wych tez metody adaptacji parametrów dynamicznych regu-  
latorów dynamicznych.

(tytuł pracy, numer i tytuł etapu).

Zleceniodawca

Praca statutowa PIAP

Kierownik Zespołu

doc.dr inż. J. Korytkowski

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

dr inż. J. Jabłkowski

30.06.1995r.

Pracę zakończono dnia .....

Nr arch. 7222

Nr zlecenia S1543

**REGULATORY ELEKTRONICZNE + OPROGRAMOWANIE:  
ADAPTACJA**

**Abstrakt**

Praca zawiera analizę możliwości praktycznego wykorzystania opracowanej metody adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych. Szczegółowej analizie poddano zastosowanie samostrojzenia w regulatorach PID pracujących w układach automatycznej regulacji zawierających jednoinercyjny obiekt z opóźnieniem

**Tytuły poprzednich sprawozdań**

- 1."Algorytmy autostrojzenia regulatorów i ich implementacja do oprogramowania mikroprocesorowych regulatorów ciągłych wolnozmiennych procesów przemysłowych". Sprawozdanie z pracy PIAP.Nr rej.6851
- 2."Badania symulacyjne algorytmów autostrojzenia regulatorów.Etap 1: „Opracowanie programów do badań”-Sprawozdanie z pracy PIAP. Nr rej.6882
- 3."Badania symulacyjne algorytmów autostrojzenia regulatorów.Etap2:"Przeprowadzenie badań symulacyjnych algorytmów autostrojzenia, weryfikacja programów. Sprawozdanie z pracy PIAP. Sprawozdanie z pracy PIAP.Nr rej.6902
- 4."Algorytm quasi-ciągłego samostrojzenia parametrów dynamicznych w liniowych i progresywnych regulatorach PID przeznaczonych do automatycznej regulacji wolnozmiennych procesów technologicznych.Etap1:„Opracowanie i implementacja oprogramowania roboczego algorytmu quasi-ciągłego samostrojzenia pametrów dynamicznych w mikroprocesorowym regulatorze MRP42C".  
Nr .7137

**Rozdzielnik**

Egz. 1. ....

**BOINTE**

Egz. 2. ....

**ZAE**

Egz. 3. ....

**ZAE-2**

# Spis treści

1. Wstęp.
  2. Jednostki względne podstawowych parametrów używanych w pracy.
  3. Alternatywny sposób strojenia parametrów regulatora.
  4. Charakterystyki zamkniętego układu regulacji zawierającego obiekt inercyjny z opóźnieniem i regulator PID.
  5. Optymalne nastawy parametrów regulatora i charakterystyki strojenia dla różnych parametrów obiektu regulacji.
  6. Wpływ charakterystyki zakłóceń na charakterystyki strojenia parametrów regulatora.
  7. Koncepcja realizacji algorytmu adaptacji w oparciu o stałe, wzorcowe charakterystyki strojenia parametrów.
  8. Charakterystyki przestrajania parametrów przy różnych rodzajach zakłóceń w oparciu o wzorcowe charakterystyki strojenia.
  9. Jakość regulacji przy strojeniu w oparciu o charakterystyki wzorcowe.
  10. Rozwiązania funkcjonalne układów autostrojenia.
  11. Wnioski.
  12. Literatura.
- Załącznik 1. Wydruki roboczego oprogramowania

## 1. Wstęp

Praca jest kontynuacją tematu "Algorytmy autostrojzenia regulatorów", realizowanego w ZAE w okresie od stycznia 1992r do czerwca 1993r oraz tematu " Algorytm quasi-ciągłego samostrojzenia parametrów dynamicznych w liniowych i progresywnych regulatorach PID przeznaczonych dla układów automatycznej regulacji wolnozmiennych procesów technologicznych" realizowanego w drugim półroczu 1994r.

Celem obecnie realizowanego etapu jest sprawdzenie prawidłowości podstawowych tez pracy, które powinny stanowić bazę dla opracowania wstępnej redakcji pracy doktorskiej oraz zebranie danych, które w przyszłości będą mogły być pomocne przy praktycznym wykorzystaniu proponowanej metody autostrojzenia w docelowym, przemysłowym zastosowaniu algorytmu samostrojzenia.

Zasadniczy zakres prac związany był z zagadnieniem określenia możliwości praktycznego wykorzystania zaproponowanego algorytmu autostrojzenia. Przeanalizowano alternatywny sposób strojenia zaproponowany przez prof. doc. hab. A. Gosiewskiego oraz opracowano dość obszerny materiał obejmujący charakterystyki autostrojzenia parametrów dynamicznych przy różnych parametrach obiektów regulacji i różnych typach zakłóceń oddziałujących na proces.

! !

Rozważania przeprowadzono przyjmując dość szeroką klasę obiektów opisanych przybliżoną transmitancją typu  $KG(j\omega) = K_0 \frac{e^{-j\omega\tau}}{1+j\omega T}$ , gdzie:  $K_0$  oznacza wzmocnienie obiektu regulacji,  $T$  jest zastępczą stałą czasową obiektu, a  $\tau$  czasem opóźnienia obiektu.

## 2. Jednostki względne podstawowych parametrów używanych w pracy.

Dla ogólności rozważań wprowadzono jednostki względne, w których poszczególne wielkości zostały odniesione do czasu opóźnienia obiektu  $\tau$ :

$\Theta = t/\tau$  - czas względny,

$r = s\tau$  - względny operator Laplace'a,

$w = \omega\tau$  - względna pulsacja,

$T = T_0/\tau$  - względna stała czasowa obiektu,

$D = T_d/\tau$  - względny czas wyprzedzenia regulatora,

$I = T_i/\tau$  - względny czas zdwojenia regulatora,

$K = K_R K_0$  - współczynnik wzmocnienia układu otwartego.

Przyjęte oznaczenia zgodne są z symboliką zaproponowaną w [1].

Transmitancję regulatora typu PID:

$$G_R(s) = K_R \left( 1 + sT_d + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (2.1)$$

można zapisać w postaci:

$$G_R(r) = K_R \left( 1 + rD + \frac{1}{rI} \right) \quad (2.2)$$

a transmitancję obiektu:

$$G_o(s) = \frac{K_o e^{-s\tau}}{1 + sT_o} \quad (2.3)$$

w postaci:

$$G_o(r) = \frac{K_o e^{-r\tau}}{1 + rT} \quad (2.4)$$

Transmitancja układu otwartego (tj. szeregowego połączenia obiektu i regulatora) wyraża się wówczas wzorem:

$$G(r) = K \frac{(D I r^2 + I r + 1) e^{-r}}{I r (1 + r T)} \quad (2.5)$$

a transmitancja układu zamkniętego wzorem:

$$G_z(r) = \frac{K (D I r^2 + I r + 1) e^{-r}}{I r (1 + r T) + K (D I r^2 + I r + 1) e^{-r}} \quad (2.6)$$

### 3. Alternatywny sposób strojenia parametrów regulatora.

Z ogólnych rozważań dotyczących proponowanej koncepcji adaptacji przedstawionych w pracy [2] wynika, że charakterystyki autostrojenia parametrów dynamicznych regulatora mają postać:

$$f_{rk}(w) = \frac{\partial |G_z(jw)|^2}{\partial p_{rk}} \cdot \frac{1}{|G_z(jw)|^2}$$

(3.1)

Przekształcając odpowiednio wyrażenia  $f_{rk}(w)$  opisujące charakterystyki strojenia poszczególnych parametrów  $p_{rk}$  otrzymuje się zależności prowadzące do nieco odmiennej realizacji układu strojenia parametrów regulatora niż ta, którą przedstawiono w pracy [2]. Realizację tę nazwano wstępnie alternatywnym sposobem strojenia parametrów.

Mamy mianowicie:

$$\begin{aligned} f_{rk}(w) &= \frac{\partial (G_z(jw)G_z(-jw))}{\partial p_{rk}} \cdot \frac{1}{G_z(jw)G_z(-jw)} \\ &= \left( \frac{\partial G_z(jw)}{\partial p_{rk}} G_z(-jw) + \frac{\partial G_z(-jw)}{\partial p_{rk}} G_z(jw) \right) \cdot \frac{1}{G_z(jw)G_z(-jw)} \\ &= \frac{\partial G_z(jw)}{\partial p_{rk}} \cdot \frac{1}{G_z(jw)} + \frac{\partial G_z(-jw)}{\partial p_{rk}} \cdot \frac{1}{G_z(-jw)} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
&= 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial G_z(j\omega)}{\partial p_{rk}} \cdot \frac{1}{G_z(j\omega)} \right\} \\
&= 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{\partial}{\partial p_{rk}} \left( \frac{1}{1 + G_o G_R(p_{rk})} \right) \cdot (1 + G_o G_R) \right\}
\end{aligned}$$

Stąd ostatecznie otrzymujemy:

$$f_{rk} = \frac{\partial G_z(j\omega)}{\partial p_{rk}} \cdot \frac{1}{G_z(j\omega)}$$

(3.2)

Wstawiając wyrażenie (3.2) do wzoru określającego wpływ zmiany parametrów regulatora na wartość wskaźnika jakości regulacji mamy:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial I}{\partial p_{rk}} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\varepsilon(j\omega)|^2 f_{rk}(\omega) d\omega \\
&= -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\varepsilon(j\omega)|^2 \operatorname{Re} \left\{ G_o(j\omega) G_z(j\omega) \frac{\partial R(j\omega)}{\partial p_{rk}} \right\} d\omega \\
&= -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |\varepsilon(j\omega)|^2 \operatorname{Re} H(j\omega) d\omega \\
&= -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(j\omega) \varepsilon(-j\omega) \operatorname{Re} H(j\omega) d\omega
\end{aligned}$$

przy czym:

$$H(j\omega) = G_o(j\omega) G_z(j\omega) \frac{\partial R(j\omega)}{\partial p_{rk}}$$

Ostatecznie w oparciu o [3] otrzymujemy:

$$\frac{\partial I}{\partial p_{rk}} = -\frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \varepsilon(t) \xi(t) dt$$

(3.3)

gdzie:

$$\xi(t) = L^{-1}[H(s)\varepsilon(s)]$$

(3.4)

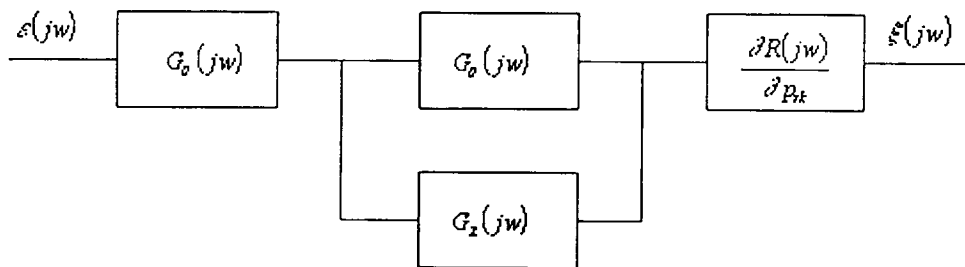
Techniczna realizacja autostrojzenia parametrów oparta na tej metodzie polega na wyznaczeniu sygnału  $\xi(j\omega)$  tak jak to pokazano na rys.1 w oparciu o znajomość którego wyznacza się właściwe sygnały zmiany poszczególnych parametrów regulatora np.: w układach takich jak przedstawione na rys.2 i rys. 3

Zaletą tego sposobu strojenia parametrów jest stosunkowo proste rozwiązanie funkcjonalne, umożliwiające realizację układu strojenia bez konieczności stosowania żadnych przybliżeń jeśli tylko znane są parametry obiektu regulacji. Istotnie układ strojenia, jak to pokazano na rys.1, rys.2 i rys.3 zawiera tylko proste człony dynamiczne będące modelami obiektu i regulatora oraz pochodnymi regulatora względem strojonych parametrów, co przy z reguły prostych transmitancjach typowych regulatorów nie powinno stwarzać trudności realizacyjnych. Trudności takie są bez porównania większe przy bezpośrednim korzystaniu ze wzoru (3.1), w którym wymagana jest

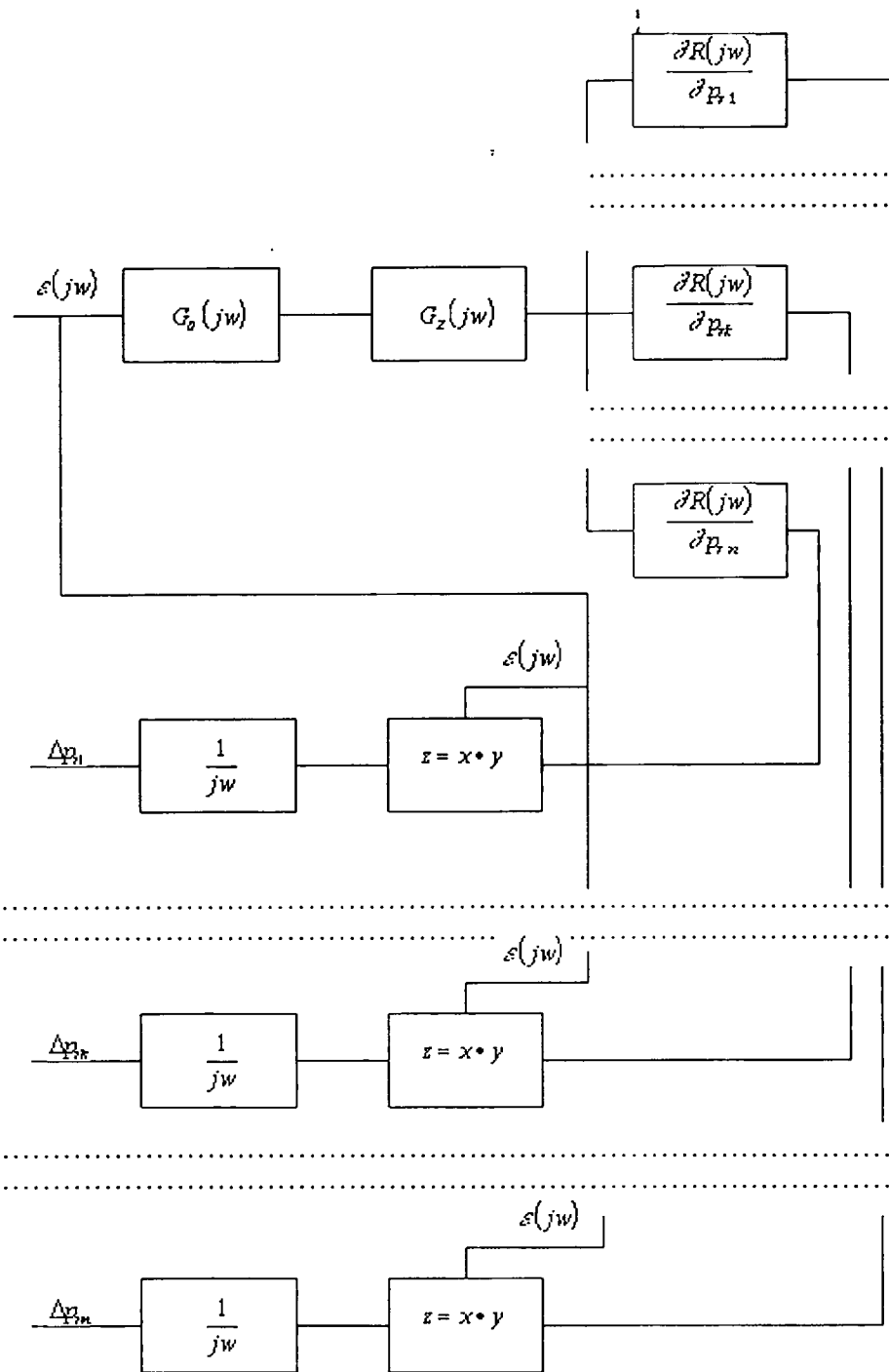
realizacja członów o transmitancji wyznaczonej w oparciu o pochodną kwadratu transmitancji zamkniętego układu regulacji automatycznej. Pomimo trudności realizacyjnych metoda bezpośrednia posiada jednak zasadniczą zaletę polegającą na tym, że charakterystyki strojenia mają wyraźnie określony sens fizyczny. Związane są one bezpośrednio z osiąganym w zamkniętym układzie regulacji tłumieniem zakłóceń różnym w poszczególnych pasmach częstotliwości. Stwarza to możliwości realizacji pewnych wzorcowych charakterystyk strojenia, które mogą być wykorzystane dla różnych obiektów regulacji bez konieczności przeprowadzania dokładnej identyfikacji ich parametrów, a wymagające jedynie oszacowania czasu opóźnienia obiektu regulacji. Przebieg procesu strojenia parametrów i osiągnane efekty są nawet w pewnym sensie korzystniejsze niż strojenie w oparciu o charakterystyki idealne, dokładnie odpowiadające zależności (3.1). W tym ostatnim przypadku przebieg charakterystyk i sprzężenia skrośne pomiędzy strojonymi parametrami regulatora mocno zależą od wartości tych parametrów, co sprawia, że proces strojenia jest wolno zbieżny, a dochodzenia do nastaw optymalnych musi odbywać się drogą małych kroków, aby uniknąć drgań związanych z powstawaniem cykli granicznych w pobliżu optymalnych nastaw strojonych parametrów.

Alternatywny sposób strojenia parametrów regulatora może być szczególnie przydatny w wypadku kiedy nieznane

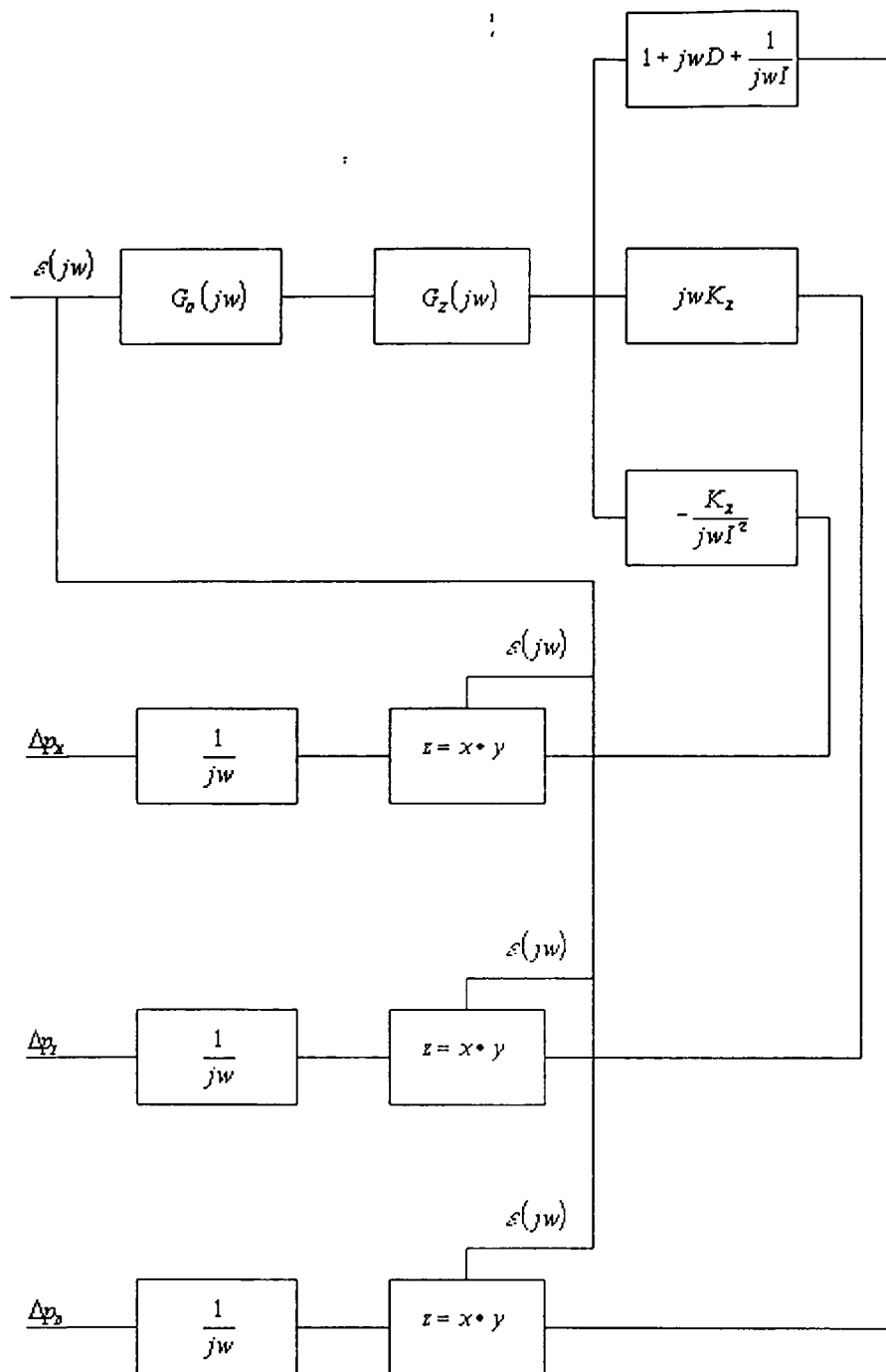
jest charakterystyka zakłóceń oddziałujących na obiekt regulacji, a znane są parametry obiektu regulacji.



Rys.1. Struktura układu pozwalającego na wyznaczenie przebiegu sygnału  $\xi(j\omega)$  dla alternatywnego sposobu adaptacji parametrów dynamicznych.



Rys.3. Ogólny schemat realizacji układu adaptacji w oparciu o alternatywny sposób strojenia parametrów dynamicznych regulatora.



Rys.3. Układ adaptacji z zastosowaniem regulatora PID zrealizowany w oparciu o alternatywny sposób strojenia parametrów dynamicznych regulatora.

#### 4. Charakterystyki zamkniętego układu regulacji zawierającego obiekt inercyjny z opóźnieniem i regulator PID.

Podstawowym problemem wymagającym rozstrzygnięcia jest pytanie: czy i w jakim stopniu proponowana metoda autostrojania umożliwia strojenie parametrów regulatora typu PID w układach pracy zawierających obiekt inercyjny z opóźnieniem przy braku znajomości zarówno parametrów obiektu jak i charakterystyki zakłóceń na niego oddziałujących?

Odpowiedź na to pytanie może być łatwiejsza po możliwie dokładnym przeanalizowaniu charakterystyk widm sygnałów w układzie regulacji i charakterystyk częstotliwościowych transmitancji zamkniętego układu automatycznej regulacji.

Zgodnie z założeniami odnośnie transmitancji obiektu (2.3) i regulatora (2.1) w zamkniętym układzie regulacji interesuje nas 6 parametrów: 3 parametry obiektu  $K_0$ ,  $T_0$ ,  $\tau$  oraz 3 parametry regulatora  $K_R$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ . Wynika stąd dość duża ilość kombinacji wartości parametrów ograniczająca przejrzystość analizy. Odnosząc jednak stałe czasowe obiektu i regulatora do czasu opóźnienia obiektu [zgodnie z (2.2) i (2.3) oraz wprowadzając parametr  $K=K_0 \cdot K_R$  ilość parametrów układu zamkniętego zmniejsza się do czterech: jeden parametr charakteryzujący obiekt (stała  $T$ ) oraz 3 parametry dotyczące regulatora ( $K$ ,  $I$ ,  $D$ ). Wzmocnienie regulatora traktowane jest jako łączne wzmocnienie obiektu i



regulatora, a wzmocnienie obiektu przyjmuje się równe jedności co w niczym nie ogranicza ogólności rozważań.

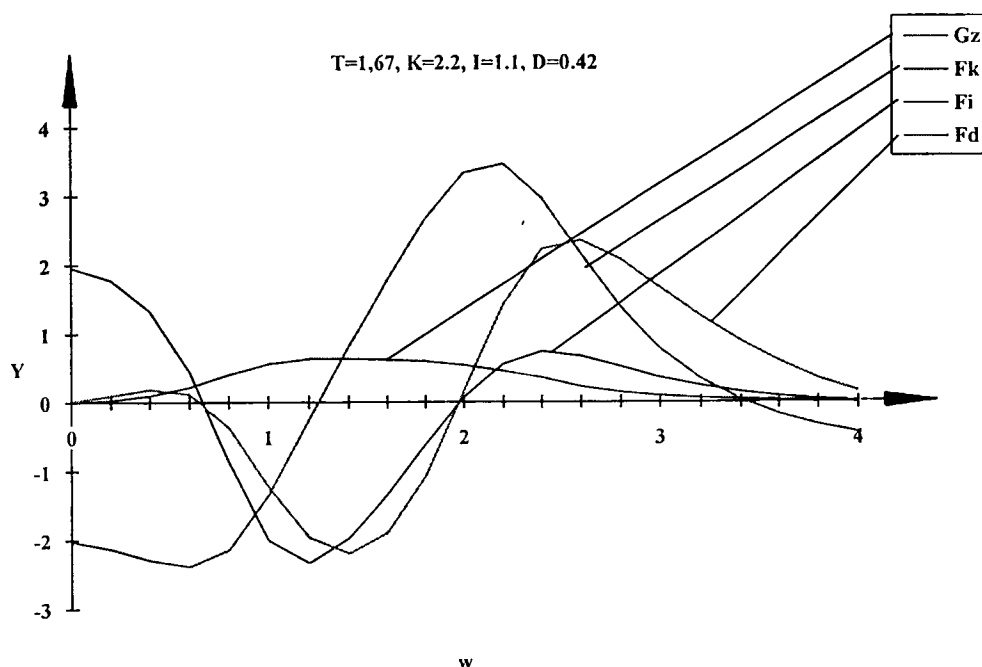
Ze względu na założenie, że wskaźnikiem jakości regulacji jest całka z kwadratu odchyłki regulacji, w analitycznych wyrażeniach opisujących charakterystyki autostrojzenia zarówno sygnały jak i charakterystyki częstotliwościowe występują w kwadratach ich wartości bezwzględnej. Z tego też względu przebiegi analizowanych charakterystyk dotyczą z reguły kwadratu funkcji lub kwadratu sygnału.

Na rysunkach rys.4 do rys.9 przedstawiono podstawowe charakterystyki dla zamkniętego układu regulacji. Są to:

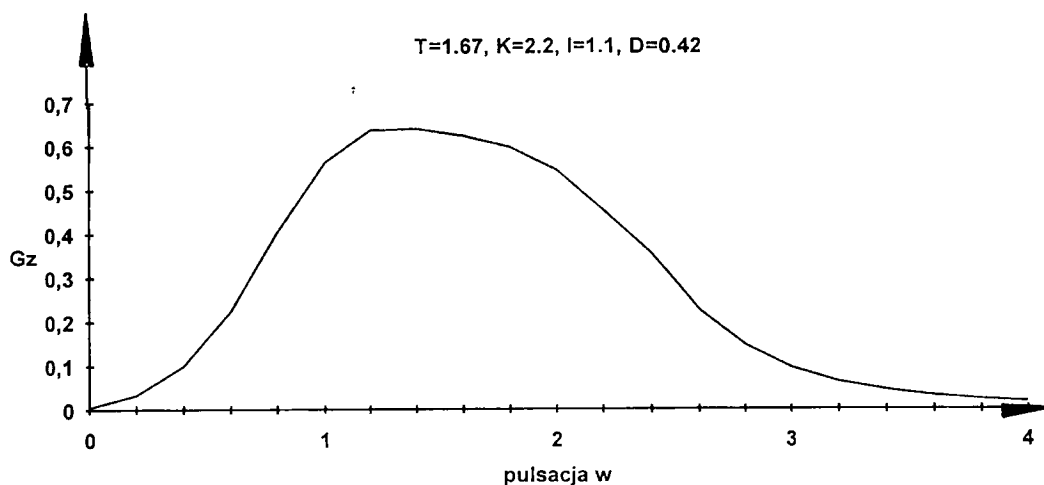
charakterystyki strojenia poszczególnych parametrów  $f_K(w)$ ,  $f_I(w)$ ,  $f_D(w)$  oraz charakterystyka zamkniętego układu regulacji  $|G_Z(j\omega)|^2$ . Rys.6 pokazuje silną zależność charakterystyki  $|G_Z(j\omega)|^2$  od wartości nastawy wzmocnienia. Wpływ ten jest znacznie silniejszy niż to co można wnioskować na podstawie pogorszenia wskaźnika jakości regulacji przy stosunkowo niewielkim odchyleniu wzmocnienia od wartości optymalnej. Wskazuje to na możliwość uzyskania dużej czułości strojenia parametrów.

Rysunki rys.7, rys.8 i rys.9 pokazują przebiegi charakterystyk  $|G_Z(j\omega)|^2$  dla różnych wartości parametrów obiektu regulacji przy optymalnych nastawach parametrów dynamicznych regulatora obliczonych jednak w oparciu o różne źródłowe zalecenia aplikacyjne. Z rysunków wynika, że kształt charakterystyk w małym

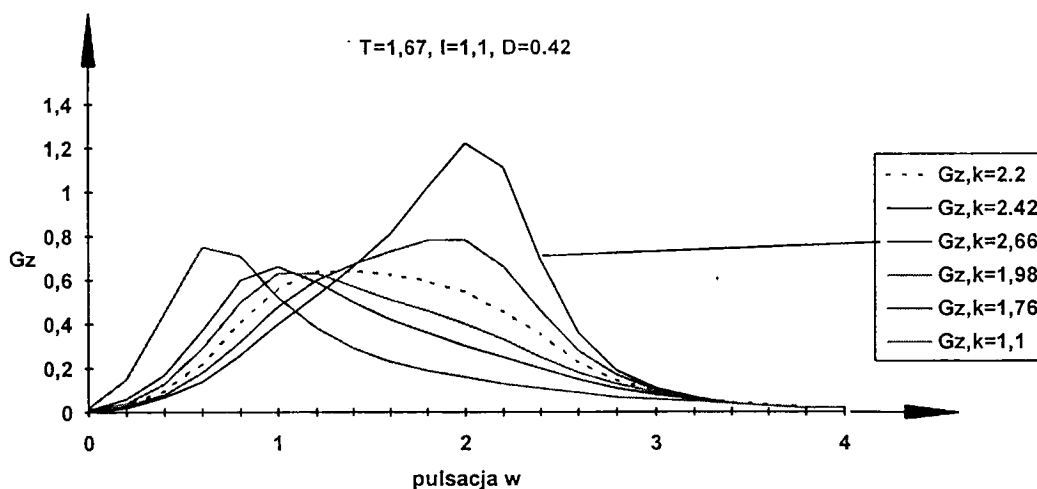
stopniu zależy od parametrów obiektu. Charakterystyki te jednak różnią się dość znacznie w zależności od tego, z których zaleceń odnośnie optymalnych nastaw skorzystano.



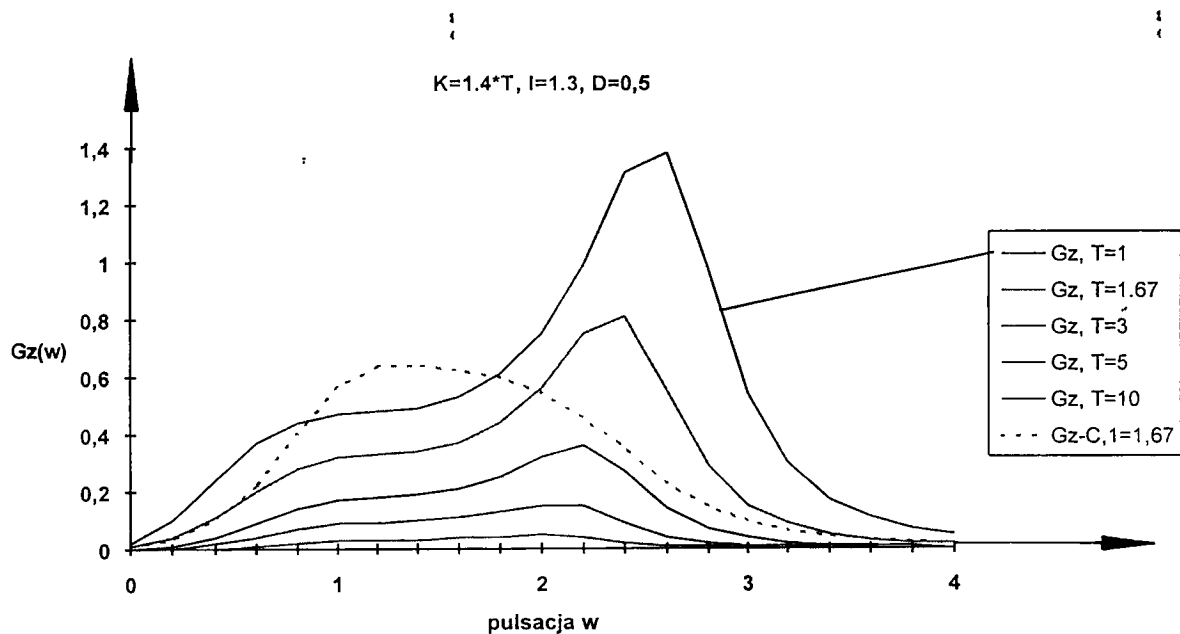
Rys.4. Rzeczywiste przebiegi charakterystyk strojenia parametrów regulatora  $f_K(w)$ ,  $f_I(w)$ ,  $f_D(w)$  oraz charakterystyka  $|G_Z(j\omega)|^2$  dla obiektu o  $T=1.67$  i regulatora PID z nastawami wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki z kwadratu odchyłki regulacji.



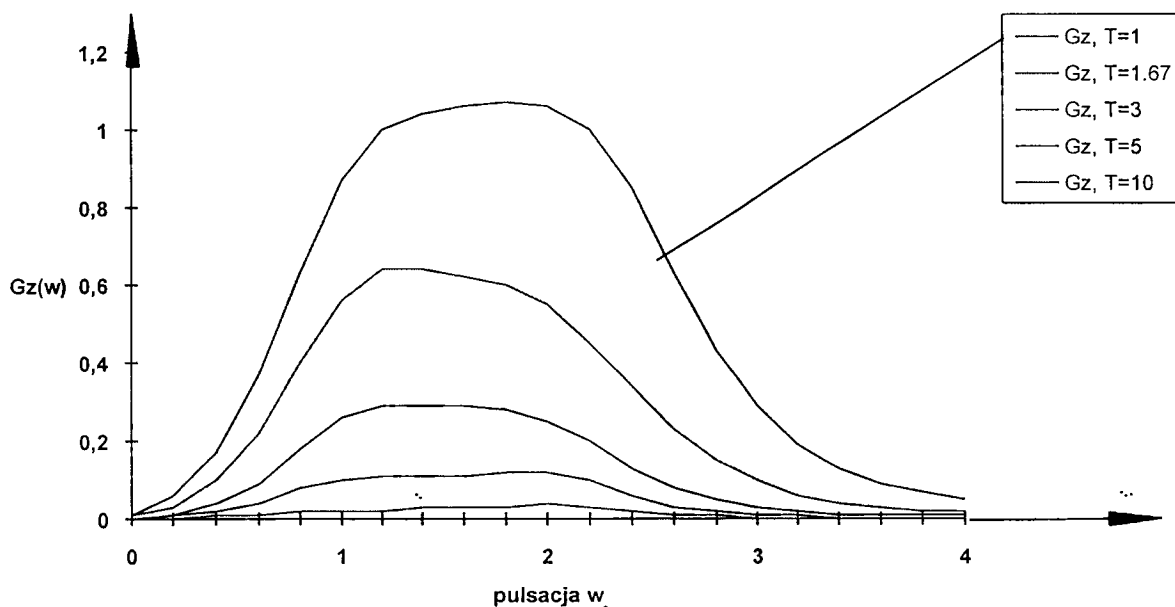
Rys.5. Przebieg charakterystyki  $|G_Z(j\omega)|^2$  dla obiektu o  $T=1.67$  i regulatora PID z nastawami wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



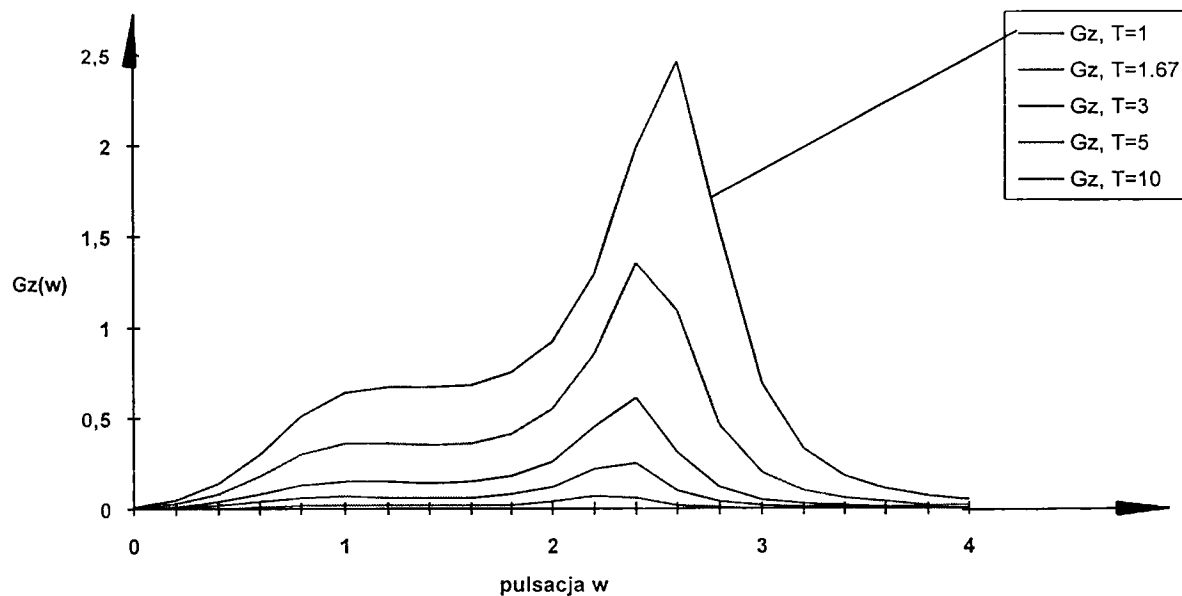
Rys.6. Przebiegi charakterystyk  $|G_Z(j\omega)|^2$  dla obiektu o  $T=1.67$  i regulatora PID z nastawami parametrów P i D wg. Cypkina oraz różnych nastawach parametru K, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



Rys.7. Przebiegi charakterystyk  $|G_z(j\omega)|^2$  dla różnych obiektów regulacji i regulatora PID z nastawami zalecanymi w literaturze [4] przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



Rys.8. Przebiegi charakterystyk  $|G_z(j\omega)|^2$  dla różnych parametrów obiektu i regulatora PID z zalecanymi parametrów wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



Rys.9. Przebiegi charakterystyk  $|G_z(j\omega)|^2$  dla różnych parametrów obiektu regulacji i regulatora PID z eksperymentalnie wyznaczonymi nastawami, przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.

## 5. Optymalne nastawy parametrów regulatora i charakterystyki strojenia dla różnych parametrów obiektu regulacji.

Zbadanie przebiegu charakterystyk strojenia parametrów regulatora wymaga ustalenia, które zalecane w literaturze optymalne nastawy parametrów regulatora należy uznać za najbardziej odpowiednie. Zalecenia te dotyczą z reguły zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu jednonercyjnego obiektu regulacji z opóźnieniem oraz wskaźnika jakości w postaci całki z kwadratu odchyłki regulacji. Rozbieżności w wartościach zalecanych nastaw skłoniły autora opracowania do wyznaczenia faktycznych wartości optymalnych nastaw parametrów dynamicznych, co przeprowadzono drogą obliczeń numerycznych bazujących na zaproponowanych równaniach autostrojenia (3.1) - oprogramowanie opracowane dla tego typu obliczeń zawiera Załącznik 1.

W tabeli 1 zestawiono wartości optymalnych nastaw regulatora dla różnych wartości parametrów obiektu i różnych procedur doboru. Tabela zawiera również rzeczywiste wartości wskaźników jakości przy nastawach wyznaczonych drogą obliczeń numerycznych. Minimalne wartości wskaźników odpowiadają zgodnie z przewidywaniami nastawom wyznaczonym numerycznie, w oparciu o proponowaną metodę adaptacji, odpowiadającym wartościom zerowym w równaniach (3.1). Przy zalecanych

nastawach wg innych źródeł wskaźniki jakości są nawet do ok. 20% gorsze.

W oparciu o wartości optymalnych nastaw wg tabeli 1 przygotowano wykresy charakterystyk strojenia dla różnych parametrów obiektu. Wykresy te pokazane są na rysunkach rys. 9 do rys.17.

Tabela 1.

Optymalne nastawy regulatora przy zakłóceniu skokowym wprowadzonym na wejście obiektu regulacji.

Charakterystyka obiektu regulacji	Zalecane nastawy wg poradnika	Zalecane nastawy wg Cypkina	Nastawy wyznaczone w oparciu o proponowaną procedurę doboru nastaw
	Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$
T=1.0	K=1.4; I=1.3; D=0.5 W=23.461	K=1.4; I=0.95; D=0.41 W=23.938	K=1.548; I=0.900 D=0.543 W=21.093
T=1.67	K=2.34; I=1.3; D=0.5 W=12.180	K=2.2; I=1.1; D=0.42 W=13.905	K=2.432; I=1.0523; D=0.565 W=11.664
T=3.0	K=4.2; I=1.3; D=0.5 W=5.238	K=4.0; I=1.2; D=0.45 W=5.945	K=4.228; I=1.205; D=0.578 W=5.041
T=5.0	K=7.0; I=1.3; D=0.5 W=2.316	K=6.7; I=1.3; D=0.48 W=2.467	K=6.951; I=1.306; D=0.5838 W=2.182
T=10	K=14.0; I=1.3; D=0.5 W=0.694	K=14.0; I=1.5; D=0.5 W=0.660	K=13.780; I=1.393; D=0.588 W=0.632

Przebiegi charakterystyk wskazują, że kształt charakterystyk w małym stopniu zależy od parametrów obiektu, chociaż przy większych wartościach stałej T w przebiegach charakterystyk obserwuje się silniejsze wahania wartości. Należy jednak pamiętać, że sygnały strojenia poszczególnych parametrów będą malały wraz ze wzrostem stałej T z uwagi na to, że przy dużej stałej czasowej obiektu zakłócenia są silniej tłumione przez obiekt.



Na rysunkach rys.18 do rys.20 pokazane są przebiegi charakterystyk widma kwadratu odchyłki regulacji, a na rys.21 do rys.29 przebiegi sygnałów strojenia poszczególnych parametrów regulatora dla różnych parametrów obiektu. Sygnały strojenia zostały wykreślone zgodnie z zależnością:

$$EF_p(w) = |E(jw)|^2 \cdot \frac{\partial |G_z(jw)|^2}{\partial p_{rk}} \cdot \frac{1}{|G_z(jw)|^2}$$

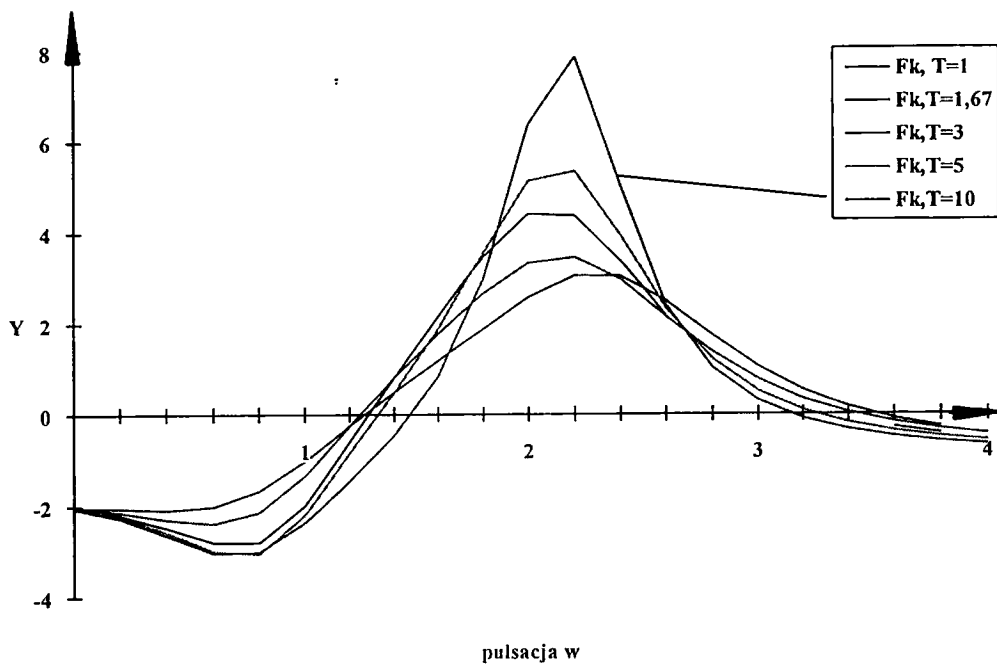
(5.1)

Procentowa zmiana nastawy danego parametru w procesie strojenia powinna być w przybliżeniu proporcjonalna do całki z sygnału strojenia:

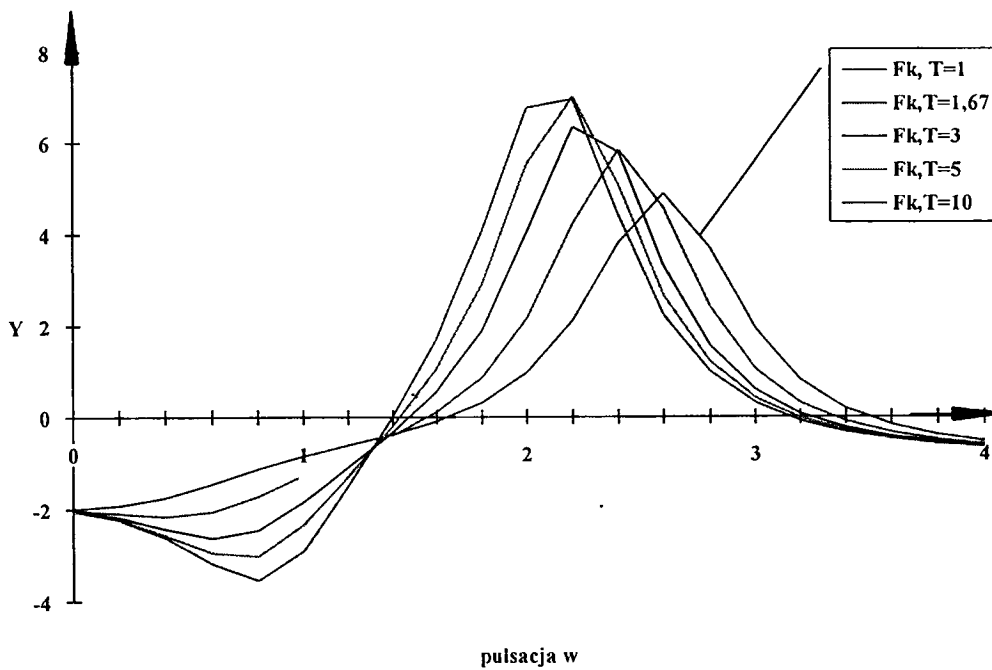
$$\partial_p = \int_{w=0}^{w=\infty} EF_p(w) dw$$

(5.2)

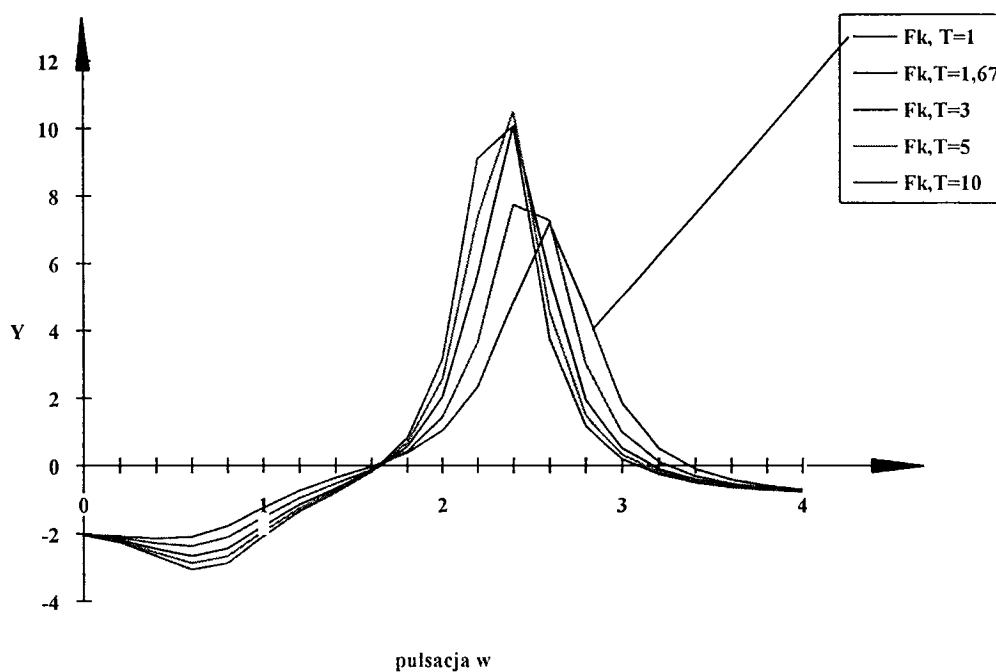
Przebiegi przedstawione na rys.21 do rys.29 potwierdzają poprzednie spostrzeżenie, że przebiegi charakterystyk w małym stopniu zależą od parametrów obiektu. Zarówno kształt jak i punkt przecięcia osi odciętych (a więc zmiana znaku sygnału strojenia w zależności od częstotliwości zakłóceń pozostają praktycznie niezmienione).



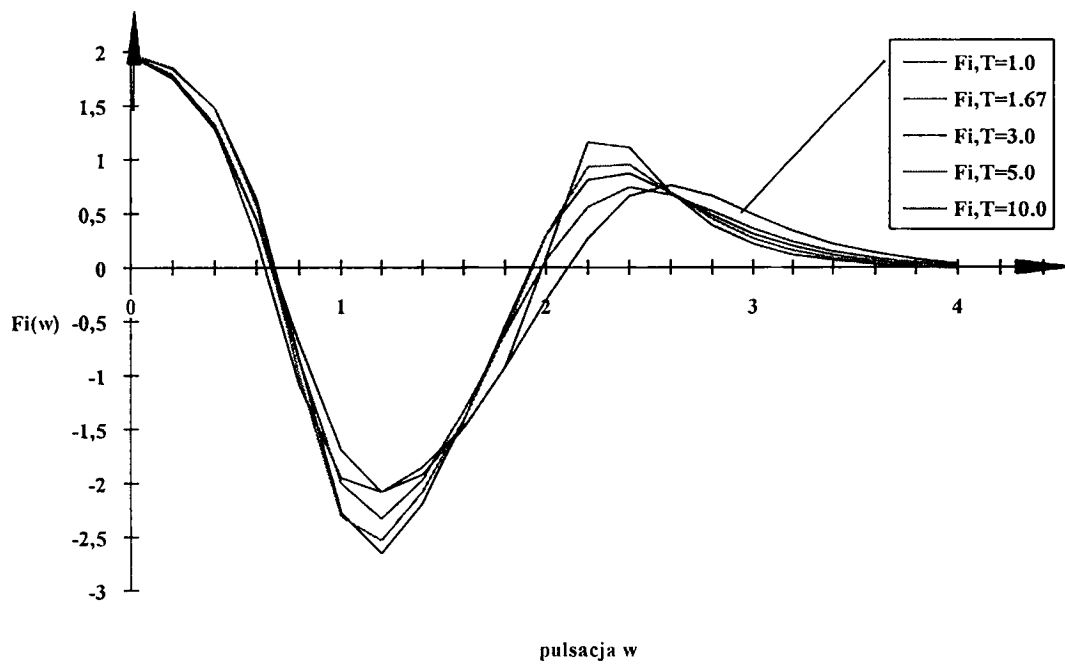
Rys. 9. Przebiegi charakterystyk  $F_k(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



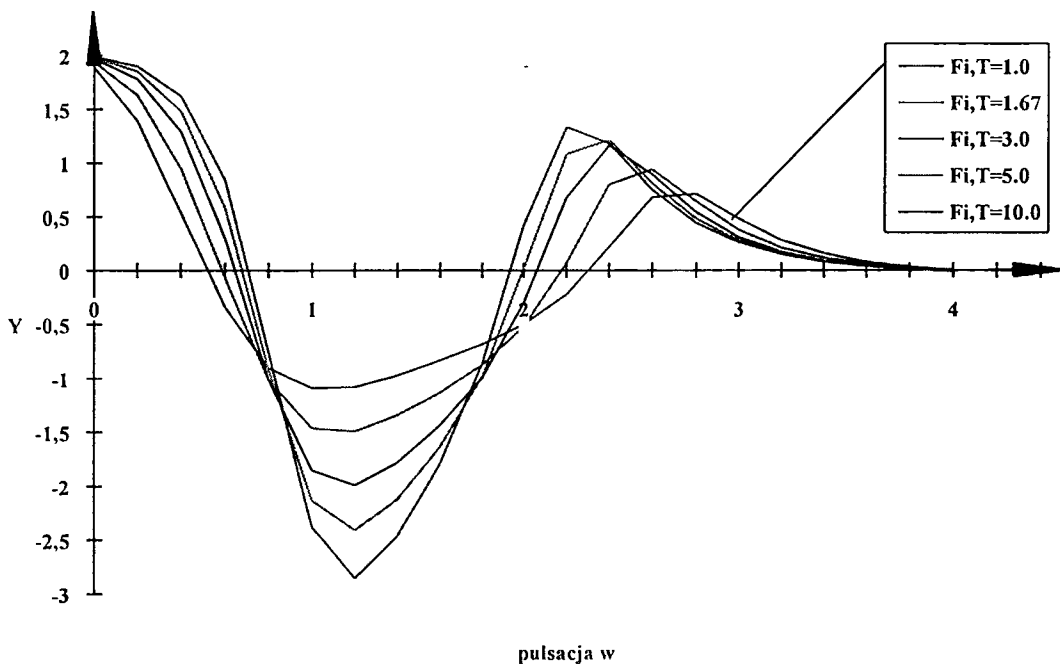
Rys. 10. Przebiegi charakterystyk  $F_k(\omega)$  dla zalecańnych nastaw wg. Poradnika przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



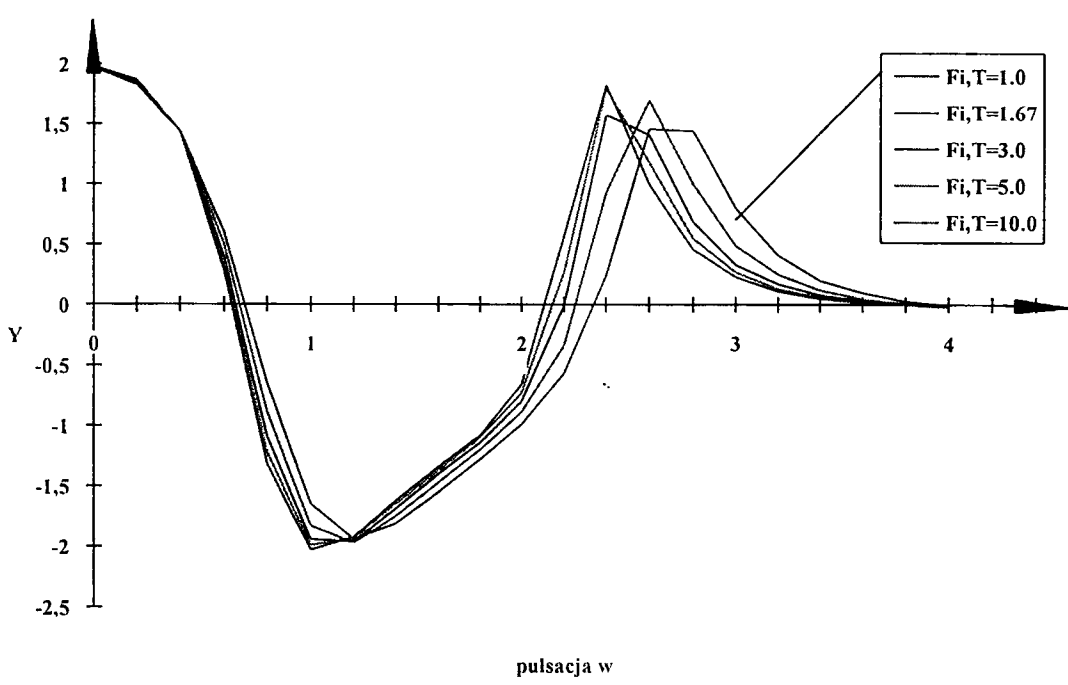
Rys. 11. Przebiegi charakterystyk  $F_k(\omega)$  dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



Rys. 12. Przebiegi charakterystyk  $F_i(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.

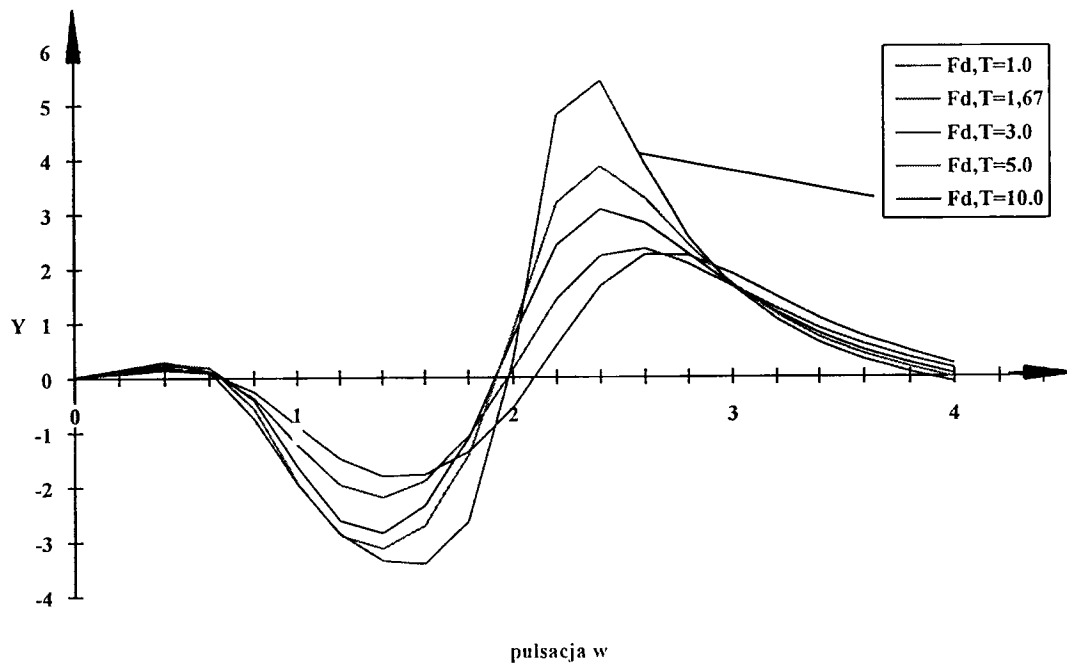


Rys. 13. Przebiegi charakterystyk  $F_i(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Poradnika przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.

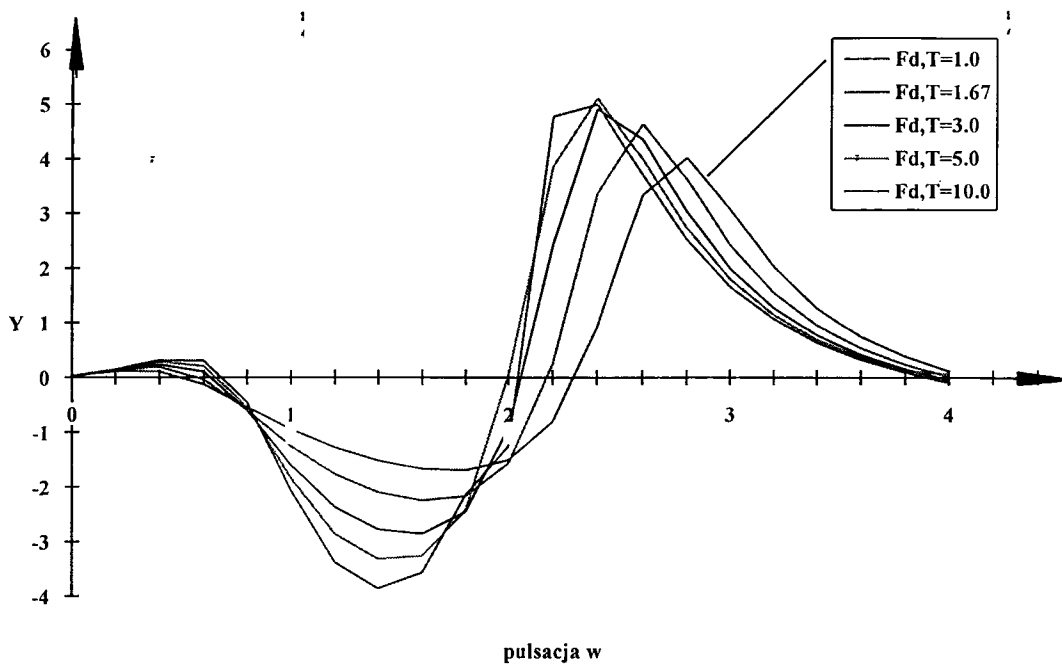


Rys. 14. Przebiegi charakterystyk  $F_i(\omega)$  dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium

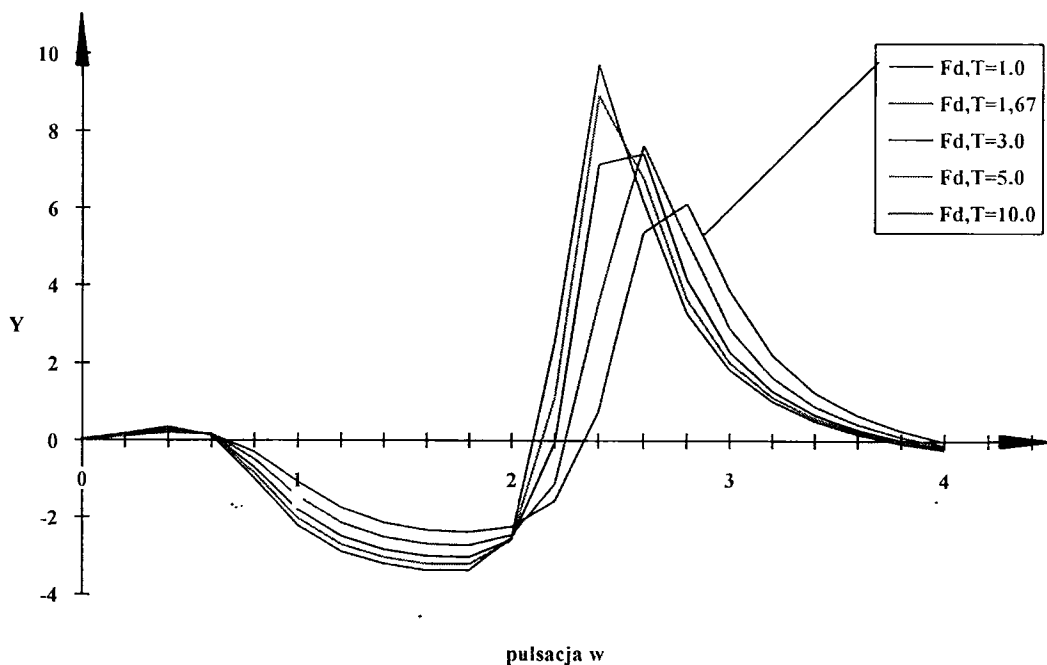
minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



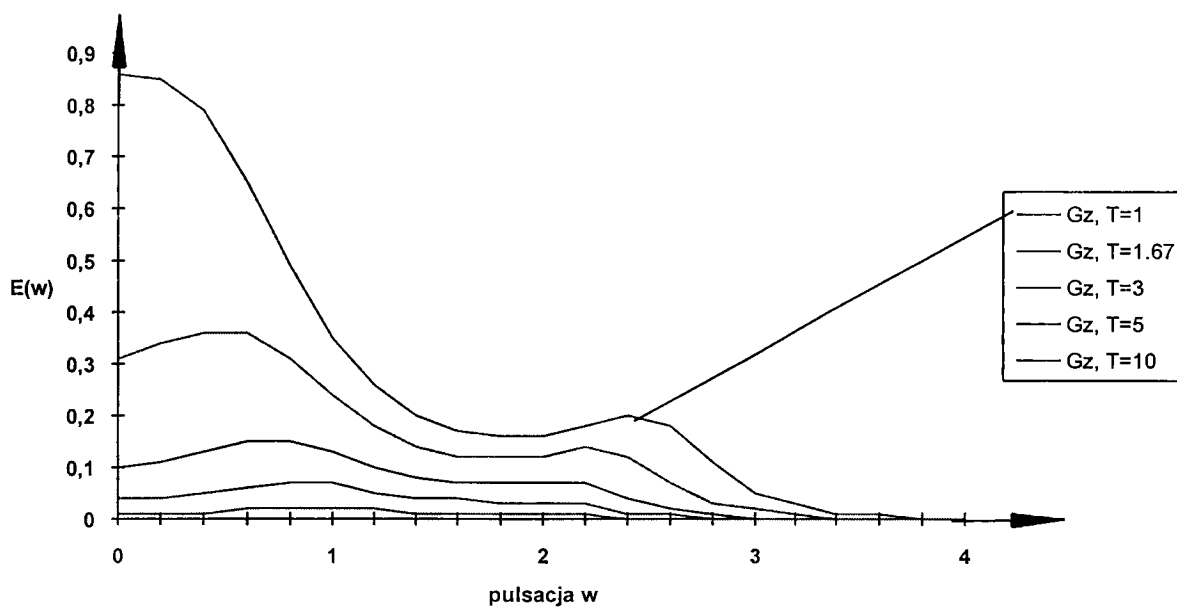
Rys. 15. Przebiegi charakterystyk  $F_d(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



Rys. 16. Przebiegi charakterystyk  $F_d(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Poradnika przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.

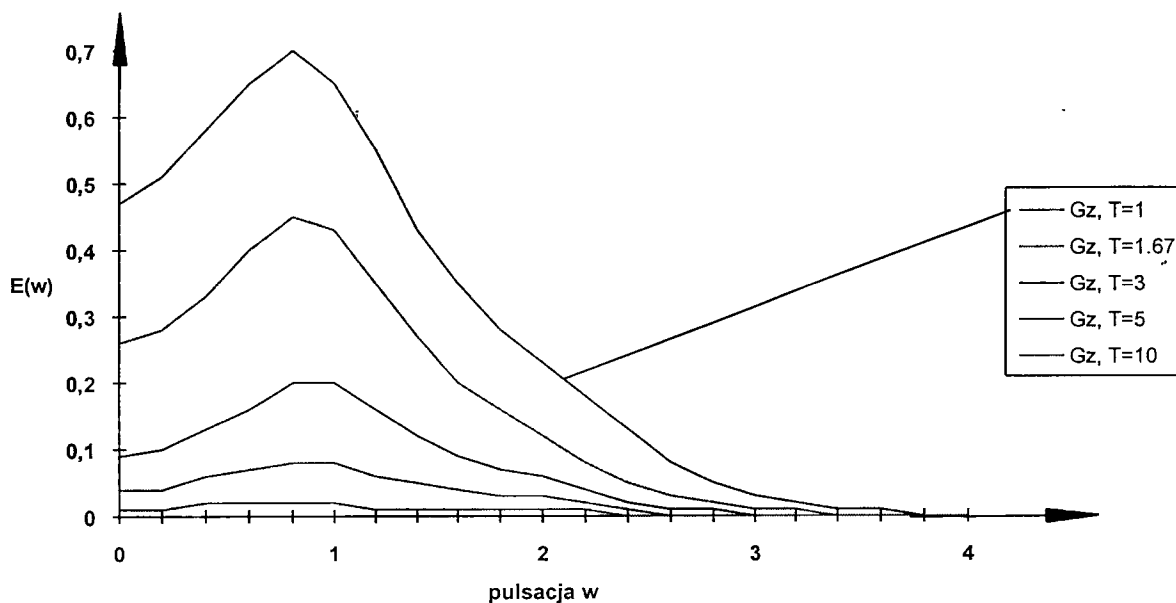


Rys. 17. Przebiegi charakterystyk  $F_d(\omega)$  dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.

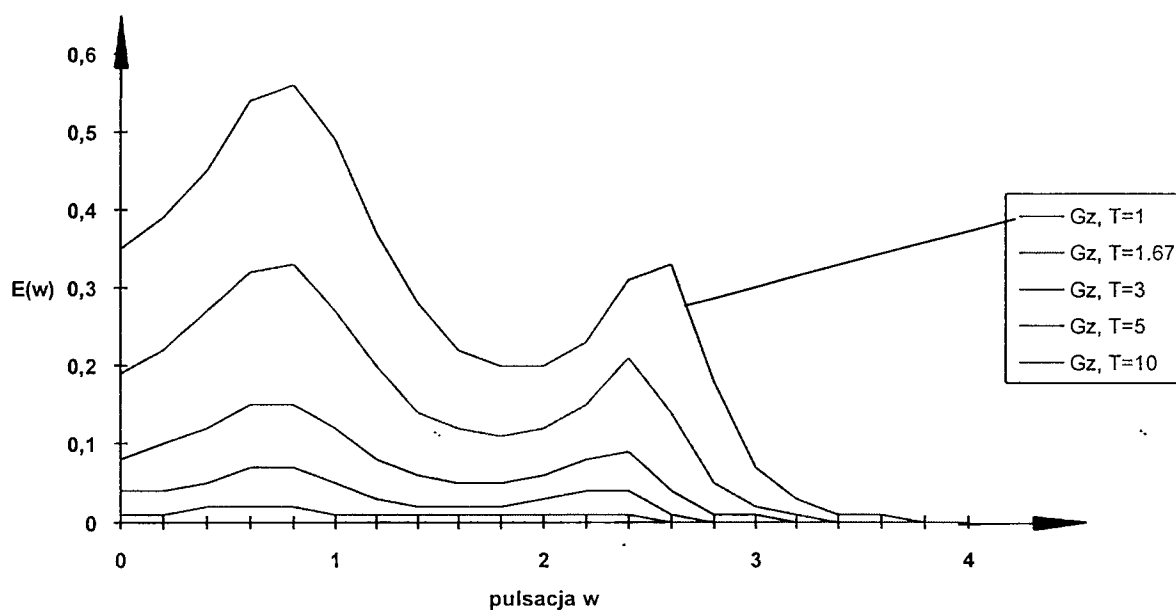


Rys. 18. Widmo sygnałów  $E^2(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Poradnika Inżyniera Automatyka przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.

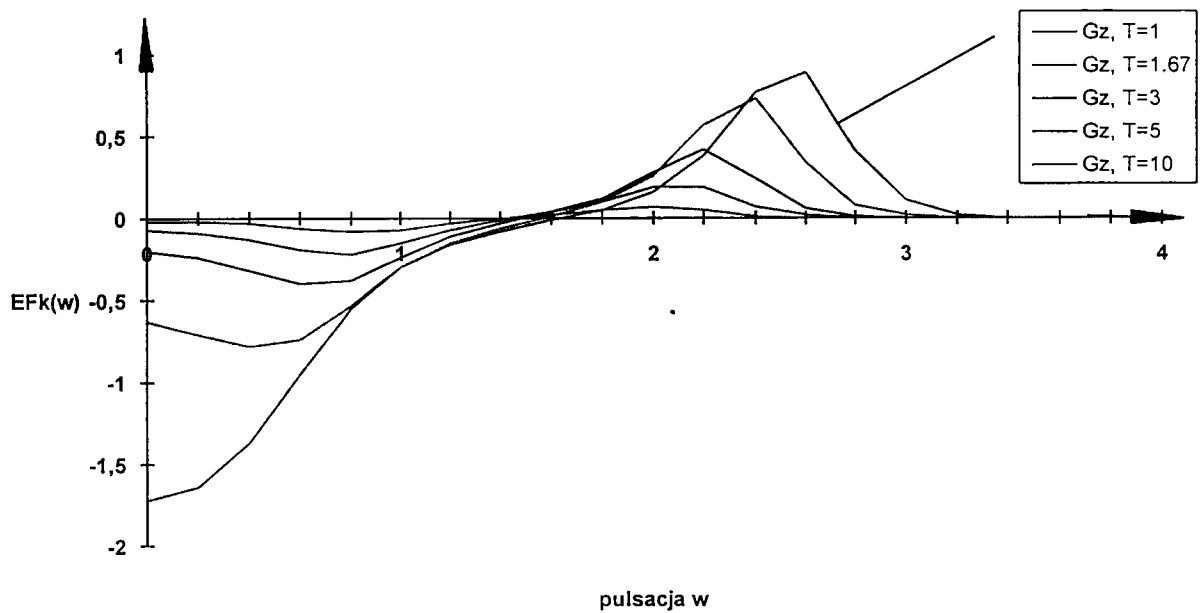




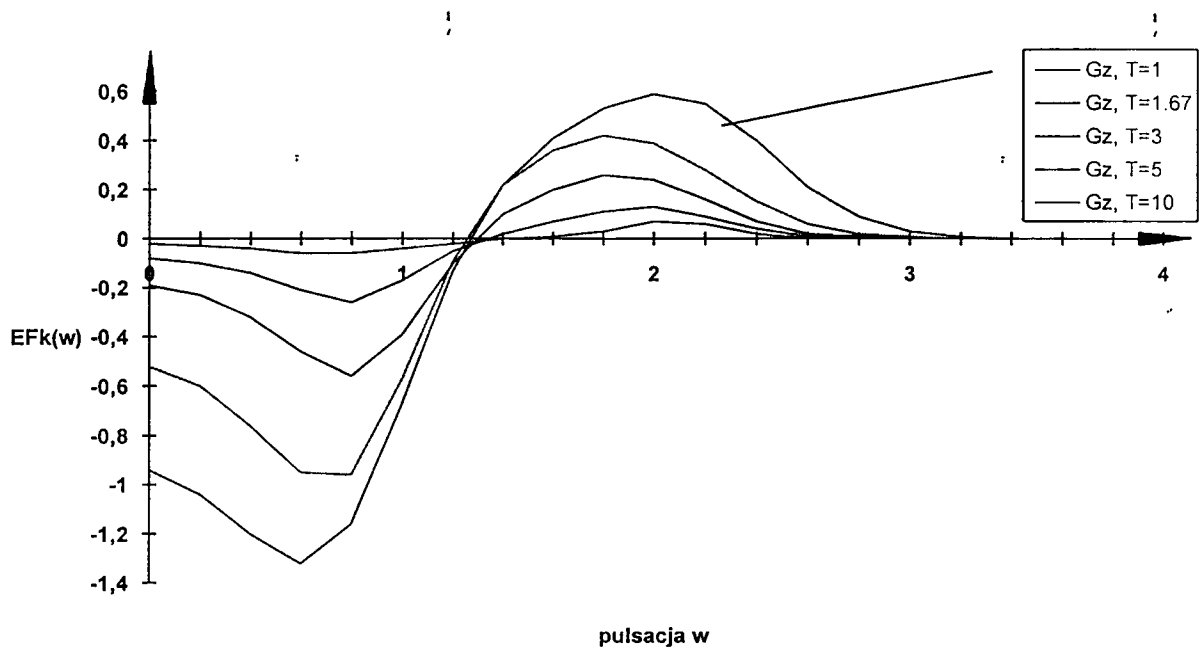
Rys. 19. Widmo sygnałów  $E^2(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.



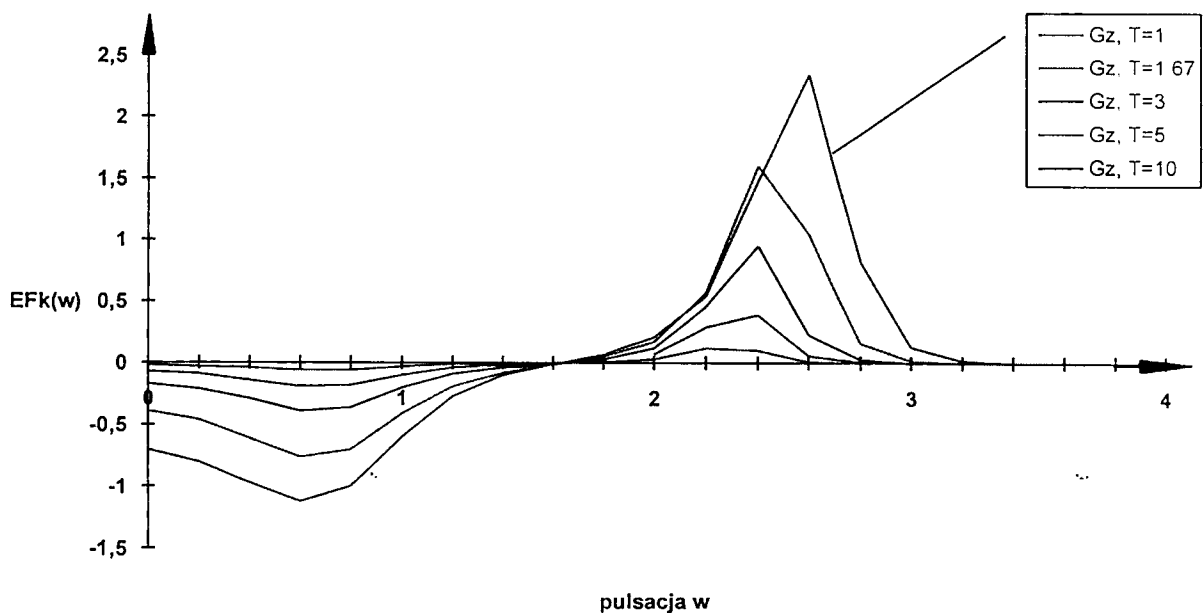
Rys. 20. Widmo sygnałów  $E^2(\omega)$  dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.



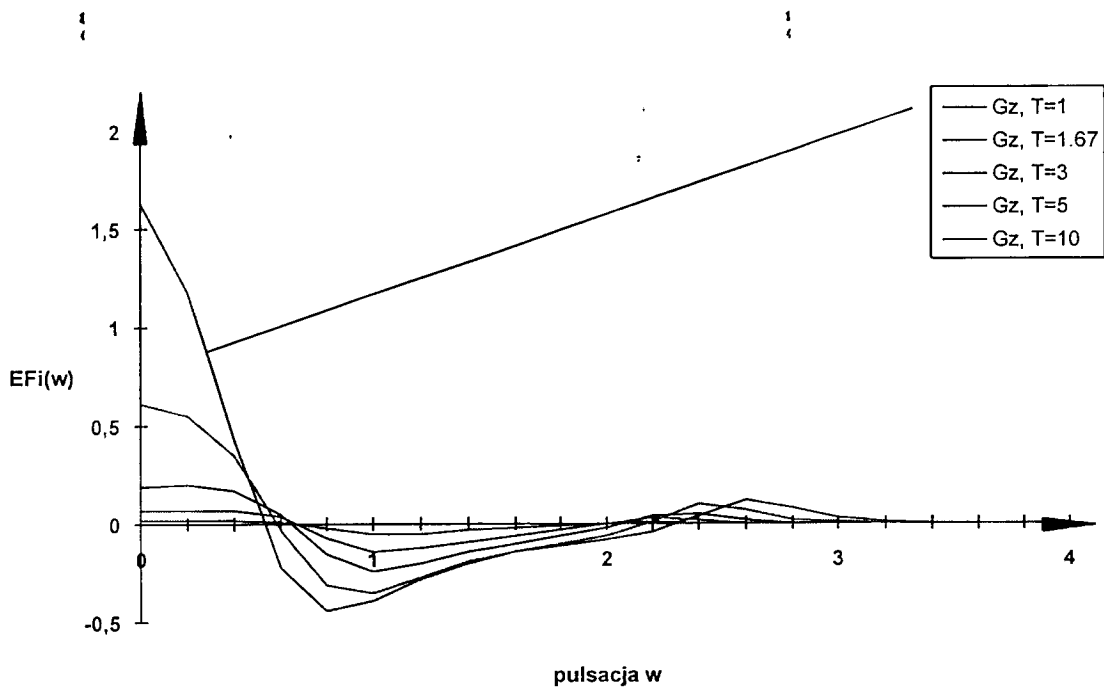
Rys. 21. Widmo sygnałów  $EFk(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Poradnika Inżyniera Automatyka przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.



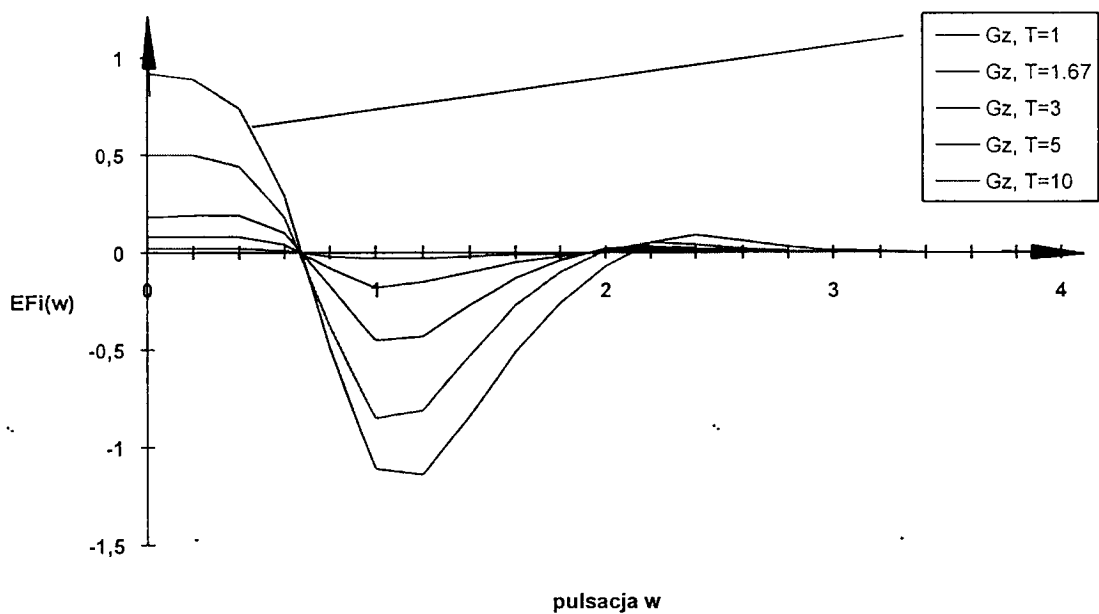
Rys. 22 Widmo sygnałów  $EFk(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.



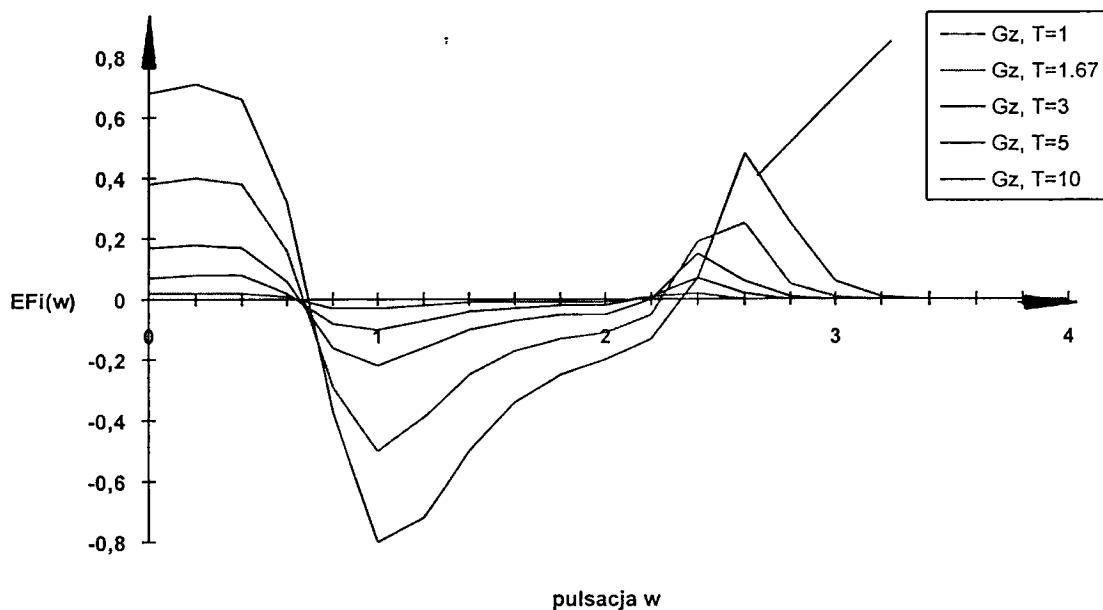
Rys. 23. Widmo sygnałów  $EFk(\omega)$  dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.



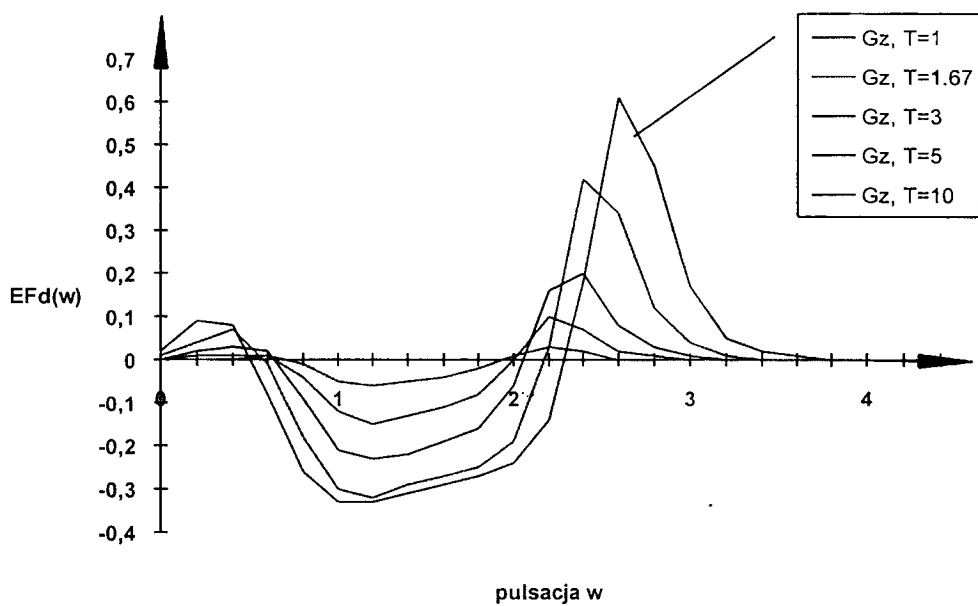
Rys. 24. Widmo sygnałów  $E_{Fi}(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Poradnika Inżyniera Automatyka przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.



Rys. 25. Widmo sygnałów  $E_{Fi}(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.

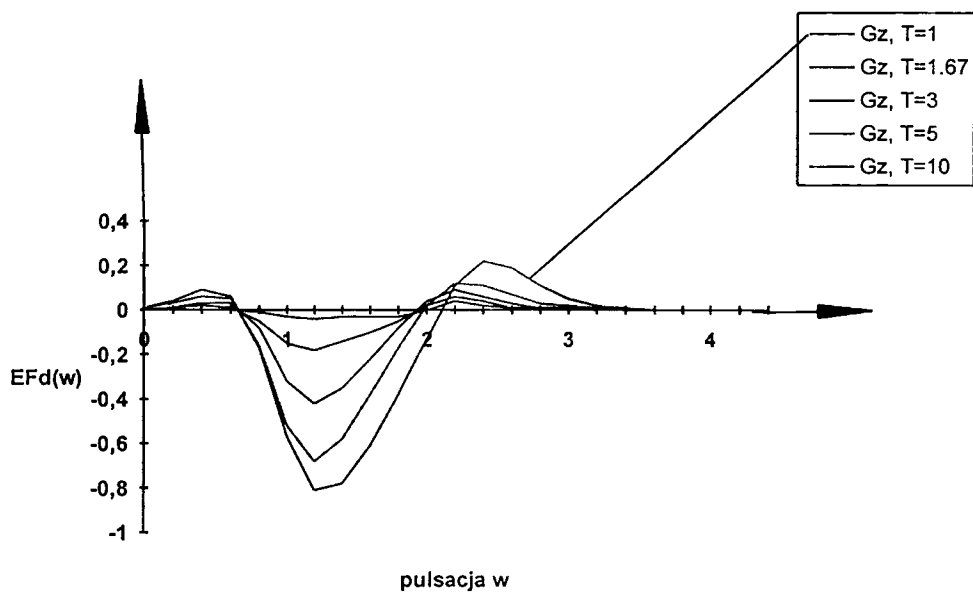


Rys. 26. Widmo sygnałów  $E_{Fi}(\omega)$  dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.

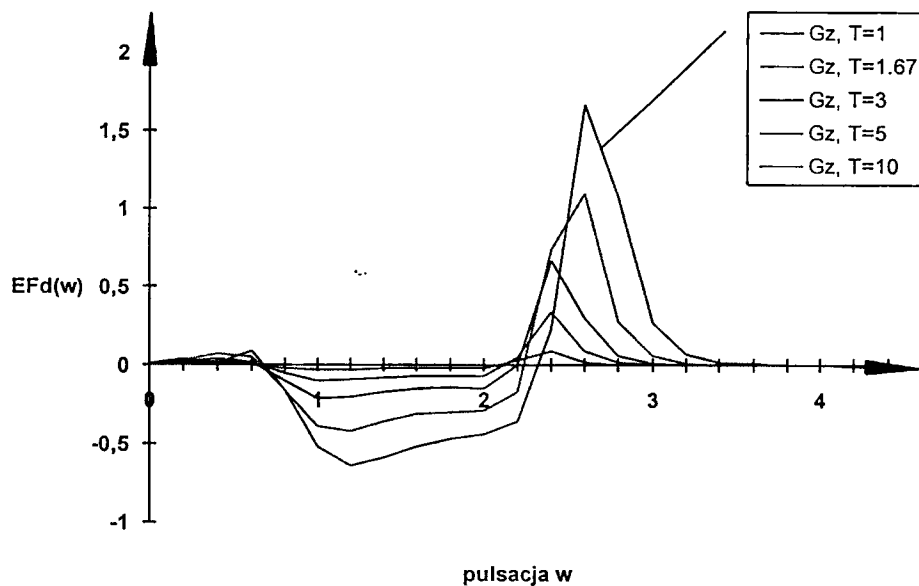


Rys. 27. Widmo sygnałów  $E_{Fd}(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Poradnika Inżyniera Automatyka przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla

zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.



Rys. 28. Widmo sygnałów  $E_{Fd}(\omega)$  dla zalecanych nastaw wg. Cypkina przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.



Rys. 29. Widmo sygnałów  $E_{Fd}(\omega)$  dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego na wejściu układu regulacji.

## 6. Wpływ charakterystyki zakłóceń na charakterystyki strojenia parametrów regulatora.

Proponowany sposób strojenia parametrów regulatora powinien umożliwiać znalezienie optymalnych nastaw regulatora w zależności od charakterystyki obiektu jak i od charakterystyki zakłóceń na niego oddziałujących. W poprzednich rozdziałach niniejszej pracy uwaga została skoncentrowana na parametrach obiektu przy założeniu dość szeroko stosowanego zakłócenia w postaci skoku jednostkowego sygnału, wprowadzanego na wejście obiektu regulacji. Przy analizie wpływu charakterystyki zakłóceń na jakość strojenia staje się niezbędnym użycie również innych sygnałów zakłócających zarówno o większym udziale wyższych częstotliwości niż skok jednostkowy na wejściu obiektu jak i o niższym udziale dużych częstotliwości a większym udziale małych częstotliwości w widmie sygnału zakłócającego. Oparcie analizy o zakłócenia o charakterze stochastycznym byłoby bardzo pracochłonne, a jednocześnie wyniki badań mogłyby okazać się niezbyt dokładne. W związku z powyższym została podjęta decyzja o użyciu typowych sygnałów zakłócających takich jak skok jednostkowy, impuls Dirace'a i funkcja liniowo narastająca wprowadzane bądź to na wejście regulatora bądź też na wejście obiektu regulacji.



Poniżej na rys.30 i rys.31 przedstawiono charakterystyki widmowe mocy dla różnych sygnałów zakłócających, przy odniesieniu sygnału do wejścia regulatora, niezależnie od rzeczywistego miejsca oddziaływania sygnału. Wybrano typowe łatwe do stosowania w modelu doświadczalnym rodzaje sygnałów zakłócających, a mianowicie:

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

$$|Z_{LO}(j\omega)|^2 = \frac{G_o(j\omega)G_o(-j\omega)}{\omega^4}$$

(6.1)

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

$$|Z_{LR}(j\omega)|^2 = \frac{1}{\omega^4}$$

(6.2)

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

$$|Z_{IO}(j\omega)|^2 = G_o(j\omega)G_o(-j\omega)$$

(6.3)

d) Impuls Dirace'a podany na wejście regulatora (IR):

$$|Z_{IR}(j\omega)|^2 = 1$$

(6.4)

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

$$|Z_{SO}(j\omega)|^2 = \frac{G_O(j\omega)G_O(-j\omega)}{\omega^2}$$

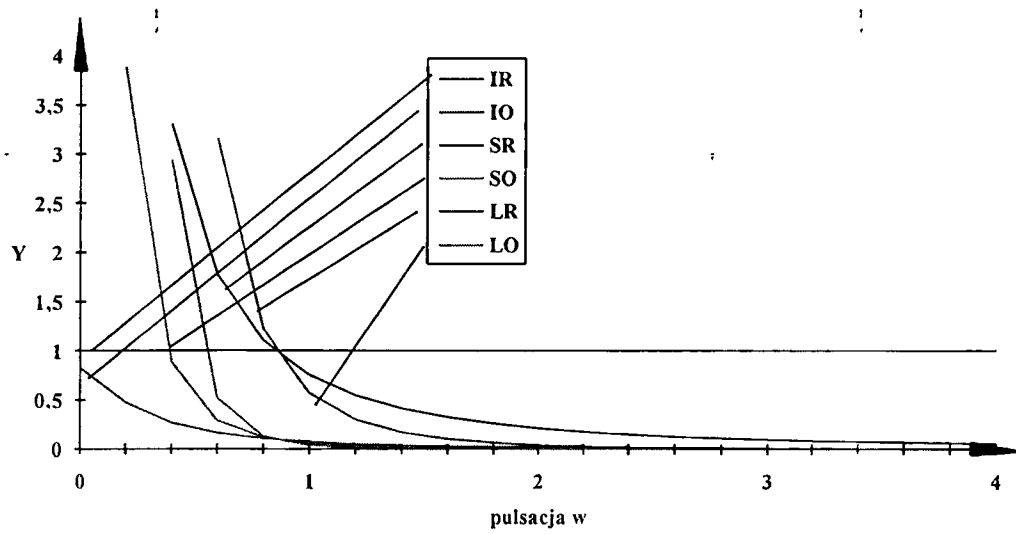
(6.5)

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

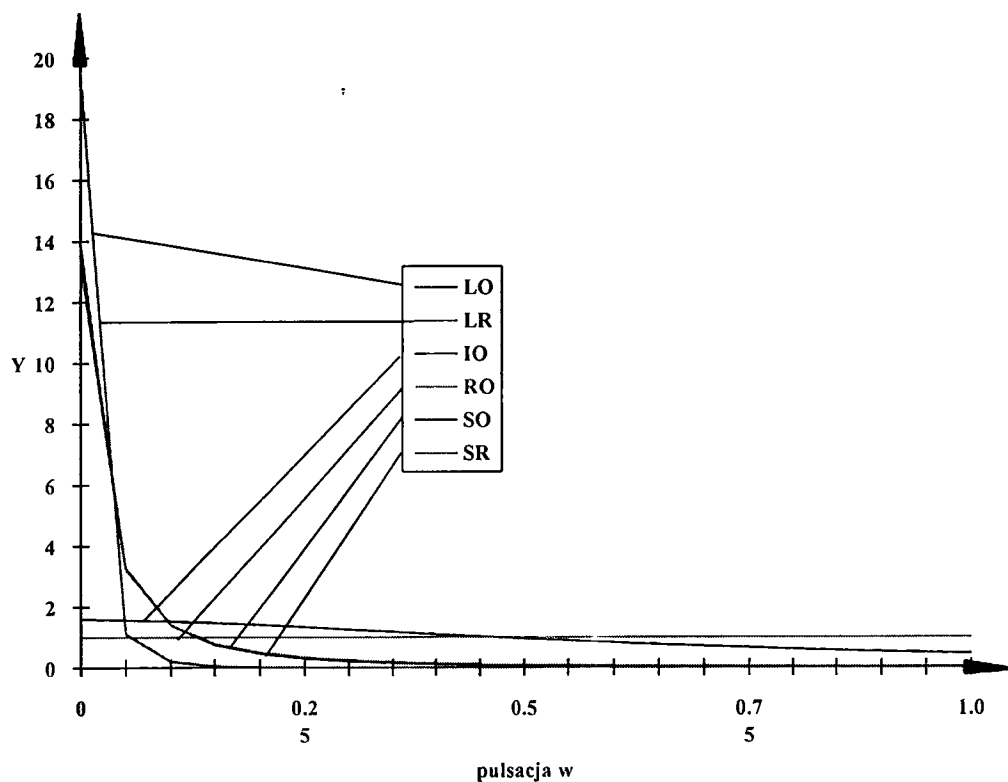
$$|Z_{SR}(j\omega)|^2 = \frac{1}{\omega^2}$$

(6.6)

Charakterystyki na rys.30 i rys.31 odpowiadają zależnościom (6.1) do (6.6). Wskazują one, że tego typu zakłócenia obejmują dość szeroką gamę zakłóceń, które mogą wystąpić w rzeczywistych warunkach pracy. Wyniki badań otrzymane przy tego typu zakłóceniach mogą być traktowane jako miarodajne przy ocenie jakości dostrajania się układu do zmian zakłóceń oddziałujących na obiekt regulacji.



Rys.30 Charakterystyki widmowe kwadratu sygnału zakłócającego wykreślone bezpośrednio na podstawie wzorów analitycznych.



Rys.31 Charakterystyki widmowe kwadratu sygnału zakłócającego wykreślone przy zachowaniu stałego pola, które obejmuje dana charakterystyka w zakresie częstotliwości pokazanych na wykresie.

W tabeli 2 podano wartości optymalnych nastaw parametrów dynamicznych wyznaczone eksperymentalnie drogą obliczeń numerycznych bazujących na zaproponowanych równaniach autostrojania (3.1) - oprogramowanie opracowane dla tych typu obliczeń podano w Załączniku 1.

Tabela 2.

Optymalne nastawy regulatora przy różnych sygnałach zakłócających.

Charakterystyka obiektu regulacji	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu skoku jednostkowego na wejściu regulatora.  SR  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia impulsowego na wejściu obiektu.  IR  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu regulatora.  LR  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu.  LO  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$
T=1.0	K=1,159 I=1,190 D=0,5013  W=63,983	K=0,476 I = $\infty$ D=0,6192  W=25,043	K=1.8007 I=0.4569 D=0.6772  W=92,9796	K=1,9996 I=0,4053 D=0,6850  W=46,1611
T=1.67	K=1,684 I=1,751 D=0,5374  W=64,511	K=0,983 I = $\infty$ D=0,627  W=12,491	K=2,6534 I=0,5766 D=0,6796  W=84,6747	K=3,0370 I=0,4669 D=0,6984  W=26,5104
T=3.0	K=2,741 I=1,2,917 D=0,5646  W=64,9012	K=2,0146 I = $\infty$ D=0,6276  W=4,992	K=4,4063 I=0,7678 D=0,6548  W=76,3326	K=5,1433 I=0,5247 D=0,7052  W=11,8034
T=5.0	K=4,334 I=4,784 D=0,5792  W=65,1001	K=3,581 I = $\infty$ D=0,6267  W=2,0691	K=7,067 I=0,954 D=0,637  W=71,573	K=8,3383 I=0,5626 D=0,7076  W=5,1957

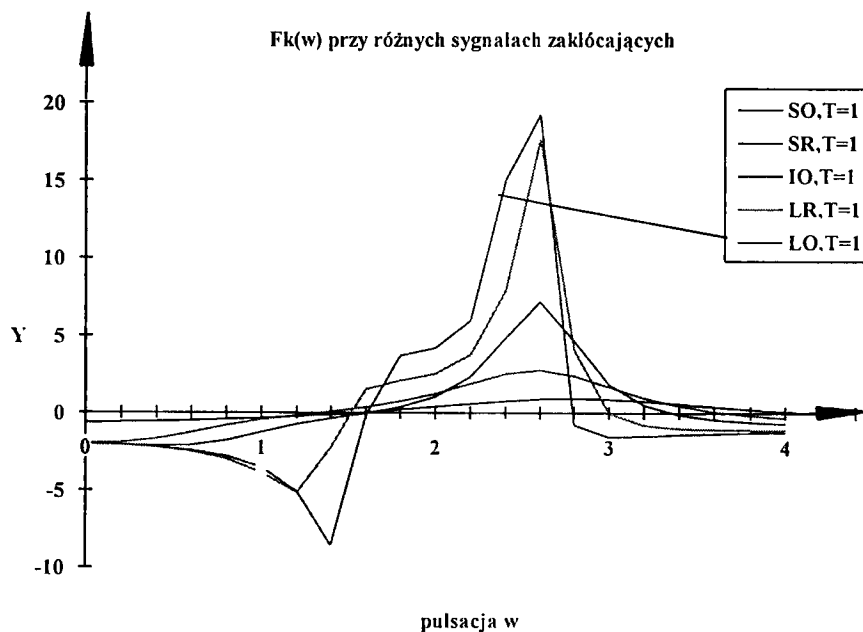
T=10	K=8,352 I=10,392 D=0,589  W=65,213	K=7,51 I = ∞ D=0,6254  W=0,5789	K=13,8327 I=1,2074 D=0,6114  W=69,3675	K=16,3466 I=0,596 D=0,7094  W=1,5251
------	--	---	--	--

Tabela 2 nie zawiera wartości optymalnych nastaw dla zakłócenia w postaci skoku jednostkowego wprowadzonego na wejście obiektu, gdyż dane te są zawarte w tabeli 1. Nie zawiera ona również optymalnych nastaw dla zakłócenia typu impulsu Dirace'a wprowadzonego na wejście regulatora gdyż dla tego typu zakłócenia optymalne wartości wskaźnika regulacji otrzymuje się przy braku reakcji regulatora na zakłócenie tzn.  $K=0$ ,  $I=\infty$ ,  $D=0$ .

Poniżej na rysunkach rys.32 do rys.40 przedstawiono charakterystyki strojenia parametrów regulatora dla zakłóceń podanych w tabeli 2 i dla optymalnych nastaw odpowiadających tym zakłóceniom. Przedstawione przebiegi wskazują, że główne cechy w przebiegach poszczególnych charakterystyk strojenia są zachowane niezależnie od charakteru zakłóceń oddziałujących na obiekt regulacji.

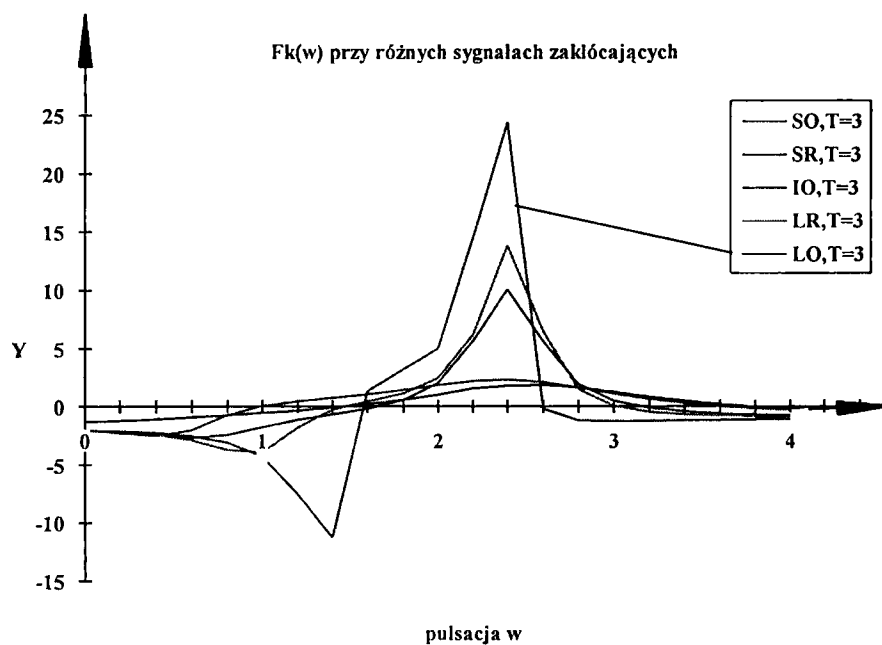
Na szczególną uwagę zasługują charakterystyki wykreślone przy optymalnych nastawach dla zakłócenia w postaci sygnału liniowo narastającego na wejściu regulatora LR lub na wejściu obiektu LO. Optymalne nastawy są w tych wypadkach położone bardzo blisko granicy stabilnej pracy regulatorów i w związku z tym charakterystyki ulegają w pewnym stopniu "degeneracji" objawiającej się między innymi dużymi wahaniami amplitudy w obszarze częstotliwości, przy której następuje zmiana znaku. W

praktycznych układach strojenia parametrów należałoby pozostawić większy dystans dla dopuszczalnych nastaw parametrów dynamicznych regulatora w stosunku do granic obszaru pracy stabilnej [1] tak, aby uniknąć groźby wejścia w obszar niestabilności np. przy przypadkowych gwałtownych zmianach charakterystyki sygnału zakłócającego.



Rys.32 Przebiegi charakterystyk  $F_k(w)$  (dla obiektu o  $T=1$ ) dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

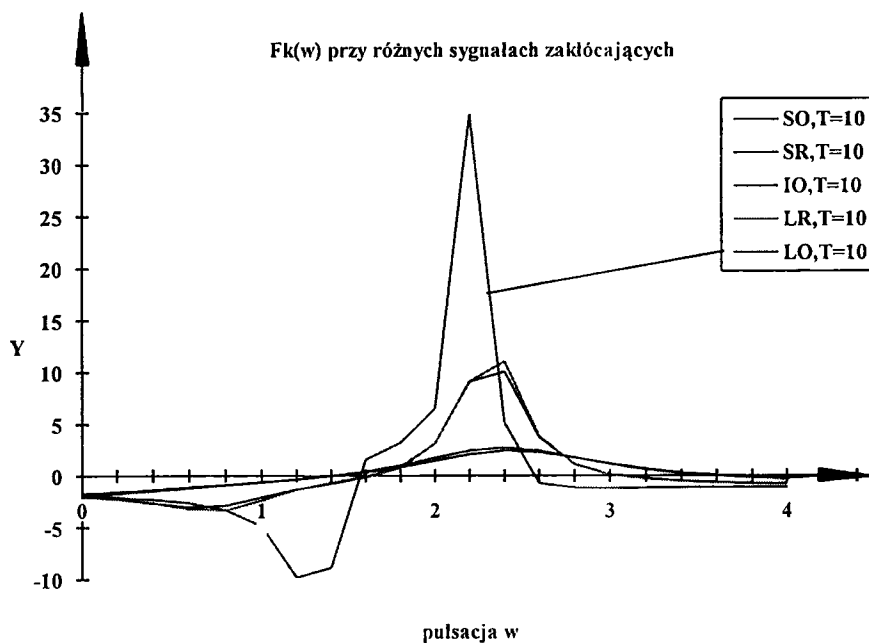
- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,



Rys.33 Przebiegi charakterystyk  $F_k(w)$  dla obiektu o  $T=3$  i dla nastaw wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

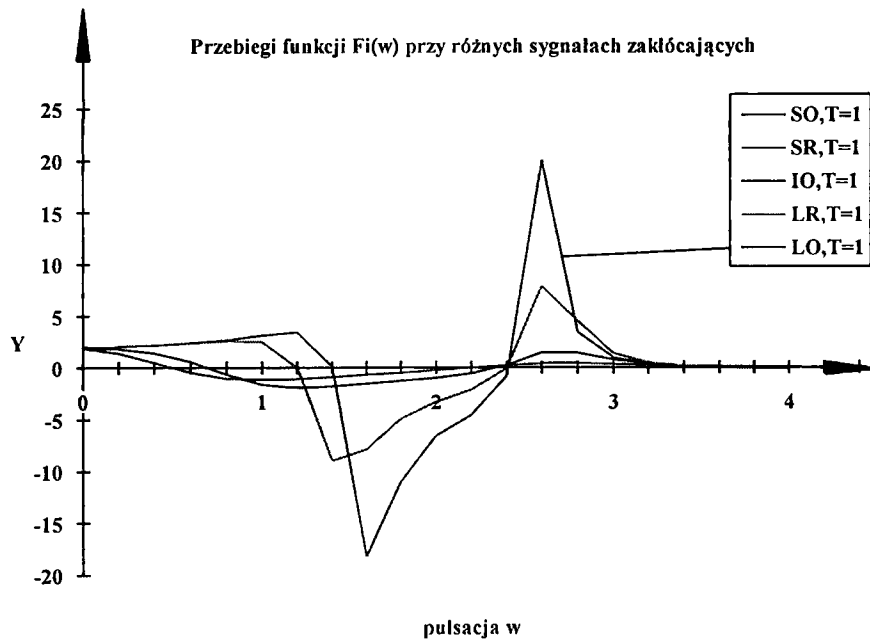
- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.





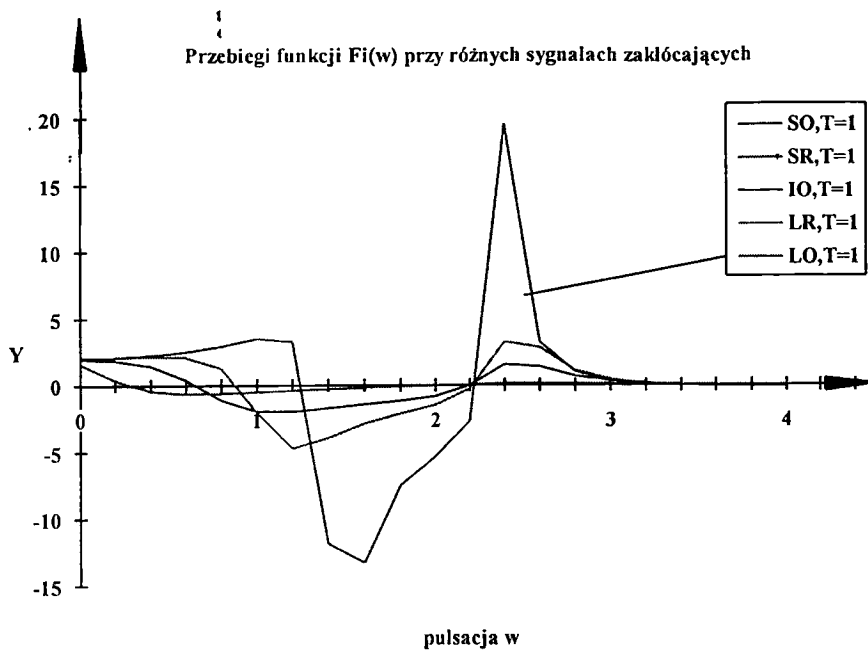
Rys.34 Przebiegi charakterystyk  $F_k(w)$  (dla obiektu  $T=10$ ) przy nastawach wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.



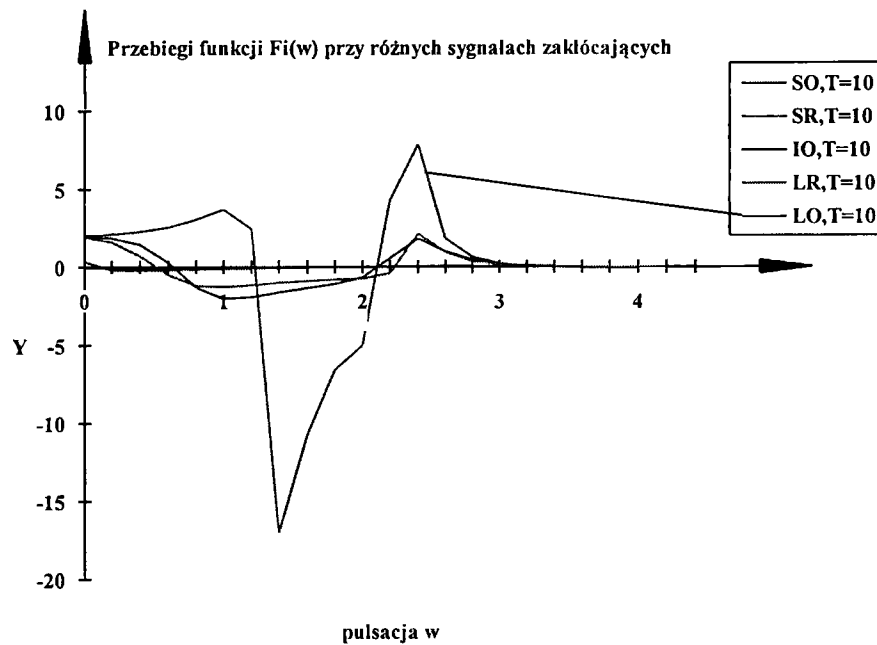
Rys.35 Przebiegi charakterystyk  $F_i(w)$  (dla obiektu  $T=1$ ) przy nastawach wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.



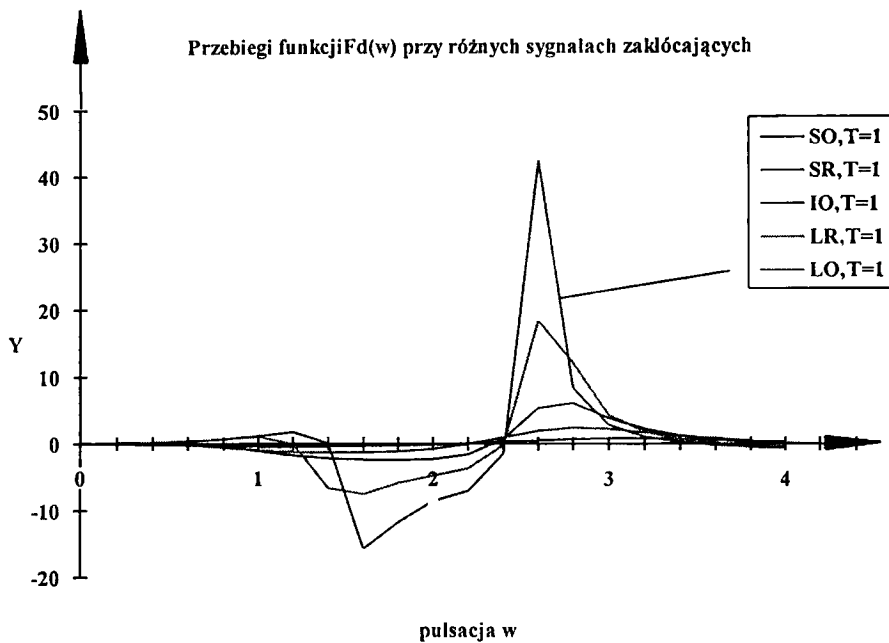
Rys.36 Przebiegi charakterystyk  $F_i(w)$  (dla obiektu  $T=3$ ) przy nastawach wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.



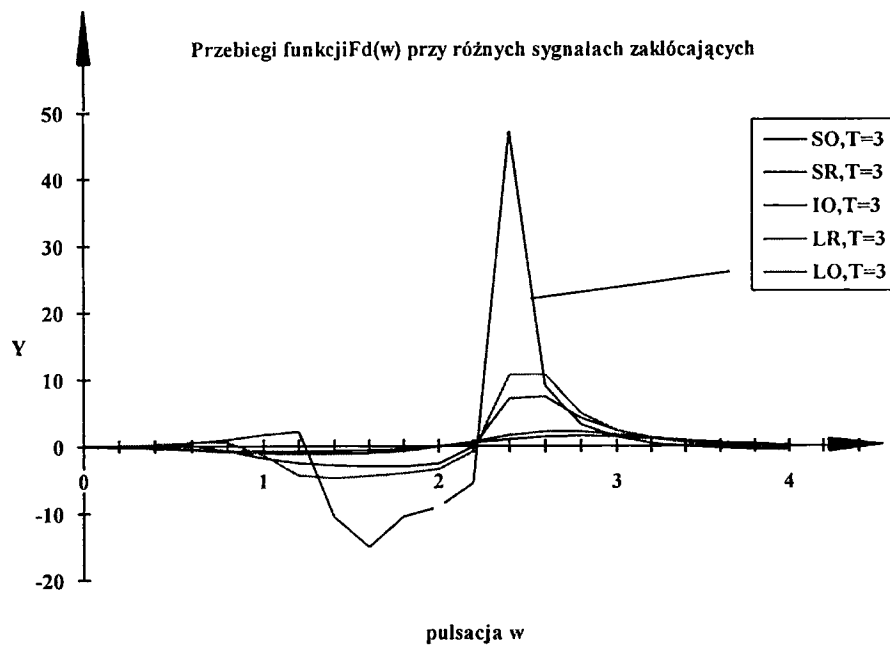
Rys.37 Przebiegi charakterystyk  $F_i(w)$  (dla obiektu  $T=10$ ) przy nastawach wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.



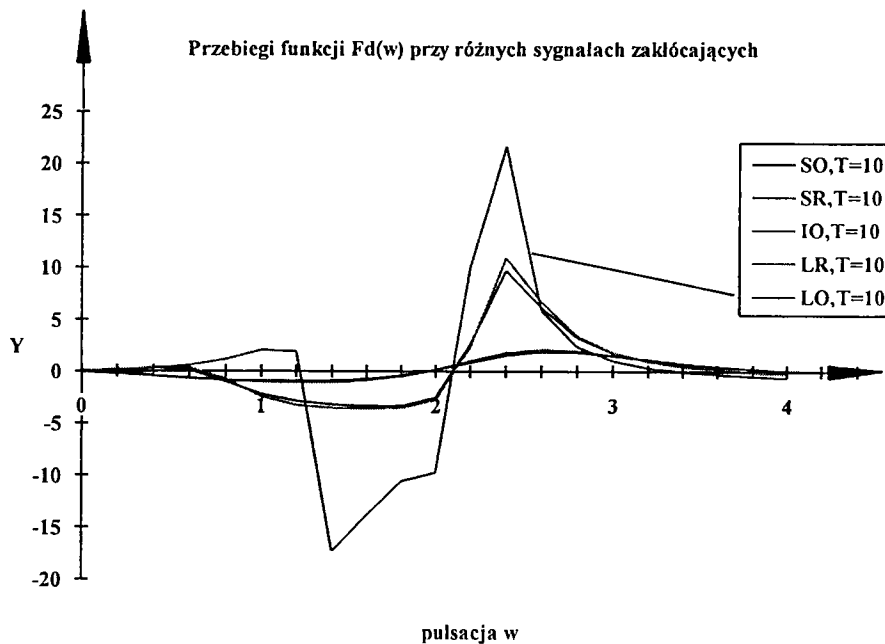
Rys.38 Przebiegi charakterystyk  $F_d(w)$  (dla obiektu  $T=1$ ) przy nastawach wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.



Rys.39 Przebiegi charakterystyk  $F_d(w)$  (dla obiektu  $T=3$ ) przy nastawach wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.



Rys.40 Przebiegi charakterystyk  $F_d(w)$  (dla obiektu  $T=10$ ) przy nastawach wyznaczonych eksperymentalnie przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.

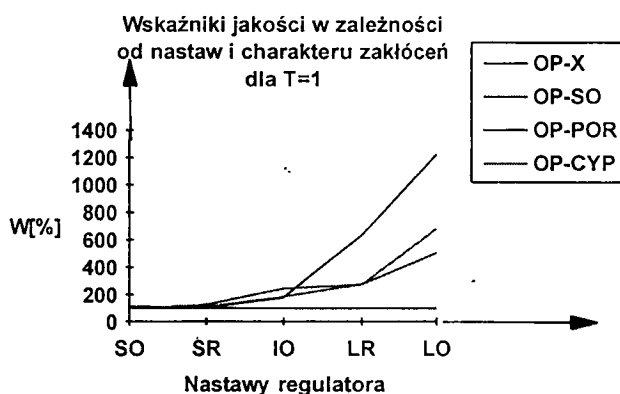
Rozważając problem zapewnienia optymalnych nastaw parametrów regulatora przy różnych charakterystykach sygnałów zakłócających nasuwa się pytanie jak duże korzyści, w postaci poprawy wskaźnika jakości regulacji możemy osiągnąć dostrajając optymalnie regulator do charakterystyki zakłóceń na niego oddziałujących. Odpowiedź na to pytanie dają nam dane uzyskane drogą obliczeń numerycznych (Załącznik 1), które zastały zestawione w tabelach 3, 4 i 5 oraz przedstawione na rysunkach rys.41, rys.42 i rys.43. Z zamieszczonych danych wynika, że poprawa wskaźnika jakości jest znaczna sięgająca nawet kilkaset, a w krańcowych wypadkach ponad tysiąc procent.



Tabela 3.

Porównanie osiąganych wskaźników jakości regulacji w zależności od nastaw i charakteru zakłóceń dla obiektu T=1.

Rodzaj zakłócenia	Nastawy optymalne dla danego zakłócenia (OP-X)	Nastawy optymalne dla zakłócenia skokowego na wejściu obiektu (OP-SO)	Zalecane nastawy wg poradnika (OP-POR)	Zalecane nastawy wg Cypkina (OP-CYP)
SO	W <sub>o</sub> =21,093 O=100%	W <sub>e</sub> =21,093 E=100%	W <sub>p</sub> =23,461 P=111,23%	W <sub>c</sub> =23,938 C=113,488%
SR	W <sub>o</sub> =63,983 O=100%	W <sub>e</sub> =82,415 E=128,807%	W <sub>p</sub> =68,313 P=106,767%	W <sub>c</sub> =70,954 C=110,895%
IO	W <sub>o</sub> =25,044 O=100%	W <sub>e</sub> =61,3213 E=244,542%	W <sub>p</sub> =44,852 P=179,093%	W <sub>c</sub> =47,016 C=187,736%
LR	W <sub>o</sub> =92,9796 O=100%	W <sub>e</sub> =255,0398 E=274,296%	W <sub>p</sub> =589,997 P=634,491%	W <sub>c</sub> =255,0398 C=274,296%
LO	W=46,1611 O=100%	W=233,946 E=506,803%	W=566,5351 P=1227,300%	W=315,731 C=683,976%

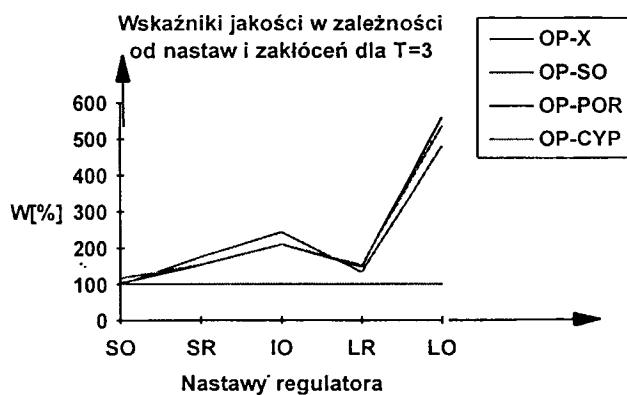


Rys.41 Porównanie wartości wskaźników jakości regulacji w zależności od nastaw i charakteru zakłóceń dla obiektu T=1.

Tabela 4.

Porównanie osiąganych wskaźników jakości regulacji w zależności od nastaw i charakteru zakłóceń dla obiektu  $T=3$ .

Rodzaj zakłócenia	Nastawy optymalne dla danego zakłócenia ( OP-X )	Nastawy optymalne dla zakłócenia skokowego na wejściu obiektu ( OP-SO )	Zalecane nastawy poradnika wg ( OP-POR )	Zalecane nastawy Cypkina wg (OP-CYP)
SO	W <sub>o</sub> =5,0407 O=100%	We=5,0407 E=100%	W <sub>p</sub> =5,2348 P=103,9%	W <sub>c</sub> =5,945 C=117,94%
SR	W <sub>o</sub> =64,9012 O=100%	We=114,550 E=176,5%	W <sub>p</sub> =99,946 P=154,0%	W <sub>c</sub> =100,464 C=154,795%
IO	W <sub>o</sub> =4,992 O=100%	We=12,168 E=243,75%	W <sub>p</sub> =10,523 P=210,797%	W <sub>c</sub> =10,502 C=210,377%
LR	W <sub>o</sub> =76,3326 O=100%	We=102,147 E=133,818%	W <sub>p</sub> =113,396 P=148,555%	W <sub>c</sub> =116,735 C=152,93%
LO	W=11,8034 O=100%	W=56,780 E=481,048%	W=66,25 P=561,279%	W=63,233 C=535,718%

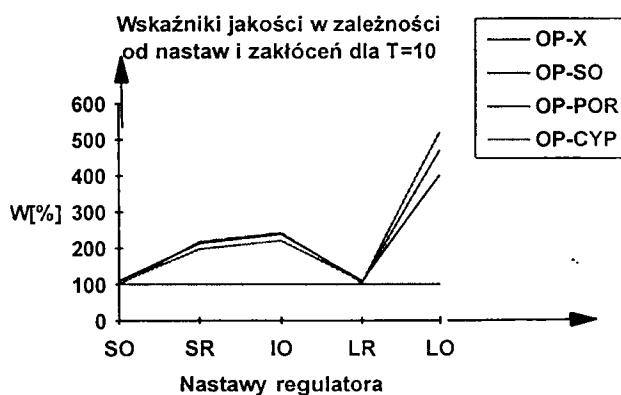


Rys.42 Porównanie wartości wskaźników jakości regulacji w zależności od nastaw i charakteru zakłóceń dla obiektu  $T=3$ .

Tabela 5.

Porównanie osiąganych wskaźników jakości regulacji w zależności od nastaw i charakteru zakłóceń dla obiektu  $T=10$ .

Rodzaj zakłócenia	Nastawy optymalne dla danego zakłócenia ( OP-X )	Nastawy optymalne dla zakłócenia skokowego na wejściu obiektu ( OP-SO )	Zalecane nastawy poradnika ( OP-POR )	Zalecane nastawy wg Cypkina ( OP-CYP )
SO	$W_o=0,63185$ $O=100\%$	$W_e=0,63185$ $E=100\%$	$W_p=0,694$ $P=109,836$	$W_c=0,6601$ $C=104,471$
SR	$W_o=65,213$ $O=100\%$	$W_e=141,68$ $E=217,257$	$W_p=139,16$ $P=213,39$	$W_c=128,81$ $C=197,28$
IO	$W_o=0,5789$ $O=100\%$	$W_e=1,4105$ $E=253,65$	$W_p=1,385$ $P=239,25$	$W_c=1,282$ $C=221,45$
LR	$W_o=69,3675$ $O=100\%$	$W_e=71,006$ $E=102,36$	$W_p=75,543$ $P=108,9$	$W_c=73,981$ $C=106,65$
LO	$W=1,525$ $O=100\%$	$W=7,179$ $E=470,754$	$W=6,145$ $P=402,951$	$W=7,974$ $C=522,89$



Rys.43 Porównanie wartości wskaźników jakości regulacji w zależności od nastaw i charakteru zakłóceń dla obiektu  $T=10$ .

## 7. Koncepcja realizacji algorytmu adaptacji

## w oparciu o stałe, wzorcowe charakterystyki strojenia parametrów.

Analiza charakterystyk zamkniętego układu regulacji przeprowadzona w rozdziałach 4, 5 i 6 wskazuje, że istnieje możliwość realizacji układu strojenia w oparciu o stałe niezmiennie charakterystyki strojenia 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, który nie występuje w jawnej postaci we wzorach na charakterystyki strojenia, z uwagi na stosowanie w wyrażeniach analitycznych symboli względnych - zgodnie z oznaczeniami wprowadzonymi w rozdziale 2. Przyjęcie stałych wzorcowych charakterystyk strojenia ma szereg zalet:

- znacznie upraszcza algorytm autostrojenia co jest bardzo istotne przy praktycznych zastosowaniach,
- pozwala na eliminację "zdegenerowanych" przebiegów związanych z nastawami parametrów leżącymi blisko granicy stabilności (patrz uwagi w rozdziale 6 ),
- wpływa na pewne ujednoczenie wartości amplitud sygnałów strojenia, w dużym zakresie zmian parametrów obiektu i regulatora, co upraszcza sposób wprowadzania korekt nastaw parametrów w procesie strojenia,
- umożliwia zamodelowanie pożądanego kształtu przebiegu charakterystyki, a w szczególności pozwala na uniknięcie wahań charakterystyki w zakresie częstotliwości leżących

poza zakresem oddziaływania regulatora, które związane są z cykliczną zmianą fazy wywołaną przez stałą opóźnienia obiektu. Wahania te stanowią groźbę wystąpienia dostrojonych parametrów regulatora do nastaw odpowiadających fałszywym ekstremom wskaźnika jakości,

- pozwala na skuteczniejszą eliminację wpływu oddziaływań skrośnych w procesie strojenia i szybsze dochodzenie do ekstremum niż przy strojeniu w oparciu o czystą metodę gradientową opartą o rzeczywiste charakterystyki strojenia zgodne z faktycznymi parametrami obiektu i regulatora.

Projektowanie charakterystyk autostrojenia przeprowadzono w oparciu o rozważania podane w [2] przy czym zastosowano dodatkowo człon wstępnej filtracji pozwalający na eliminację w pasmie sygnału odchyłki zakresu odpowiadającego dużym częstotliwościom, na tłumienie których regulator nie ma już praktycznie wpływu. Jak w każdych pracach projektowych istnieje tutaj duża dowolność i nie da się jednoznacznie stwierdzić w jakim stopniu zaproponowane charakterystyki zbliżone są do pożądanego ideału.

Transmitancję zaproponowanych wzorcowych charakterystyk opisane są następującymi wzorami:

$$F_K(jw) = \frac{2 + 4x^2 - 0.6x^4 - 12x^6 - 0.6x^8}{(1 - 3.25x^2 + x^4)^2 + (1.9x - 1.5x^3)^2} \cdot \frac{1}{(1 + t_f^2 w^2)^2}$$

(7.1)

$$F_I(j\omega) = \frac{-2 - 0.4x^2 + 10x^4 - 0.14x^6}{(1 - 3.25x^2 + x^4)^2 + (1.9x - 1.5x^3)^2} \cdot \frac{1}{(1 + t_f^2 \omega^2)^2}$$

(7.2)

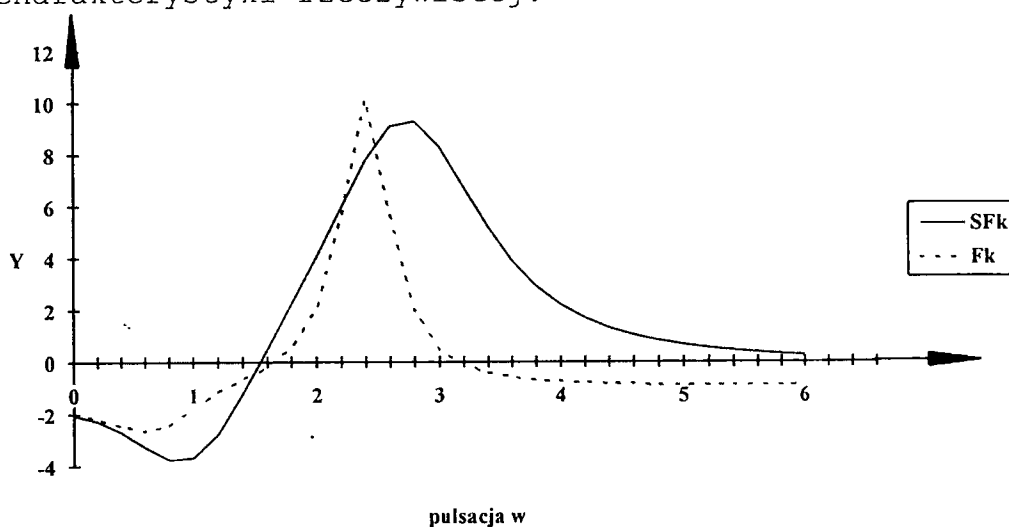
$$F_D(j\omega) = \frac{0.1 + x^2 + 12x^4 - 12x^6 - 0.1x^8}{(1 - 3.25x^2 + x^4)^2 + (1.9x - 1.5x^3)^2} \cdot \frac{1}{(1 + t_f^2 \omega^2)^2}$$

(7.3)

gdzie:

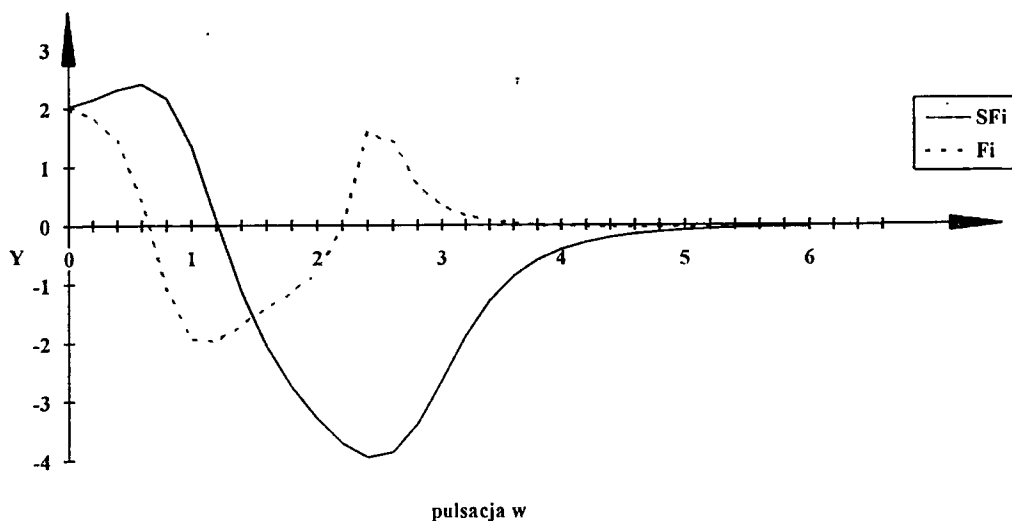
$$x = j\omega t_m \quad \text{przy czym: } t_m = 0.5$$

Na rysunkach rys.44, 45 i 46 przedstawiono przebiegi wzorcowych charakterystyk strojenia parametrów regulatora K, I, D w funkcji częstotliwości. Charakterystyki te stanowią pewne uśrednienie charakterystyk rzeczywistych wyznaczonych dla różnych parametrów obiektu i różnych typów zakłóceń tak, że ich przebieg może niekiedy odbiegać dość znacznie od przebiegu konkretnej charakterystyki rzeczywistej.

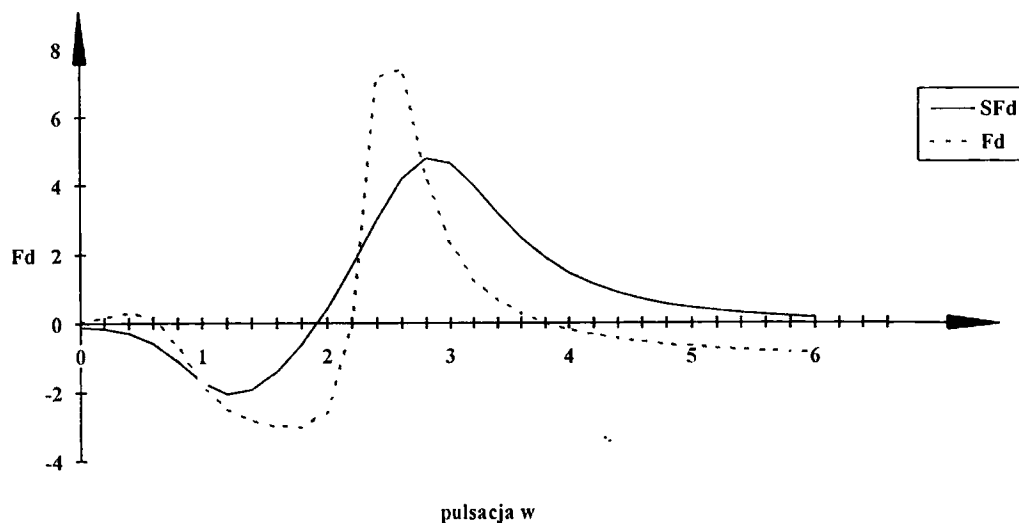


Rys.44 Przebieg wzorcowej charakterystyki strojenia stałej wzmocnienia regulatora K oraz rzeczywista charakterystyka strojenia K dla optymalnych nastaw regulatora wyznaczonych eksperymentalnie dla obiektu o

stałej  $T=3$  przy zakłóceniu skokowym na wejściu obiektu regulacji i wskaźniku jakości w postaci całki kwadratu odchyłki regulacji.



Rys.45 Przebieg wzorcowej charakterystyki strojenia stałej czasowej całkowania I oraz rzeczywista charakterystyka strojenia I dla optymalnych nastaw regulatora wyznaczonych eksperymentalnie dla obiektu o stałej  $T=3$  przy zakłóceniu skokowym na wejściu obiektu regulacji i wskaźniku jakości w postaci całki kwadratu odchyłki regulacji.



Rys.46 Przebieg wzorcowej charakterystyki strojenia stałej czasowej różniczkowania D oraz rzeczywista charakterystyka strojenia D dla optymalnych nastaw regulatora wyznaczonych eksperymentalnie dla obiektu o stałej  $T=3$  przy zakłóceniu skokowym na wejściu obiektu regulacji i wskaźniku jakości w postaci całki kwadratu odchyłki regulacji.



## 8. Charakterystyki przestrajania parametrów przy różnych rodzajach zakłóceń w oparciu o wzorcowe charakterystyki strojenia.

Sygnały strojenia parametrów dynamicznych wyznaczone zgodnie z zależnościami (7.1), (7.2), (7.3) stanowią podstawę do określenia pożądanej wartości zmiany nastaw poszczególnych parametrów dynamicznych regulatora. Wartość każdego z sygnałów strojenia zależy zarówno od nastaw regulatora, parametrów obiektu jak i od charakterystyki sygnałów zakłócających.

Zależność sygnału strojenia od wartości nastawy danego parametru została nazwana charakterystyką dostrajania danego parametru:

$$\partial_p = f(p)$$

(7.1)

gdzie:

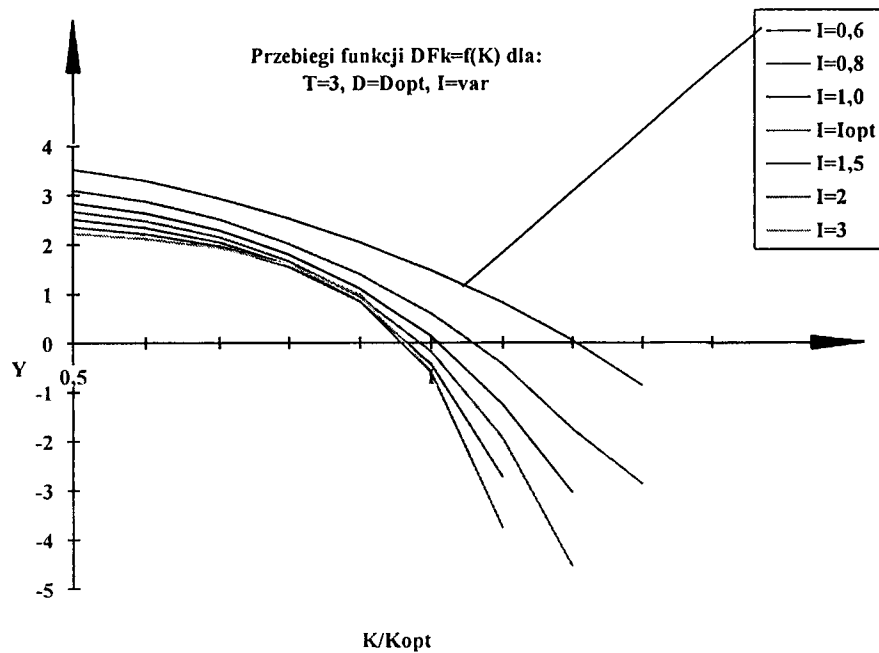
$p$  - jest wartością nastawy danego parametru.

Na rysunkach rys.47 do rys.62 przedstawiono, obliczone numerycznie, przebiegi charakterystyk dostrajania nastaw  $K$ ,  $I$ ,  $D$  przy różnych zakłóceniach oddziaływujących na obiekt regulacji. Odpowiednie rodziny charakterystyk zostały sporządzone dla nastaw zbliżonych do optymalnych dla danego typu zakłócenia i jednego typu obiektu - tj. obiektu o stałej  $T=3$ . Na podstawie charakterystyk, które zostały omówione w poprzednich rozdziałach pracy, można z dużym prawdopodobieństwem założyć, że przebiegi dla

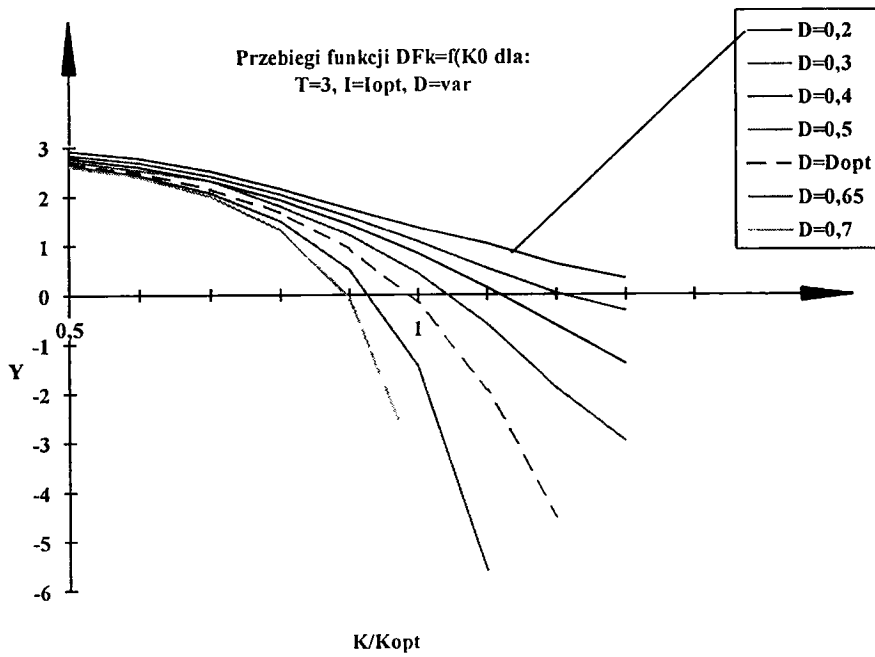
obiektów o innych wartościach stałej  $T$  będą miały przebiegi analogiczne.

Charakterystyki dostrajania wskazują, że dla małych odchyień nastaw od wartości optymalnych sygnał strojenia jest w przybliżeniu proporcjonalny do odchylenia parametru. Przy dużych odchyleniach zależność ta już na ogół przestaje obowiązywać. Daje się zaobserwować wzajemny wpływ zmiany nastaw parametrów w procesie strojenia tak, że przy jednoczesnej zmianie kilku parametrów pożądane jest wprowadzenie odpowiednich poprawek dla skompensowania oddziaływań skrośnych.

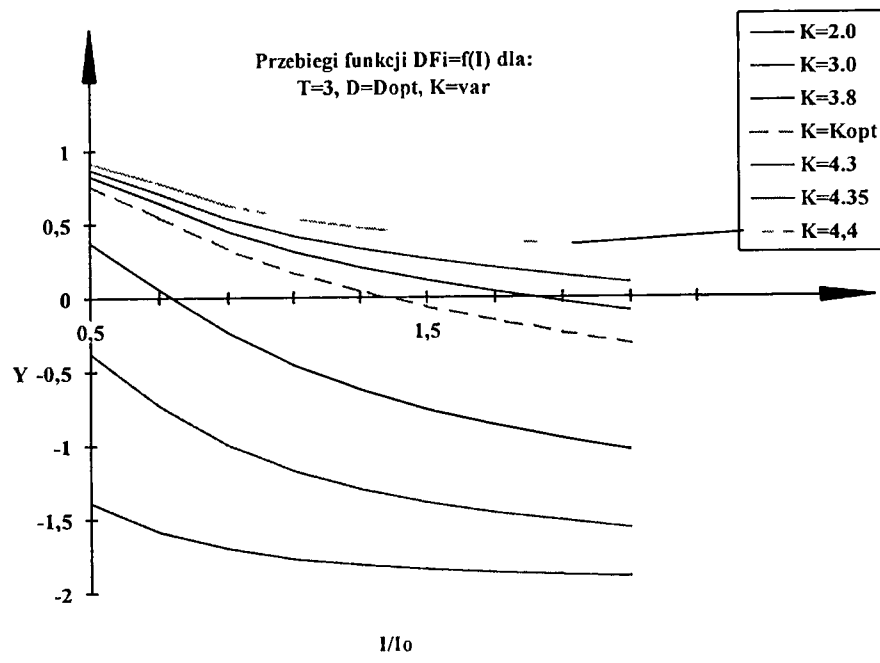
Przy zakłóceniach, w postaci sygnału liniowo narastającego na wejściu regulatora (LR) lub na wejściu obiektu (LO), charakterystyki dostrajania ulegają pewnej "degeneracji" z uwagi na zbliżanie się do granicy stabilności podobnie jak charakterystyki strojenia opisane w rozdziale 6.



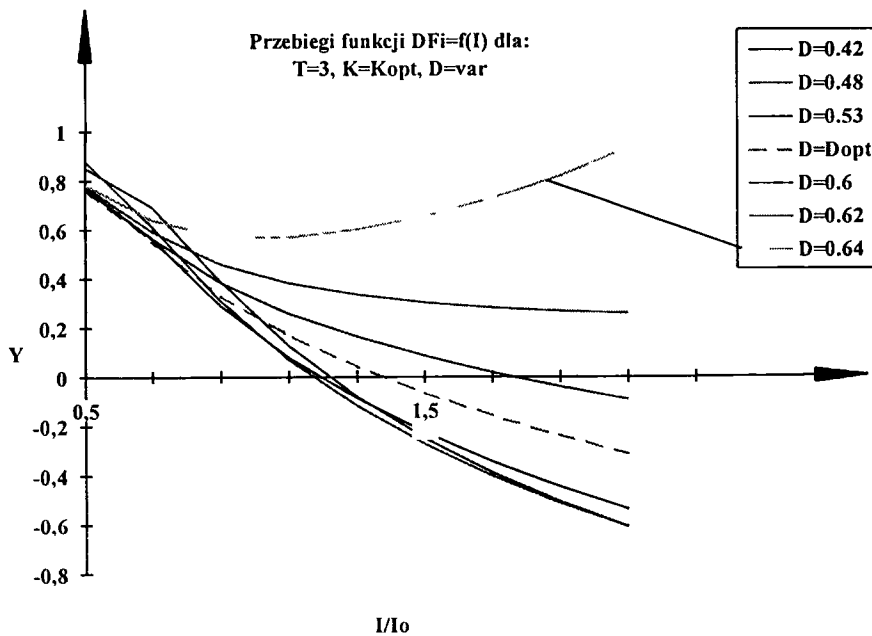
Rys.47. Charakterystyki dostrajania wzmacnienia  $EF_k=f(K)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy stałej całkowania  $I$  ( $K_{opt}=4.228, I_{opt}=1.205, D_{opt}=0.578$ ).



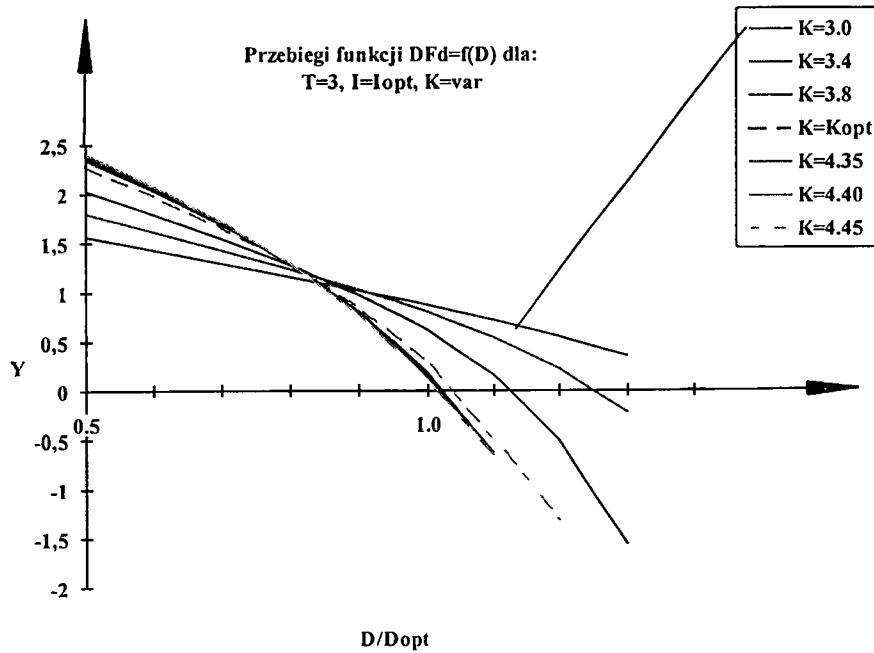
Rys.48. Charakterystyki dostrajania wzmocnienia  $EF_k=f(K)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy stałej różniczkowania  $D$  ( $K_{opt}=4.228, I_{opt}=1.205, D_{opt}=0,578$ ).



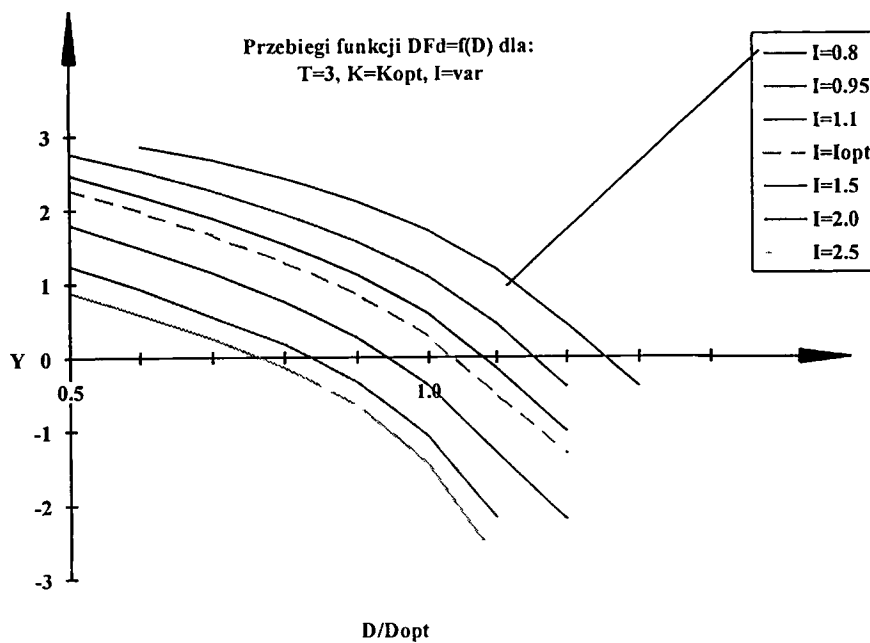
Rys.49. Charakterystyki dostrajania stałej całkowania  $E_{Fi}=f(I)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy współczynnika wzmocnienia  $K$  ( $K_{opt}=4.228, I_{opt}=1.205, D_{opt}=0.578$ ).



Rys.50. Charakterystyki dostrajania stałej całkowania  $E_{Fi}=f(I)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy stałej różniczkowania  $D$  ( $K_{opt}=4.228, I_{opt}=1.205, D_{opt}=0.578$ ).

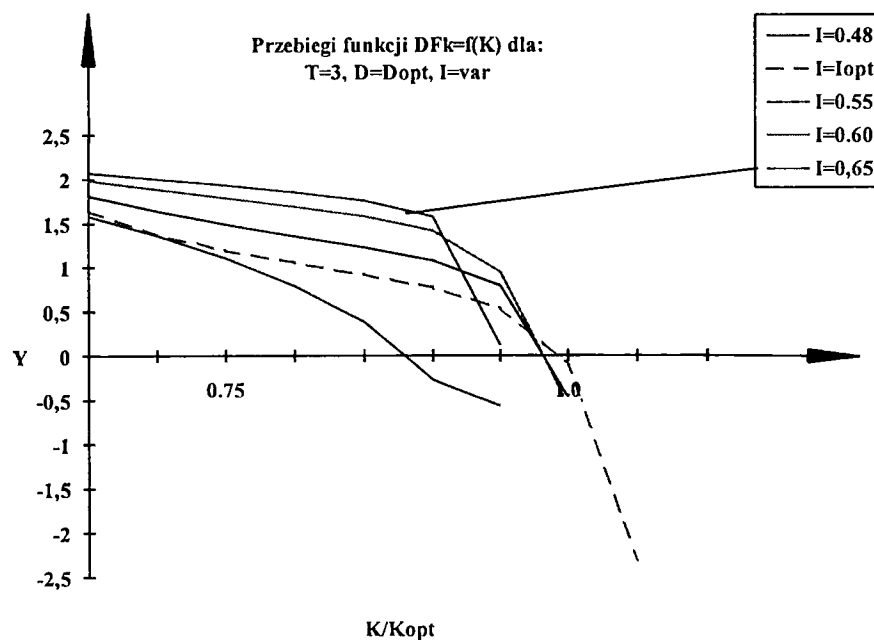


Rys.51. Charakterystyki dostrajania stałej różniczkowania  $EFD=f(D)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy współczynnika wzmocnienia  $K$  ( $K_{opt}=4.228, I_{opt}=1.205, D_{opt}=0.578$ ).

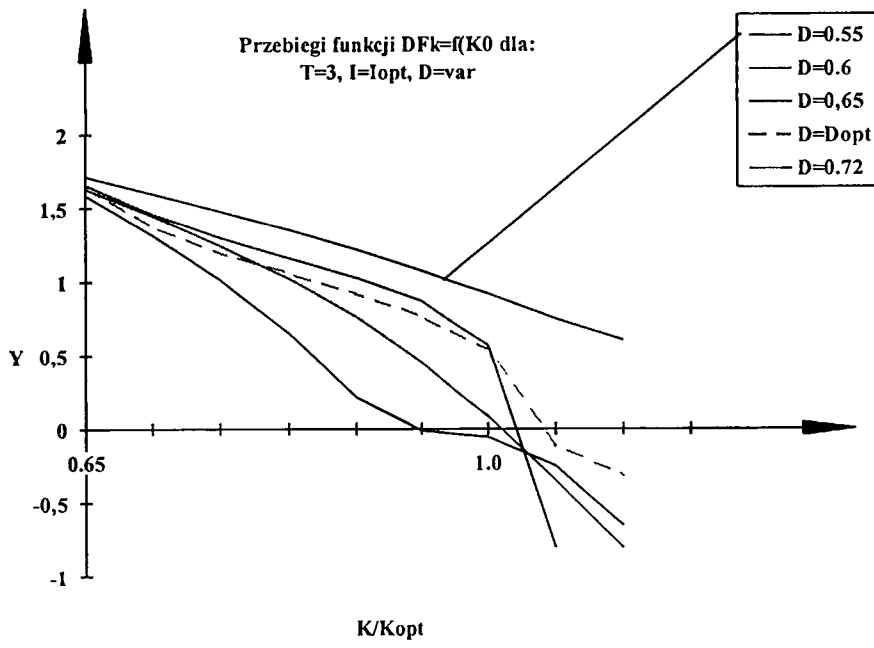


Rys.52. Charakterystyki dostrajania stałej różniczkowania  $E_{Fd}=f(D)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy stałej całkowania  $I$  ( $K_{opt}=4.228, I_{opt}=1.205, D_{opt}=0.578$ ).

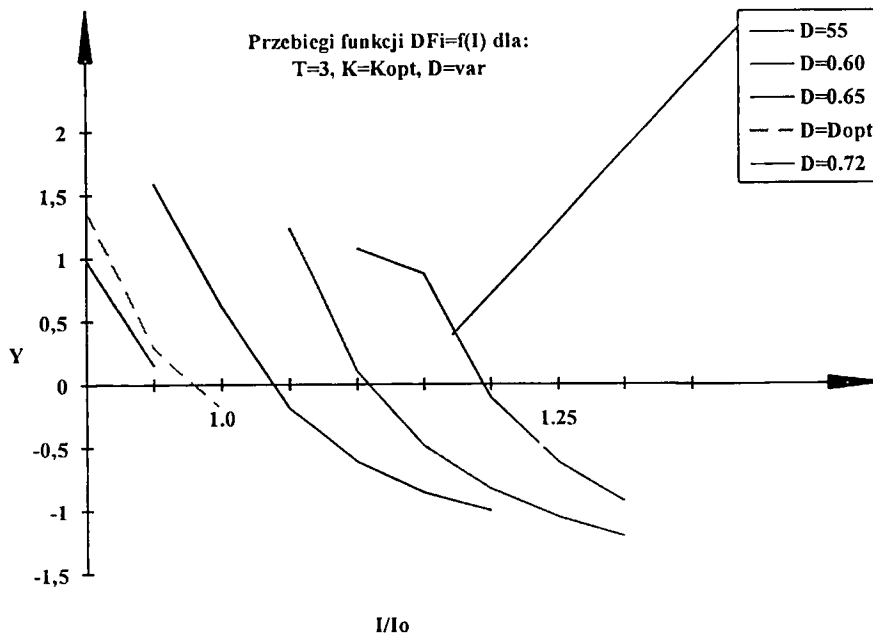




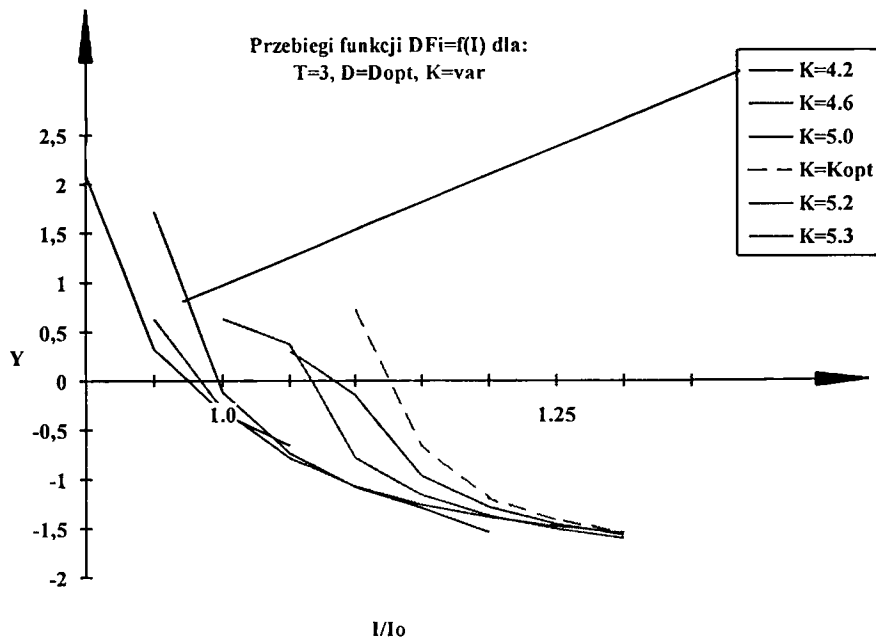
Rys.53. Charakterystyki dostrajania wzmocnienia  $EF_k=f(K)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy stałej całkowania  $I$  ( $K_{opt}=5.143, I_{opt}=0.525, D_{opt}=0,705$  )



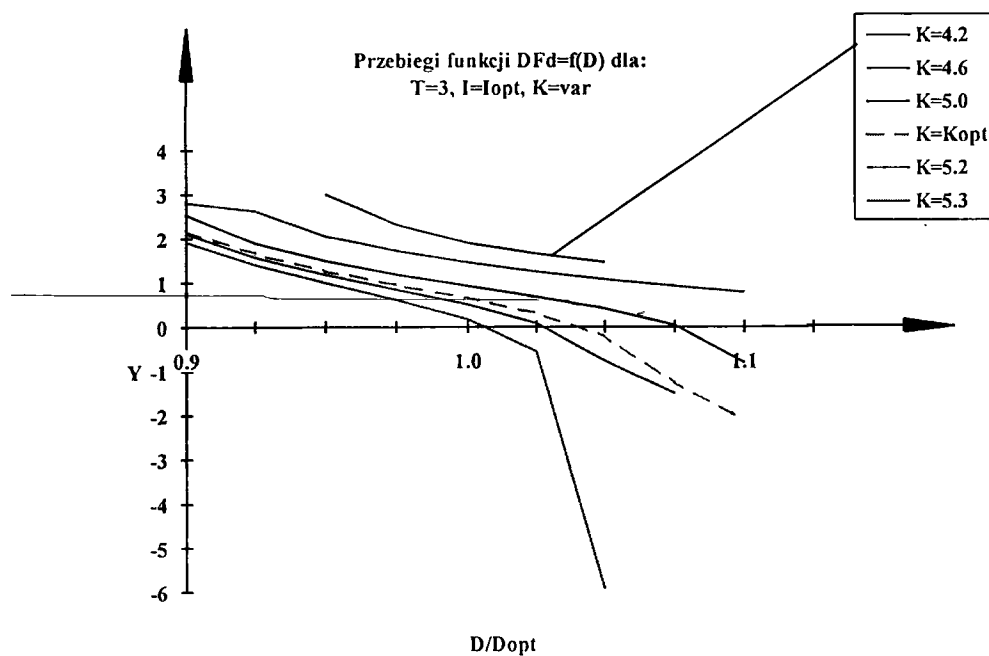
Rys.54. Charakterystyki dostrajania wzmocnienia  $EF_k=f(K)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy stałej różniczkowania  $D$  ( $K_{opt}=5.143, I_{opt}=0.525, D_{opt}=0,705$ )



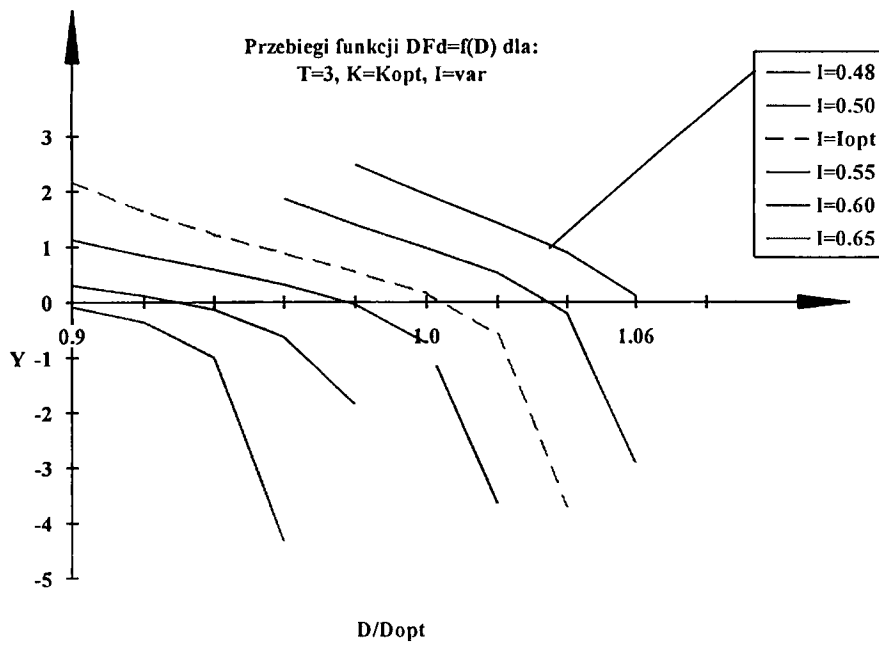
Rys.55. Charakterystyki dostrajania stałej całkowania  $E_{Fi}=f(I)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy stałej czasowej różniczkowania  $K$  ( $K_{opt}=5.143, I_{opt}=0.525, D_{opt}=0.705$ ).



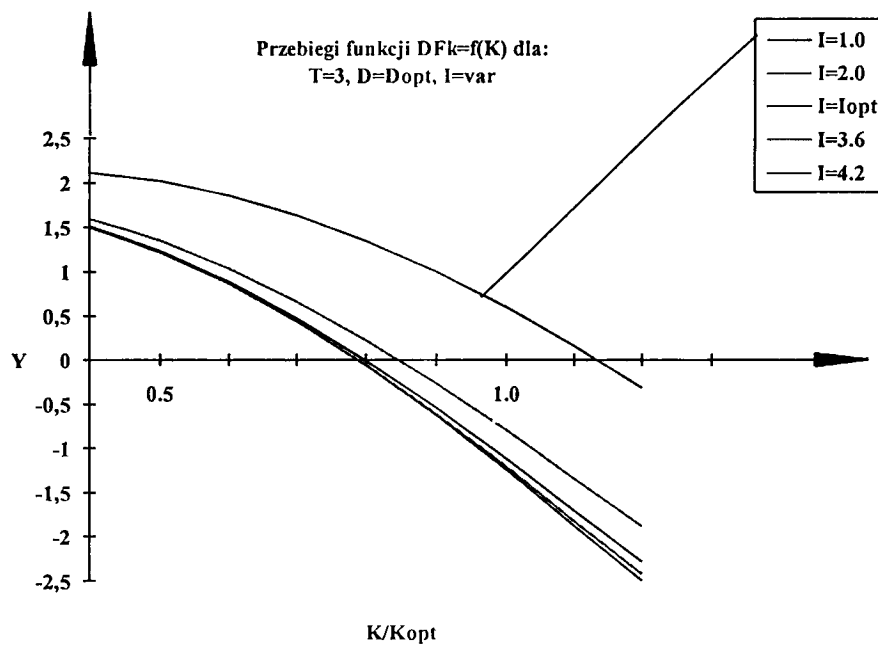
Rys.56 Charakterystyki dostrajania stałej całkowania  $E_{Fi}=f(I)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy współczynnika wzmocnienia  $K$  ( $K_{opt}=5.143, I_{opt}=0.525, D_{opt}=0.705$ ).



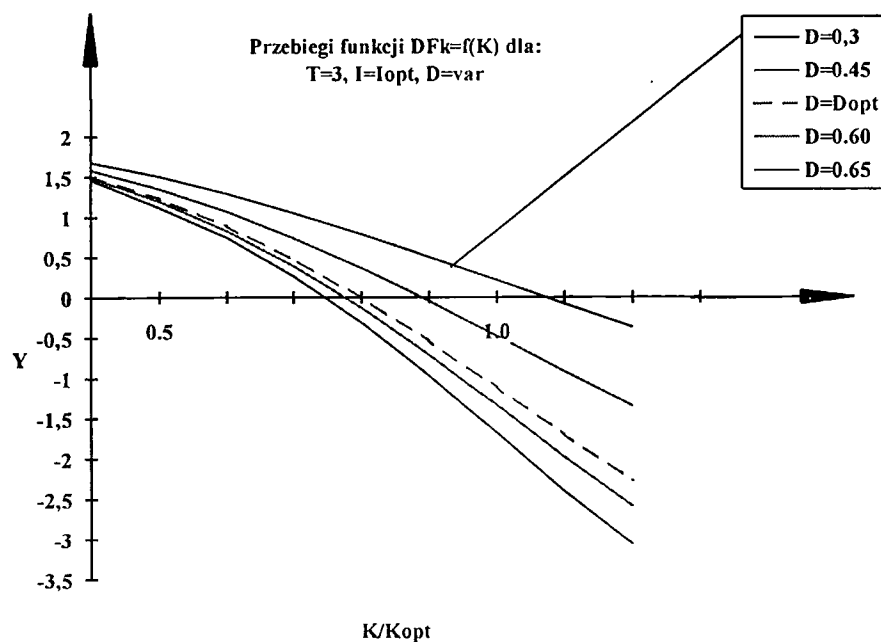
Rys.57. Charakterystyki dostrajania stałej różniczkowania  $EF_d=f(D)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy współczynnika wzmocnienia  $K$  ( $K_{opt}=5.143, I_{opt}=0.525, D_{opt}=0.705$ ).



Rys.58. Charakterystyki dostrajania stałej różniczkowania  $EF_d=f(D)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu przy różnych wartościach nastawy stałej całkowania  $I$  ( $K_{opt}=5.143, I_{opt}=0.525, D_{opt}=0.705$ ).

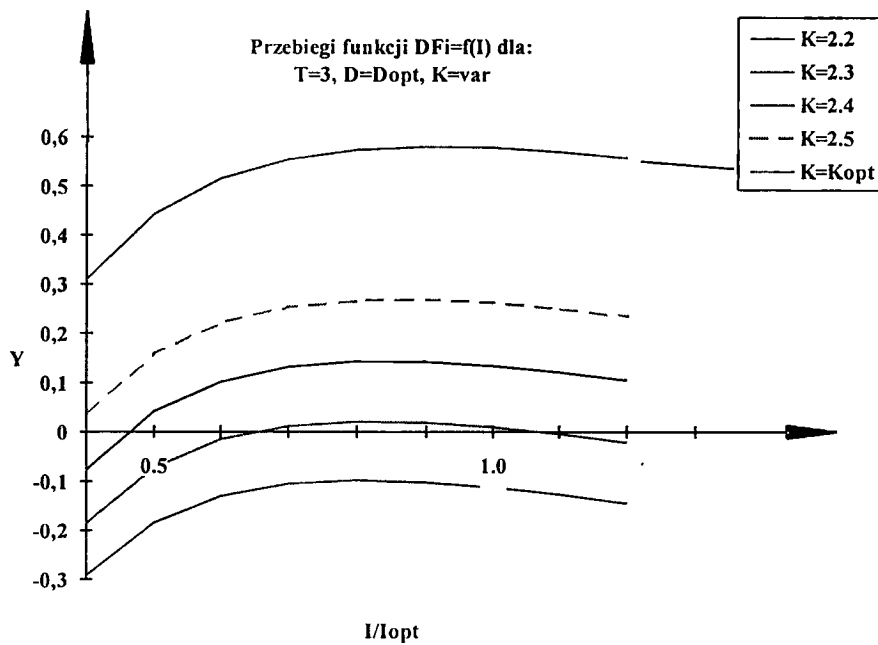


Rys.59. Charakterystyki dostrajania wzmocnienia  $EF_k=f(K)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu regulatora przy różnych wartościach nastawy stałej całkowania  $I$  ( $K_{opt}=2.741, I_{opt}=2,917, D_{opt}=0.565$ ).

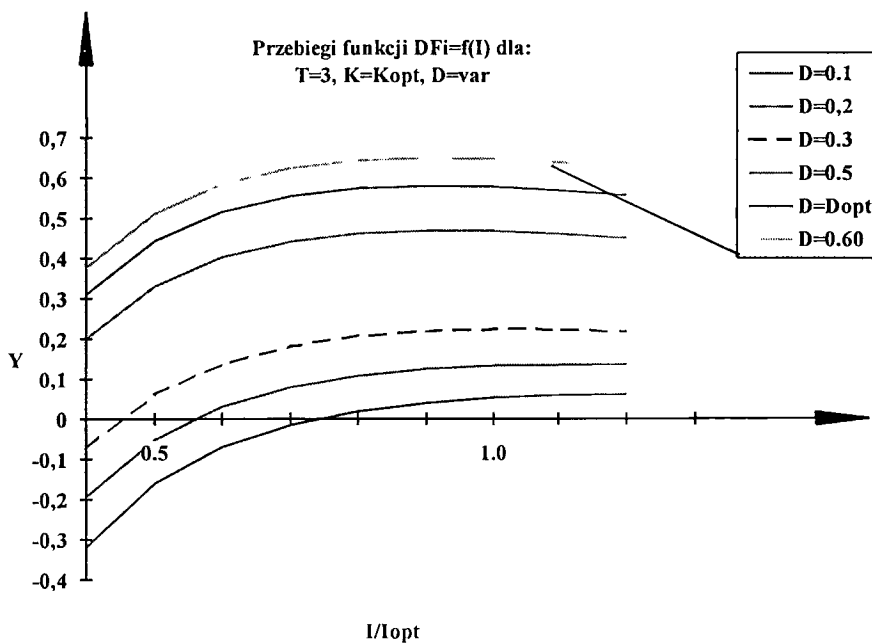


Rys.60. Charakterystyki dostrajania wzmocnienia  $EF_k=f(K)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu regulatora przy różnych wartościach nastawy stałej różniczkowania  $D$  ( $K_{opt}=2.741, I_{opt}=2.917, D_{opt}=0.565$ ).





Rys.61. Charakterystyki dostrajania stałej całkowania  $EF_i=f(I)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu regulatora przy różnych wartościach nastawy współczynnika wzmocnienia  $K$  ( $K_{opt}=2.741, I_{opt}=2.917, D_{opt}=0.565$ ).



Rys.62. Charakterystyki dostrajania stałej całkowania  $E_{Fi}=f(I)$  dla obiektu  $T=3$  i zakłócenia typu skok jednostkowy na wejściu regulatora przy różnych wartościach nastawy stałej różniczkowania  $D$  ( $K_{opt}=2.741, I_{opt}=2.917, D_{opt}=0.565$ ).

## 9. Jakość regulacji przy strojeniu w oparciu o charakterystyki wzorcowe.

Przyjęcie stałych wzorcowych charakterystyk strojenia parametrów dynamicznych może budzić wątpliwości czy stanowią one dostatecznie dobre przybliżenie charakterystyk rzeczywistych, a w szczególności czy wskaźniki jakości uzyskane w układach regulacji z automatycznie strojonymi nastawami według tych charakterystyk będą zbliżone do wskaźników optymalnych, w całym zakresie zmian parametrów obiektu i przy dowolnych zakłóceniach na niego oddziałujących. Danych na ten temat dostarczają wyniki obliczeń numerycznych przeprowadzonych w oparciu o charakterystyki wzorcowe zaproponowane w poprzednim rozdziale.

Wyniki obliczeń zawarte są w tabelach 6 i 7. Tabela 7 odpowiada strojeniu w oparciu o charakterystyki według zależności (7.1), (7.2), (7.3) przy czym strojenie obejmowało w tym wypadku również strojenie stałej czasowej  $t_m$  zgodnie z zależnością:

$$t_m = \frac{0.75}{k_f} \cdot D$$

(9.1)

gdzie:

$$k_f = \frac{\int_0^{\infty} \frac{|\varepsilon(j\omega)|^2}{(1+t_f^2\omega^2)^2} d\omega}{\int_0^{\infty} |\varepsilon(j\omega)|^2 d\omega}$$

(9.2)

Zależność (9.2) pozwala na szacunkowe wyznaczenie zakresu dominujących częstotliwości w widmie odchyłki regulacji. Podobne oszacowanie możliwe jest również w oparciu o znajomość optymalnej wartości nastawy czasu zdwojenia  $D$  co proponowano w pracy [2]. Błędy oszacowania zależą dość znacznie od kształtu konkretnej charakterystyki. Mają one jednak na ogół przeciwne znaki w zależności od tego czy korzysta się z wzoru na  $k_f$ , czy też szacunek przeprowadza się w oparciu o nastawę stałej  $D$ . Z tego też powodu zależność (9.1) pozwala na lepszy szacunek stałej  $t_m$  niż w wypadku korzystania tylko z nastawy  $D$  tak jak to początkowo proponowano w pracy [2].

Na rysunkach rys.63 do rys.66 wykreślono dane z tabeli 6 obrazujące wartości nastaw parametrów dynamicznych i wskaźników jakości regulacji przy strojeniu w oparciu o charakterystyki wzorcowe. Jakość regulacji jest zbliżona naogół do optymalnej, za wyjątkiem strojenia do zakłóceń typu przebiegu liniowo narastającego. Pogorszenie jakości wiąże się w tym wypadku z celowo wprowadzonymi dodatkowymi ograniczeniami zapobiegającymi dobieraniu wartości nastaw bardzo bliskich granicy stabilności układu regulacji. Ograniczenia te mają postać:

$$0.5t_m \leq D \leq 1.6t_m$$

(9.3)

$$I \geq t_m$$

(9.4)

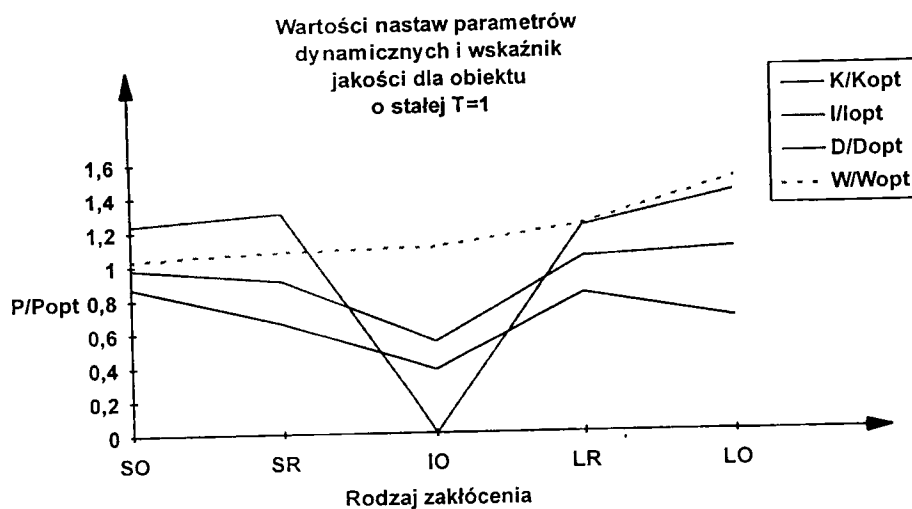
Eliminują one zbyt progresywne wartości nastaw parametrów dynamicznych. Wyniki zebrane w tabelach 6 i 7 oraz przedstawione na rys. 63 do 66 wskazują, że zastosowanie stałych charakterystyk wzorcowych pozwala teoretycznie na dostrojenie regulatora w sposób prawie optymalny, lepszy nawet niż w wypadku zastosowania zalecanych w literaturze optymalnych nastaw regulatora przy pełnej znajomości parametrów obiektu regulacji.

Tabela 6.

Porównanie osiąganych wskaźników jakości regulacji w zależności od nastaw i charakteru zakłóceń dla obiektu  $T=3$  dla zaproponowanych stałych charakterystyk adaptacji parametrów dynamicznych regulatora.

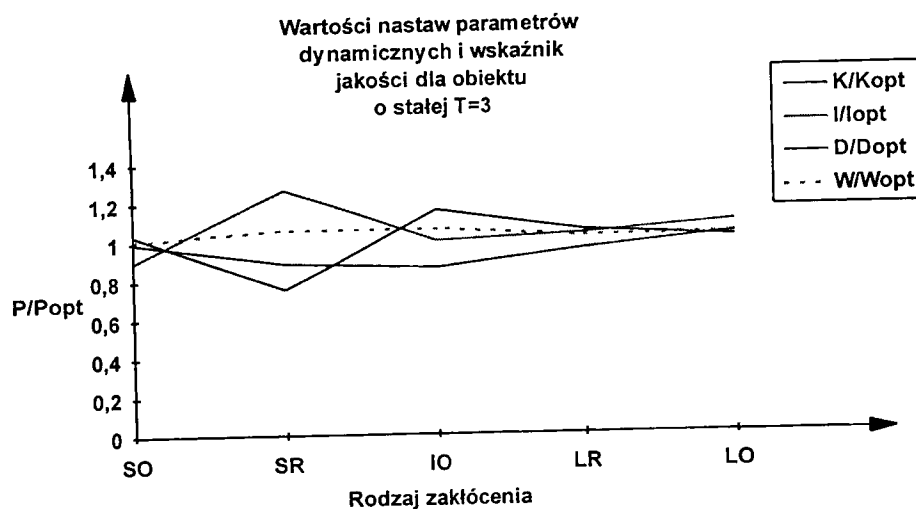
Charakterystyka obiektu regulacji	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu skoku jednostkowego na wejściu obiektu (SO)  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu skoku jednostkowego na wejściu obiektu. (SR)  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia impulsowego na wejściu obiektu. (IO)  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu. (LR)  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu. (LO)  Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$
T=1.0	K=1.521 I=1.115 D=0.473 kf=0.771 W=21.757	K=1.048 I = 6.150 D=0.232 kf=0.747 W=68.74	K=0.257 I=6.150 D=0.232 kf=0.695 W=27.44	K=1.855 I=0.554 D=0.554 kf=0.831 W=103.387	K=2.151 I=0.576 D=0.456 kf=0.863 W=68.923
T=1.0	K/Kopt =0.982 I/Iopt =1.239 D/Dopt =0.871 W/Wopt =1.031	K/Kopt =0.904 I /Iopt =1.303 D/Dopt =0.655 W/Wopt =1.074	K/Kopt =0.540 I/Iopt =0.0 D/Dopt =0.374 W/Wopt =1.096	K/Kopt =1.030 I/Iopt =1.212 D/Dopt =0.818 W/Wopt =1.221	K/Kopt =1.076 I/Iopt =1.408 D/Dopt =0.666 W/Wopt =1.49
T=3.0	K=4.087 I=1.084 D=0.599 kf=0.770 W=5.081	K=2.435 I = 3.692 D=0.426 kf=0.747 W=68.70	K=1.738 I=∞ D=0.376 kf=0.727 W=5.296	K=4.201 I=0.7904 D=0.686 kf=0.790 W=77,465	K=5.284 I=0.567 D=0.660 kf=0.850 W=12.083
T=3.0	K/Kopt =0.997 I/Iopt =0.899 D/Dopt =1.036 W/Wopt =1.008	K/Kopt =0.888 I/Iopt = 1.266 D/Dopt =0.755 W/Wopt =1.059	K/Kopt =0.863 I/Iopt =1.0 D/Dopt =1.158 W/Wopt =1.061	K/Kopt =0.953 I/Iopt =1.029 D/Dopt =1.048 W/Wopt =1.015	K/Kopt =1.027 I/Iopt =1.087 D/Dopt =1.007 W/Wopt =1.024
T=10	K=13.102 I=1.399 D=0.655 kf=0.7692 W=0.642	K=7.291 I = 13.05 D=0.472 kf=0.747 W=68.67	K=6.58 I=∞ D=0.472 kf=0.740 W=0.610	K=13.217 I=1.229 D=0.664 kf=0.774 W=70.525	K=14.93 I=0.55 D=0.81 kf=0.826 W=1.700

T=10	K/Kopt =0.951	K/Kopt =0.873	K/Kopt =0.876	K/Kopt =0.955	K/Kopt =0.913
	I/Iopt =0.965	I/Iopt =1.256	I/Iopt =1.0	I/Iopt =1.018	I/Iopt =0.923
	D/Dopt =1.114	D/Dopt =0.801	D/Dopt =0.602	D/Dopt =1.087	D/Dopt =1.326
	W/Wopt =1.016	W/Wopt =1.053	W/Wopt =1.053	W/Wopt =1.017	W/Wopt =1.115



Rys.63. Porównanie wartości wskaźników jakości regulacji i wartości nastaw parametrów dynamicznych regulatora wyznaczone w oparciu o stałe, eksperymentalne charakterystyki strojenia dla obiektu T=1. Charakterystyki wyznaczone przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

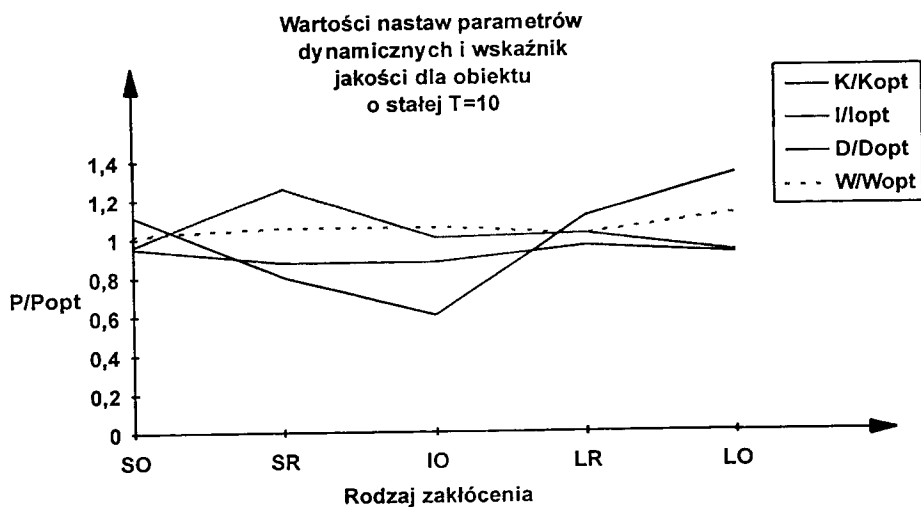
- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.



Rys.64. Porównanie wartości wskaźników jakości regulacji i wartości nastaw parametrów dynamicznych regulatora wyznaczone w oparciu o stałe, eksperymentalne charakterystyki strojenia dla obiektu  $T=3$ . Charakterystyki wyznaczone przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

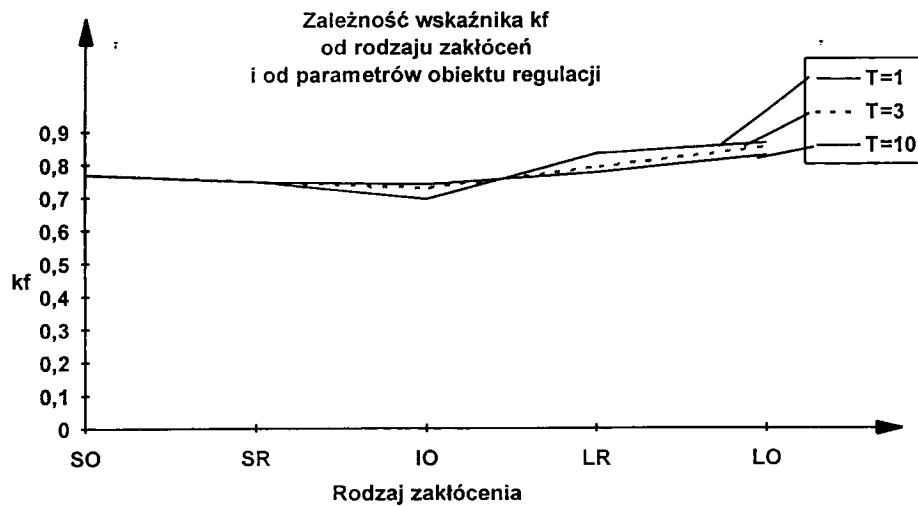
- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.





Rys.65. Porównanie wartości wskaźników jakości regulacji i wartości nastaw parametrów dynamicznych regulatora wyznaczone w oparciu o stałe, eksperymentalne charakterystyki strojenia dla obiektu  $T=10$ . Charakterystyki wyznaczone przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji dla różnych sygnałów zakłócających:

- SO - skok jednostkowy na wejściu obiektu,
- SR - skok jednostkowy na wejściu regulatora,
- IO - zakłócenie impulsowe na wejściu obiektu,
- LR - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu regulatora,
- LO - zakłócenie liniowo narastające (lub opadające) na wejściu obiektu.



Rys.66. Zależność wskaźnika  $k_f$  określającego zakres widma odchyłki regulacji od charakterystyki obiektu oraz rodzaju zakłóceń.

#### Tabela 7

Wartości parametrów i wskaźników jakości uzyskane w układzie autostrojenia przy stałych charakterystykach autostrojenia dla różnych parametrów obiektu i różnego typu zakłóceń. Zastępcza stała czasowa  $t_m$  w układzie autostrojenia obliczana jest na podstawie pomiaru współczynnika tłumienia  $k_f$  sygnału odchyłki regulacji w układzie filtracji drugiego rzędu o stałej czasowej  $0.5t_m$ .

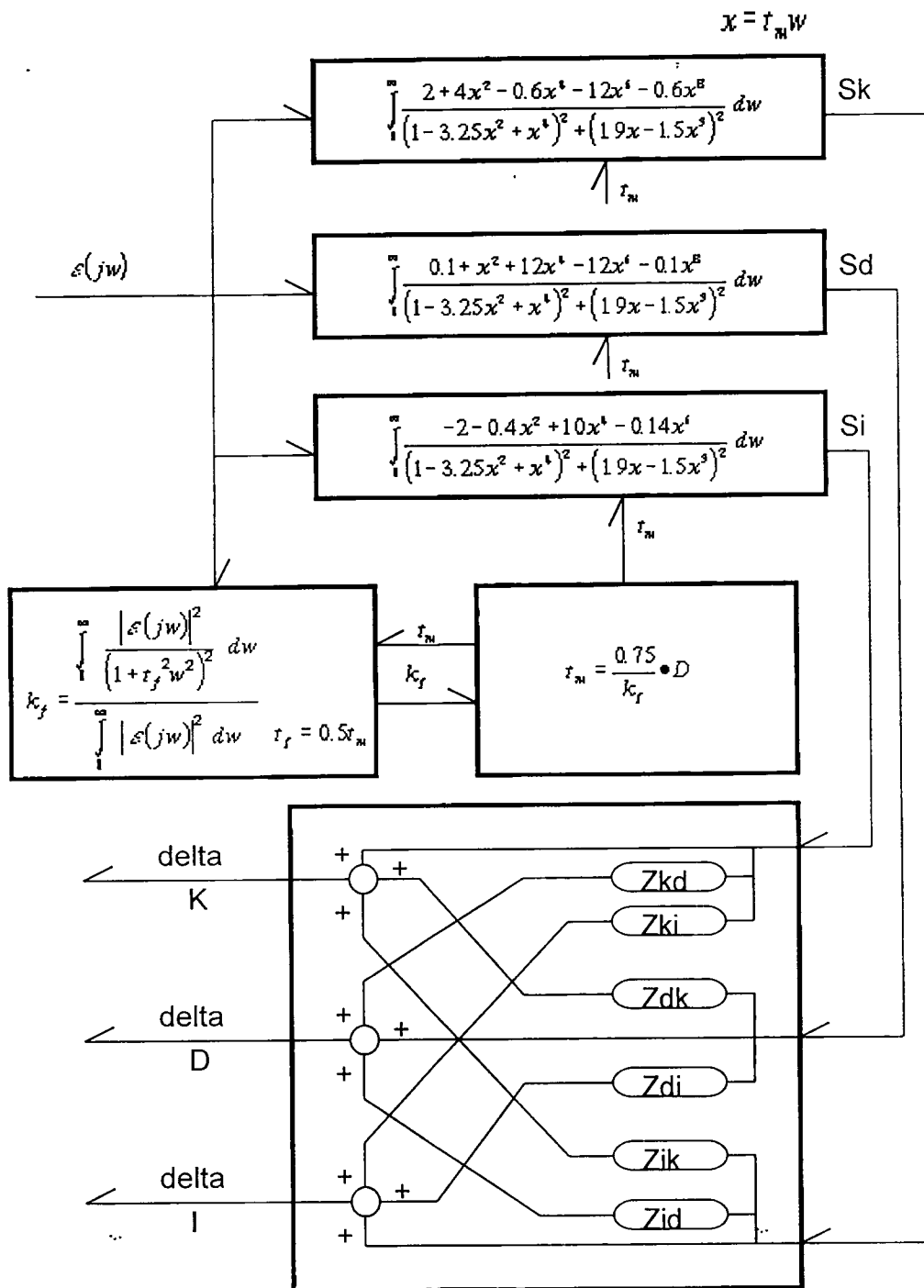
Charakterystyka obiektu regulacji	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu skoku jednostkowego na wejściu obiektu (SO)	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu skoku jednostkowego na wejściu obiektu. (SR)	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia impulsowego na wejściu obiektu. (IO)	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu. (LR)	Eksperymentalnie wyznaczone nastawy dla zakłócenia typu funkcji liniowo narastającej na wejściu obiektu. (LO)
	Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$	Wartość wskaźnika jakości $w = \int \varepsilon^2 dt$
T=1.0	K=1.5707 I=1.0315 D=0.4666 kf=0.784 W=21.457	K=1.0853 I=1.1251 D=0.4504 kf=0.7493 W=65.020	K=0.4739 I=3.5263 D=0.3425 kf=0.7145 W=27.073	K=1.9063 I=0.5568 D=0.5154 kf=0.8351 W=107.387	K=2.074 I=0.589 D=0.4309 kf=0.883 W=76.395
T=1.0	K/Kopt=1.015 I/Iopt=1.146 D/Dopt=0.859 W/Wopt=1.017	K/Kopt=0.936 I/Iopt=0.945 D/Dopt=0.897 W/Wopt=1.016	K/Kopt=0.995 I/Iopt=0 D/Dopt=0.553 W/Wopt=1.081	K/Kopt=1.059 I/Iopt=1.219 D/Dopt=0.761 W/Wopt=1.154	K/Kopt=1.037 I/Iopt=1.443 D/Dopt=0.629 W/Wopt=1.655
T=3.0	K=4.3164 I=1.3294 D=0.5402 kf=0.7891 W=5.0635	K=2.5621 I=2.074 D=0.5473 kf=0.7507 W=66.8115	K=2.079 I=3.576 D=0.5415 kf=0.7426 W=5.6674	K=4.1773 I=0.6995 D=0.733 kf=0.7856 W=78.234	K=5.389 I=0.5645 D=0.6322 kf=0.8467 W=12.6396
T=3.0	K/Kopt=1.021 I/Iopt=1.103 D/Dopt=0.935 W/Wopt=1.004	K/Kopt=0.935 I/Iopt=0.711 D/Dopt=0.969 W/Wopt=1.029	K/Kopt=1.032 I/Iopt=0 D/Dopt=0.863 W/Wopt=1.135	K/Kopt=0.948 I/Iopt=0.911 D/Dopt=1.20 W/Wopt=1.025	K/Kopt=1.048 I/Iopt=1.076 D/Dopt=0.896 W/Wopt=1.071
T=10	K=14.0054 I=1.4846 D=0.5732 kf=0.7906 W=0.6336	K=8.0303 I=3.1475 D=0.5937 kf=0.7526 W=70.896	K=7.81 I=3.462 D=0.594 kf=0.7515 W=0.6809	K=13.966 I=1.266 D=0.605 kf=0.7915 W=69.569	K=15.68 I=0.5593 D=0.7678 kf=0.8383 W=1.5947

T=10	K/Kopt =1.016	K/Kopt =0.961	K/Kopt =1.04	K/Kopt =1.01	K/Kopt =0.96
	I/Iopt =1.066	I/Iopt =0.302	I/Iopt =0	I/Iopt =1.049	I/Iopt =0.938
	D/Dopt =0.975	D/Dopt =1.008	D/Dopt =0.95	D/Dopt =0.990	D/Dopt =1.082
	W/Wopt =1.003	W/Wopt =1.087	W/Wopt =1.176	W/Wopt =1.003	W/Wopt =1.046

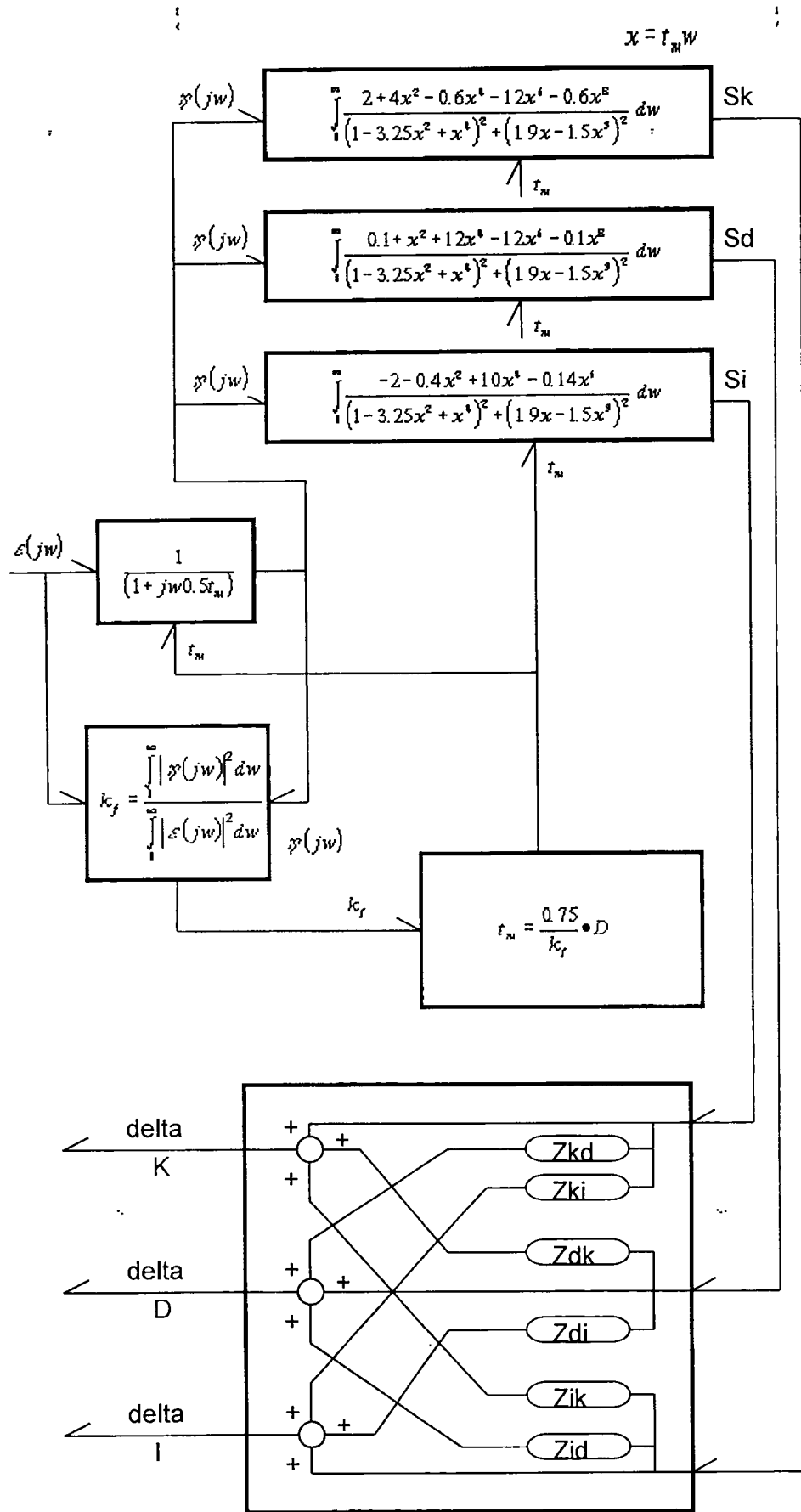
## 10. Rozwiązania funkcjonalne układów autostrojzenia.

W oparciu o wzorcowe charakterystyki strojenia, podane w paragrafie 8 oraz zależności (9.1) i (9.2), na rys.67 i rys.68 zostały zaproponowane schematy funkcjonalne układów strojenia, które pozwalają na prostą realizację algorytmu autostrojzenia dla mikroprocesorowych regulatorów. Obliczanie sygnałów strojenia  $S_k$ ,  $S_d$ ,  $S_i$  powinno odbywać się w oparciu o schematy ideowe autostrojzenia omówione w pracy [2]. W układzie na rys.68 zastosowano blok filtracji o stałej czasowej  $t_f = 0.5t_m$ , który służy jednocześnie do wstępnej filtracji sygnału odchyłki regulacji oraz do obliczania współczynnika  $k_f$ .

Na obu schematach zaznaczono układ kompensacji sprzężeń skrośnych pomiędzy sygnałami autostrojzenia. Odsprężenie sygnałów skrośnych powinno umożliwić zwiększenie skuteczności strojenia i przyspieszenie prędkości dochodzenia do wartości optymalnych. Jednak dobre dobranie wartości transmitancji kompensujących może okazać się dosyć kłopotliwe.



Rys.67 Układ autostrojzenia bez filtru wejściowego.



Rys.68 Układ autostrojzenia z filtrem wejściowym.

## 11. Wnioski.

Praca potwierdza słusność zasadniczej koncepcji autostrojzenia oraz prawidłowość podstawowych tez zaproponowanej metody. Dostarcza danych, które w przyszłości mogą być bardzo pomocne przy praktycznym wykorzystaniu proponowanej metody autostrojzenia w docelowym, przemysłowym zastosowaniu algorytmu samostrojzenia.

Rozważony dodatkowo alternatywny sposób strojenia parametrów regulatora może być szczególnie przydatny w wypadku kiedy nieznana jest charakterystyka zakłóceń oddziałujących na obiekt regulacji, a znane są parametry obiektu regulacji.



## 12. Literatura.

[1]. H. Górecki: Analiza i synteza układów regulacji z opóźnieniem. WNT Warszawa 1971r.

[2]. Z. Pietrusiński: Koncepcja realizacji algorytmu samostrojzenia i adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych w oparciu o analizę charakterystyki częstotliwościowej sygnału odchyłki regulacji. Biuletyn PIAP, Nr 5-169/93 1993r.

[3]. J. Kudrewicz: Częstotliwościowe metody w teorii nieliniowych układów dynamicznych. WNT Warszawa 1970r.

[4]. W. Findeisen i inn.: Poradnik inżyniera automatyka. WNT Warszawa 1973r.

Załącznik 1.  
Wydruki roboczego oprogramowania

```

/*Program dla obliczania charakterystyk czestotliwosciowych i widma
sygnalow w układzie regulacji złożonym z obiektu inercyjnego
z opóźnieniem i regulatora typu PID.*/

```

```

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

```

```

float T,K,I,D;
float w,P,Q,X,M,Gob,Gz[100],Fk[100],Fi[100],Fd[100];
float tm,AM,AFk[100],AFi[100],AFd[100],Xfk[100];
float EFk[100],EFi[100],EFd[100],Ek,Ec;
float tf,NAM,NAFk[100],NAFi[100],NAFd[100],WX[100],EWX,ZC;
int i,j;
FILE *stream;
FILE *stream1;
float l;

```

```

main() /* obliczanie danych do wykresow oraz tworzenie zbioru wynikow */
{

```

```

printf("T=");
scanf("%f",&T);
printf("K=");
scanf("%f",&K);
printf("I=");
scanf("%f",&I);
printf("D=");
scanf("%f",&D);
printf("λ=\n");

```

```

EWX=0;
for (j=-0.5; j<2; ++j)
{
w=-0.001;
for (i=0; i<21; ++i)
{

```

```

w=w+0.025;
Gob=1/(1+(w*w*T*T));
X=(w*D-(1/(w*I)));
P=(cos(w)-(w*T*sin(w)))/(1+(w*w*T*T));
Q=-(sin(w)+(w*T*cos(w)))/(1+(w*w*T*T));
M=1+(2*K*P)-(2*K*Q*X)+K*K*Gob*((X*X)+1);
Fk[i]=(-2*K*(P-(Q*X)+(K*Gob*((X*X)+1)))/M;
Fi[i]=((-2/(w*I))*((K*K*Gob*X)-K*Q))/M;
Fd[i]=(-2*w*D*((K*K*Gob*X)-K*Q))/M;
tm=0.5/*1.28*D;*/
AM=(pow((1-(3.25*tm*tm*w*w)+(tm*tm*tm*tm*w*w*w*w)),2)
+pow((1.9*tm*w-(1.5*tm*tm*tm*w*w*w*w)),2));
Xfk[i]=(-2.0*(1.0-(1.1*tm*tm*w*w)+(1.65*pow((tm*w),4))-(2.5*pow(
(tm*w),6))
+(0.41*pow((tm*w),8))))/AM;
Gz[i]=Gob/M;
AFk[i]=(2.0+(4.0*tm*tm*w*w)-(0.6*pow((tm*w),4))-(12.0*pow((tm*w),
6))
-(0.6*pow((tm*w),8)))/AM;
AFi[i]=(-2.0-(0.4*tm*tm*w*w)+(10.0*pow((tm*w),4))+(0.14*pow((tm*
w),6))
+(0.05*pow((tm*w),8)))/AM;
AFd[i]=((0.1+1*tm*tm*w*w)+(12.0*pow((tm*w),4))-(12.0*pow((tm*w),
6))
-(0.1*pow((tm*w),8)))/AM;
tf=0.5*tm;
NAM=(1+tf*tf*w*w)*(1+tf*tf*w*w);
NAFk[i]=AFk[i]/NAM;

```

```

        NAFi[i]=AFi[i]/NAM;
        NAFd[i]=AFd[i]/NAM;
        Ek=Gz[i]/(w*w);
        Ec=Ec+Ek;
        EFk[i]=Ek*Fk[i];
        EFi[i]=Ek*Fi[i];
        EFd[i]=Ek*Fd[i];
        WX[i]=1/(w*w);
        EWX=EWX+WX[i];
/*      printf(" %2.2f", Fd[i]); */
        if(j>0)
            printf(" %2.3f", (WX[i]/ZC));
    }
    ZC=EWX/21;

}

printf("\n");
printf("ZC=");
printf("%2.2f", ZC);
printf("\n");
/* tworzenie file'u z wynikami */

stream =fopen("danfk.tab", "w");
for( i=0; i<21; i++)
    fprintf(stream, "%f ", NAFk[i]);
fclose(stream);

/* czytanie file'u i wydruk na momilorze */

/* stream1=fopen("danfk.tab", "r");
while(fscanf(stream1, "%f ", &l) !=EOF)
    printf("\n%f", l);
fclose(stream1); */

return(0);
}

```

```

/* Program symulowania procesu autostrojzenia i obliczania wskaźników
   jakości regulacji i optymalnych nastaw przy dostrojeniu idealnym
   oraz przy strojeniu według stałych charakterystyk strojenia
   zgodnie z proponowaną metodą adaptacji parametrów dynamicznych */

```

```

#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

float T, k, I, D, dK, dD;
float w, P, Q, X, M, Gob, Gz[250], Fk[250], Fi[250], Fd[250];
float tm, AM, AFk[250], AFi[250], AFd[250], XFk[250];
float tf, NAM, NAFk[250], NAFi[250], NAFd[250];
float Ek, Ec, df, fc, kf, ZFk, ZFi, ZFd, DFK, DFi, DFd;
int n, i, wsk;
FILE *stream;
FILE *streami;
float l;

```

```
void oblicz()
```

```

{
    ZFk=0.0;
    ZFi=0.0;
    ZFd=0.0;
    Ec=0.0;
/*
    tm=tm*(kf/0.75); */
    tm=(D*0.75)/kf;
    fc=0.0;
    Ek=0.0;
    w=-0.001;
    for (i=0; i<201; ++i)
    {
        w=w+0.05;
        Gob=1/(1+(w*w*(T)));
        X=(w*D-(1/(w*I)));
        P=(cos(w)-(w*T*sin(w)))/(1+(w*w*T*T));
        Q=(sin(w)+(w*T*cos(w)))/(1+(w*w*T*T));
        M=1+(2*K*P)-(2*K*Q*X)+(K*K*Gob*(X*X+1));
        Fk[i]=(-2*K*(P-(Q*X)+(K*Gob*(X*X+1))))/M;
        Fi[i]=((-2/(w*I))*(K*K*Gob*X)-K*Q)/M;
        Fd[i]=(-2*w*D*(K*K*Gob*X)-K*Q)/M;
        Gz[i]=Gob/M;
        AM=(pow((1-(3.25*tm*tm*w*w)+(tm*tm*tm*tm*w*w*w*w)),2)
            +pow((1.9*tm*w-(1.5*tm*tm*tm*w*w*w*w)),2));
        XFk[i]=(-2.0*(1.0-(1.1*tm*tm*w*w)+(1.65*pow((tm*w),4))-(2.5*pow(
(tm*w),6))
            +(0.41*pow((tm*w),8))))/AM;
        AFk[i]=(2.0+(4.0*tm*tm*w*w)-(0.6*pow((tm*w),4))-(12.0*pow((tm*w)
,6))
            -(0.6*pow((tm*w),8)))/AM;
        AFi[i]=(-2.0-(0.4*tm*tm*w*w)+(10.0*pow((tm*w),4))+(0.14*pow((tm*
w),6))
            +(0.05*pow((tm*w),8)))/AM;
        AFd[i]=((0.1+1*tm*tm*w*w)+(12*pow((tm*w),4))-(12.0*pow((tm*w),6)
)
            -(0.1*pow((tm*w),8)))/AM;
        tf=0.5*tm;
        NAM=(1+tf*tf*w*w)*(1+tf*tf*w*w);
        NAFk[i]=AFk[i]/NAM;
        NAFi[i]=AFi[i]/NAM;
        NAFd[i]=AFd[i]/NAM;

        Ek=(Gz[i]/(w*w*w*w*Gob)); /*@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@@
        df=Ek/NAM;
        fc=fc+df;

```

3  
101

```

        Ec=Ec+Ek;
        ZFk=ZFk+(NAFk[i]*Ek);
        ZFi=ZFi+(NAFi[i]*Ek);
        ZFd=ZFd+(NAFd[i]*Ek);
    }
    kf=fc/Ec;

```

```

}

main() /* obliczanie danych do wykresow oraz tworzenie zbioru wyników */
{

    printf("T=");
    scanf("%f",&T);
    printf("K=");
    scanf("%f",&K);
    printf("I=");
    scanf("%f",&I);
    printf("D=");
    scanf("%f",&D);
    printf("X=\n");

    kf=0.75;
    tm=0.5;

    for (n=0;n<1000;++n)
    {
        oblicz();

        DFk=ZFk/Ec;
        DFi=ZFi/Ec;
        DFd=ZFd/Ec;

/*      if(((DFi>0.8) || (DFi<-0.8) || (DFd>0.8) || (DFd<-0.8) || (DFk>0.8) || (DFk<-0.8))
        {
            I=2.8*tm;
            D=tm;
        }*/

/*      if(I<(2.0*tm))
        {
            DFi=DFi/3;
            DFk=DFk/2;
        }

        if(D>tm)
        {
            DFd=DFd/3;
            DFk=DFk/2;
        }*/

/*      if(((DFk*DFd)>0.1) || ((DFk*DFi)<(-0.2)))
            DFk=DFk*1;

        else
        {
            if(((DFk*DFd)<-0.002) || ((DFk*DFi)>0.01))
                DFk=DFk/10;

            else
                DFk=DFk/6;

            if(((DFk*DFd)<-0.05) || ((DFk*DFi)>0.1))
                DFk=DFk/2;

        }

```



```

/*          printf(" %2.2f",NAFk[i]);*/
}
printf("\n");

/* tworzenie file'u z wynikami */

stream =fopen("danfk.tab","w");
for( i=0;i<21;i++)
    fprintf(stream,"%f ",Fd[i]);
fclose(stream);

/* czytanie file'u i wydruk na momitorze */

/*
stream1=fopen("danfk.tab","r");
while(fscanf(stream1,"%f",&l) !=EOF)
    printf("\n%f",l);
fclose(stream1);*/

return(0);

```