

Algorytm adaptacji uniwersalnych regulatorów mikroprocesorowych

Streszczenie: W pracy została przedstawiona koncepcja realizacji nowego algorytmu adaptacji, przeznaczonego do stosowania w uniwersalnych mikroprocesorowych regulatorach PID. Działanie algorytmu oparte jest na uproszczonej analizie charakterystyki częstotliwościowej sygnału odchyłki w zamkniętym układzie automatycznej regulacji. Algorytm pozwala na quasi - ciągle dostrajanie parametrów regulatora zarówno do zmieniających się parametrów obiektu jak i do zakłóceń oddziałujących na proces regulacji. Praca zawiera omówienie zasadniczej idei proponowanej metody adaptacji oraz propozycję realizacji zadania syntezy algorytmu w mikroprocesorowym regulatorze PID.

Adaptation algorithm for general purpose microprocessor based controllers

Abstract: The author presents a new concept of an adaptation algorithm for general purpose microprocessor based controllers. The idea of the algorithm is based on simplified frequency analysis characteristics of the error signal in a closed loop control. It permits quasi - constant autotuning of parameters of the controller both to the parameters of a control object and to the disturbances of the process itself.

The paper present the main idea of the proposed method of adaptation and a proposal of a design the adaptation microprocessor based PID - controller.

1. WSTĘP

Nowoczesne mikroprocesorowe regulatory PID coraz częściej stosują algorytmy automatycznego doboru nastaw parametrów dynamicznych. Są to algorytmy samostrojenia i algorytmy adaptacji. Samostrojenie polega na samoczynnym doborze nastaw parametrów regulatora na podstawie danych uzyskanych na podstawie eksperymentu inicjowanego przez operatora. Adaptacja służy temu samemu, ale dane są wybierane automatycznie z przebiegów przejściowych, bez udziału operatora. Algorytmy samostrojenia stosowane są dość powszechnie, natomiast adaptacja występuje właściwie tylko w regulatorach kilku czołowych producentów, którzy nie podają szczegółów stosowanych rozwiązań technicznych [1]. Niniejsza praca jest próbą opracowania nowej metody adaptacji przeznaczonej do implementacji w algorytmach uniwersalnych regulatorach PID [2], [3]. Zadaniem algorytmu adaptacji jest dostrajanie parametrów dynamicznych regulatora zarówno do charakterystyki obiektu jak i do charakterystyki zakłóceń na niego oddziałujących, bez ingerencji w pracę układu regulacji. Brak ingerencji oznacza nie tylko brak sygnałów próbnych wprowadzanych

do obwodu regulacji, ale także rezygnację z konieczności utrzymywania stałego sygnału wyjściowego regulatora, przez cały czas trwania kroku identyfikacji modelu, którego długość jest często zbliżona do stałej czasowej opóźnienia obiektu, czego wymagają na przykład metody adaptacji z identyfikacją modelu.

2. PRZEDSTAWIENIE OGÓLNEJ IDEI ALGORYTMU ADAPTACJI

Zakłada się liniowy jednowymiarowy obiekt regulacji, na który oddziałują zakłócenia o ustalonym rozkładzie widmowej gęstości mocy, przy czym parametry obiektu i charakter zakłóceń można uważać za stałe w przedziale czasu, wystarczającym do przeprowadzenia pojedynczego kroku strojenia parametrów regulatora, zgodnie z proponowaną procedurą adaptacji. Przyjmuje się wskaźnik jakości regulacji w postaci całki kwadratu odchyłki regulacji.

Zasadnicza idea proponowanej metody adaptacji oparta jest na analizie przebiegu charakterystyki częstotliwościowej zamkniętego układu automatycznej regulacji. Zmieniając wartości parametrów dynamicznych regulatora można zmieniać kształt tej charakterystyki. Zmiana nastawy, któregoś z parametrów powoduje poprawę tłumienia w pewnym zakresie częstotliwości i pogorszenie tłumienia w innym zakresie. Optymalne nastawy zależą więc od widma zakłóceń oddziałujących na obiekt regulacji. 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 zakłóceń.

Rozważania ogólne dotyczące metody adaptacji przeprowadzono w oparciu o schemat obwodu regulacji złożony z obiektu i regulatora. Na obiekt oddziałują zakłócenia $Z(t)$ o ograniczonym czasie trwania. Ogólna analiza pracy algorytmu nie wymaga określenia struktury ani liczby parametrów obiektu i regulatora.

Punktem wyjścia jest wyrażenie określające wskaźnik jakości regulacji. Stosując twierdzenie Parsewala można wskaźnik ten przedstawić w postaci częstotliwościowej.

$$J = \int_0^{+\infty} \varepsilon^2(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} |\varepsilon(j\omega)|^2 d\omega \quad (1)$$

gdzie:

$$\varepsilon(j\omega) = F[\varepsilon(t)]$$

Warunek optymalnego dostrojenia i -tego parametru regulatora daje się wyznaczyć w oparciu o metodę gradientową. Zastępując sygnał odchyłki iloczynem sygnału zakłócenia i transmitancji układu zamkniętego warunek optymalnego dostrojenia parametru p_i można przedstawić jako

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial p_i} &= \frac{\partial}{\partial p_i} \left[\int_0^{+\infty} \varepsilon^2(t) dt \right] = \frac{1}{\pi} \frac{\partial}{\partial p_i} \left[\int_0^{+\infty} |\varepsilon(j\omega)|^2 d\omega \right] = \\ &= \frac{1}{\pi} \frac{\partial}{\partial p_i} \left[\int_0^{+\infty} |Z(j\omega)|^2 |G_z(j\omega)|^2 d\omega \right] \end{aligned}$$

Po przekształceniu oraz zauważając, że zakłócenia nie są funkcją parametrów regulatora, a więc nie podlegają różniczkowaniu, otrzymuje się ogólne warunki optymalnego dostrojenia w

postaci wyrażenia (2), w którym funkcja „fri” jest pewną funkcją wagi, przyjmującą wartości dodatnie i ujemne.

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

gdzie:

$$f_n(\omega) = \frac{\partial |G_z(j\omega)|^2}{\partial p_n} \cdot \frac{1}{|G_z(j\omega)|^2} \quad (3)$$

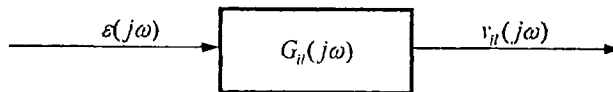
Funkcja ta określa współczynniki z jakimi sumowane są poszczególne składowe częstotliwościowe sygnały odchyłki regulacji. Została ona nazwana charakterystyką strojenia danego parametru. Wartość wyrażenia (2) może być traktowana jako sygnał pożądaney zmiany wartości parametru w procesie strojenia, jest to tak zwany sygnał strojenia. Parametry regulatora dostrojone są optymalnie jeśli sygnały strojenia są równe zeru.

Realizacja techniczna układu adaptacji wymaga zamodelowania charakterystyki strojenia. Często istnieje możliwość przedstawienia charakterystyki strojenia jako sumy algebraicznych kwadratów modułów łatwo realizowalnych transmitancji.

$$f_n = \sum_{l=1}^n a_{nl} |G_{il}(j\omega)|^2 \quad (4)$$

W pozostałych przypadkach możemy tylko aproksymować jej przebieg. Podstawiając wyrażenie (4) do wzoru (3) otrzymujemy

$$\frac{\partial J}{\partial p_n} = \sum_{l=1}^n a_{nl} \left(\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \varepsilon(j\omega) |G_{il}(j\omega)|^2 d\omega \right) \quad (5)$$



Rys. 1 Sygnały pomocnicze przy realizacji algorytmu adaptacji w wersji czasowej

Stosując ponownie twierdzenie Parsewala możemy, w oparciu o przebiegi czasowe sygnałów $v_{ii}(j\omega)$ pokazanych na rys. 1, określić warunek optymalnego dostrojenia

$$\frac{\partial J}{\partial p_n} = \sum_{l=1}^n a_{nl} \int_0^{\infty} v_{ii}^2(t) dt = \int_0^{\infty} \left(\sum_{l=1}^n a_{nl} v_{ii}^2(t) \right) dt \quad (6)$$

gdzie $v_{ii}(t)$ jest odwrotną transformatą Fourier'a sygnału $v_{ii}(j\omega)$:

$$v_{ii}(t) = F^{-1}[v_{ii}(j\omega)]$$

Istnieje również możliwość realizacji układu adaptacji według alternatywnej metody adaptacji. Sygnały przestrajania uzyskuje się tutaj jako iloczyn sygnału odchyłki regulacji i sygnałów wytwarzanych w modelu odpowiadającym transmitancji $H_i(j\omega)$.

$$\frac{\partial J}{\partial p_i} = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \varepsilon(t) \xi_i(t) dt \quad (7)$$

gdzie:

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

$$H_i(j\omega) = G_o(j\omega) G_z(j\omega) \frac{\partial R(j\omega)}{\partial p_i}$$

Transmitancję $H_i(j\omega)$ wyznacza się dość łatwo, jednak w metodzie tej zatracą się bezpośredni sens fizyczny związany z charakterystykami strojenia. Sposób ten nadaje się szczególnie w wypadku znajomości parametrów obiektu przy zmieniających się zakłóceniach.

4. ADAPTACJA PARAMETRÓW REGULATORA PID

Bardziej szczegółowa analiza pracy zamkniętego układu regulacji została przeprowadzona w przypadku regulatora PID oraz obiektu inercyjnego z opóźnieniem.

$$G_o(s) = \frac{K_o e^{-s\tau}}{1 + sT_o} \quad (8)$$

gdzie: K_o - oznacza wzmocnienie obiektu regulacji,

T_o - jest zastępczą stałą czasową obiektu,

τ - czasem opóźnienia obiektu.

Wprowadzono przy tym jednostki względne, odnosząc stałe czasowe obiektu i regulatora do czasu opóźnienia obiektu oraz zastępując współczynniki wzmocnienia obiektu i regulatora łącznym współczynnikiem wzmocnienia w pętli regulacji.

$\theta = t / \tau$ - czas względny,

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

$w = \omega\tau$ - względna pulsacja,

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

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

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

$K = K_p K_o$ - współczynnik wzmocnienia układu.

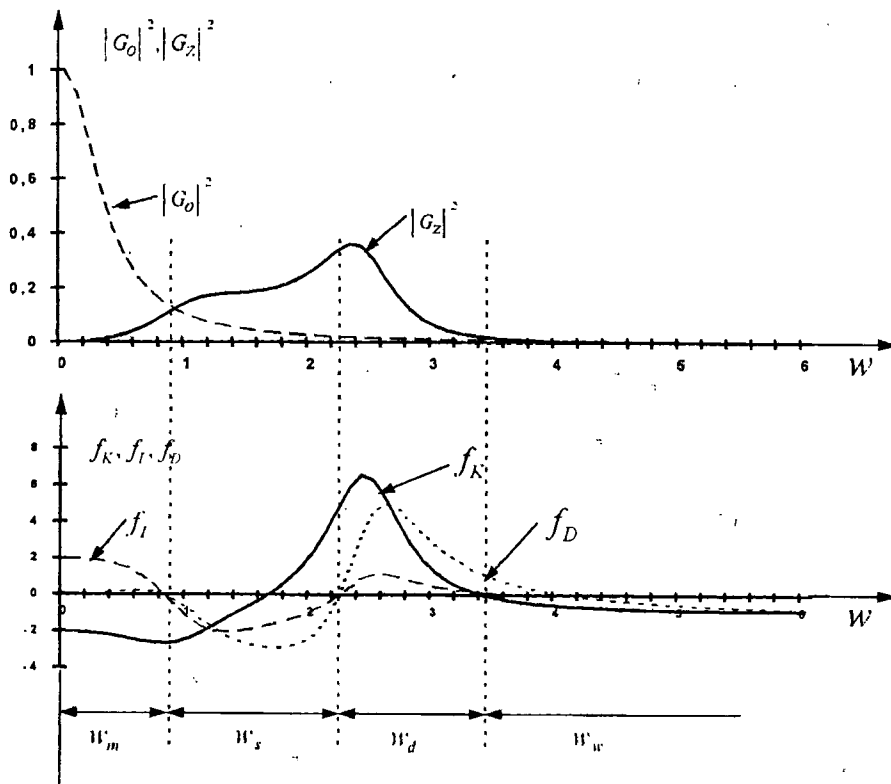
Transmitancję regulatora typu PID

$$R(s) = K_p \left(1 + sT_D + \frac{1}{sT_I} \right) \quad (9)$$

można zapisać w postaci

$$R(r) = K_p \left(1 + rD + \frac{1}{rI} \right)$$

Dla układów regulacji złożonych z obiektu inercyjnego z opóźnieniem i regulatora PID wykreślono przebiegi transmitancji i charakterystyki strojenia przy nastawach odpowiadających nastawom optymalnym (rys.2).



Rys. 2 Typowy przebieg rzeczywistych charakterystyk strojenia parametrów regulatora PID: wzmocnienia $f_K(\omega)$, czasu zdwojenia $f_I(\omega)$, czasu wyprzedzenia $f_D(\omega)$ oraz charakterystyka obiektu $|G_o(j\omega)|^2$ i charakterystyka zamkniętego układu regulacji $|G_z(j\omega)|^2$.

Użyteczny zakres pulsacji w układzie wyznacza charakterystyka układu zamkniętego $|G_z(j\omega)|^2$. Wynosi on ok. 3,5. Dla większych pulsacji zakłócenia są już bardzo silnie tłumione i mogą nie być uwzględniane w obliczeniach.

W użytecznym zakresie pulsacji można wyodrębnić trzy podzakresy pulsacji:

- podzakres małych pulsacji ω_m ,
- podzakres średnich pulsacji ω_s ,
- podzakres dużych pulsacji ω_d .

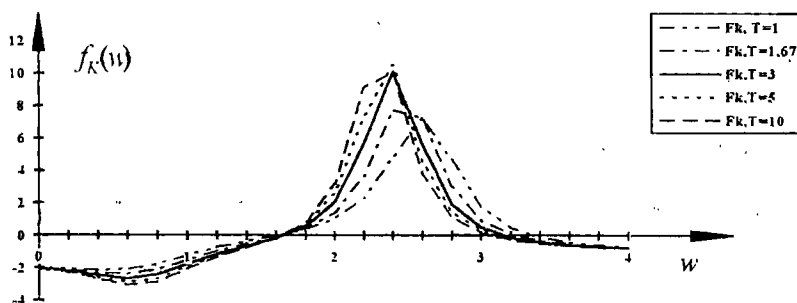
Charakterystyki strojenia mają różne znaki w poszczególnych podzakresach pulsacji. Znak charakterystyki wskazuje czy zmiana wartości nastawy powoduje pogorszenie czy też polepszenie tłumienia zakłóceń w danym zakresie pulsacji.

Działanie regulatora jest skuteczne jedynie w zakresie małych pulsacji. W zakresie tym przebieg $|G_z(j\omega)|^2$ leży poniżej przebiegu $|G_o(j\omega)|^2$. Dla średnich i dużych pulsacji tłumienie zakłóceń w zamkniętym układzie regulacji jest mniejsze niż w układzie otwartym.

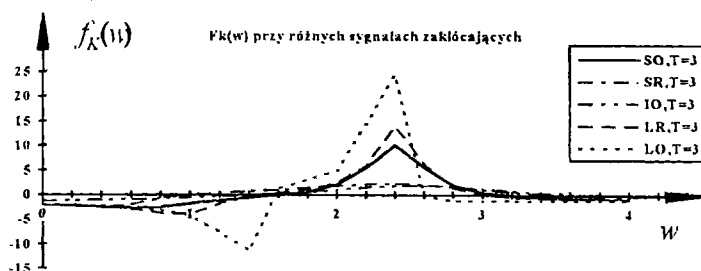
Do praktycznej realizacji algorytmu strojenia istotne jest wychwycenie cech wspólnych w przebiegach charakterystyk strojenia. Należy przeanalizować jak zależy przebieg charakterystyk strojenia od parametrów obiektu i rodzaju zakłóceń.

Na rysunkach rys. 3 i rys. 4 pokazane są przykładowe przebiegi charakterystyk strojenia wzmocnienia i stałej całkowania przy obiektach o różnym parametrach i przy różnych

sygnałach zakłócających. Widać, że zakłócenia i parametry obiektu w nieznacznym stopniu wpływają na przebiegi charakterystyk. Jedynym parametrem wymagającym strojenia jest czas opóźnienia obiektu. Czas ten można wyznaczyć na przykład drogą oszacowania pasma sygnału odchyłki regulacji.



Rys. 3 Przebiegi charakterystyk $f_k(w)$, przy nastawach wyznaczonych w oparciu o proponowaną procedurę doboru nastaw oraz przy kryterium minimalizacji całki kwadratu odchyłki regulacji.



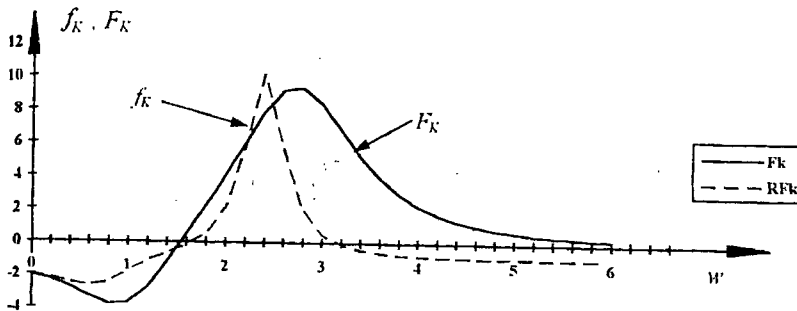
Rys. 4 Przebiegi charakterystyk $f_k(w)$ w układzie zawierającym obiekt o $T=3$ przy różnych sygnałach zakłócających: LO - sygnał liniowo narastający podany na wejście obiektu regulacji, LR - sygnał liniowo narastający podany na wejście regulatora, IO - impuls Dirace'a podany na wejście obiektu regulacji, IR - impuls Dirace'a podany na wejście regulatora, SO - skok jednostkowy wprowadzony na wejście obiektu regulacji, SR - skok jednostkowy wprowadzony na wejście regulatora.

Przyjęcie charakterystyk wzorcowych ma szereg zalet:

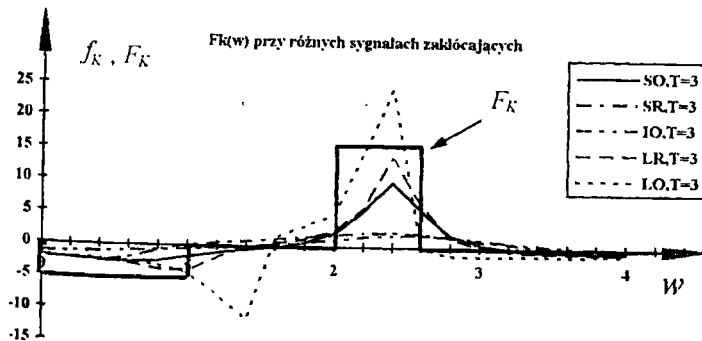
- upraszcza algorytm adaptacji,
- daje możliwość „poprawienia” kształtu charakterystyk m. in. poprzez eliminację przebiegów oscylacyjnych poza pasmem roboczym,
- pozwala na ujednoczenie amplitudy charakterystyk, a przez to na ujednoczenie zakresu przestrajania parametrów w pojedynczym kroku strojenia,
- pozwala na zmniejszenie oddziaływań skrośnych i poprawę prędkości dochodzenia do nastaw optymalnych.

Realizacja techniczna charakterystyk wzorcowych jest możliwa przy pomocy transmitancji aproksymujących. Na rys. 5 podany jest przykład przebiegu charakterystyki wzorcowej wzmocnienia i przebieg charakterystyki rzeczywistej. Większą swobodę w formowaniu przebiegu dają charakterystyki wzorcowe zrealizowane w oparciu o metodę szybkiej

transformaty Fourier'a. W metodzie tej analizie poddawana jest nie odchyłka regulacji ale jej transformata Fourier'a. Korzysta się przy tym bezpośrednio z sygnałów widma odchyłki. Pokazana na rys. 6 charakterystyka wzorcowa, złożona jest z prostokątów co upraszcza obliczenia. Przy tym, w zakresach częstotliwości, w których przebieg charakterystyk rzeczywistych jest niejednoznaczny, charakterystyki wzorcowe przyjmują wartości zerowe.



Rys. 5 Przebieg wzorcowej charakterystyki strojenia $F_K(\omega')$ stałej wzmocnienia regulatora K oraz rzeczywista charakterystyka $f_K(\omega')$ strojenia współczynnika wzmocnienia K , przy optymalnych nastawach regulatora wyznaczonych zgodnie z proponowaną metodą adaptacji, w przypadku obiektu o stałej $T=3$, przy zakłóceniu skokowym na wejściu obiektu regulacji.

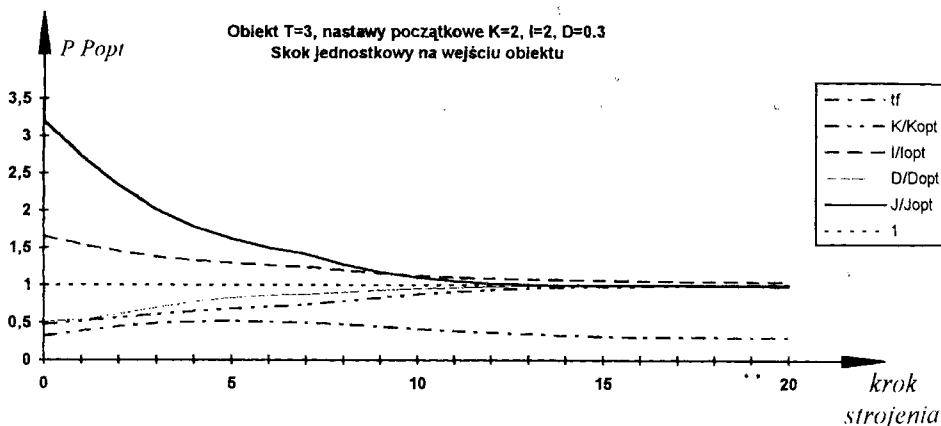


Rys. 6 Przebiegi charakterystyk $f_K(\omega')$ w układzie zawierającym obiekt o $T=3$ oraz proponowana wzorcowa charakterystyka strojenia $F_K(\omega')$.

W celu sprawdzenia poprawności działania algorytmu przeprowadzono:

- badania symulacyjne oraz
 - próbną implementację algorytmu, w rzeczywistym mikroprocesorowym regulatorze o działaniu PID (MRP-42C produkcji PIAP).
- Implementacja algorytmu w regulatorze MRP-42C i związane z tym badania miały raczej charakter jakościowy i pozwoliły na sprecyzowanie szeregu ograniczeń mających na celu zwiększenie pewności działania i zabezpieczenie na wypadek pracy w warunkach odbiegających od warunków wyidealizowanych w jakich prowadzone były badania symulacyjne.

Badaniom symulacyjnym podlegał układ regulacji zrealizowany w oparciu o charakterystyki wzorcowe i transmitancje aproksymujące. Procedura strojenia składała się z kolejnych kroków dostrajania, w czasie których wprowadzane były nowe nastawy regulatora, obliczone przez algorytm adaptacji. Pojedynczy krok obejmował odpowiedź układu regulacji od momentu podania zakłócenia do momentu uzyskania stanu ustalonego. Badania wykonano przy różnych parametrach obiektu i przy różnych zakłóceniach. Przykładowy przebieg strojenia parametrów przedstawiony jest na rys. 7. Można zauważyć, że przebiegi dość szybko dążą do jedności, co odpowiada nastawom optymalnym. Dolny przebieg nie dąży do jedności gdyż jest to sygnał służący do identyfikacji czasu opóźnienia obiektu.



Rys. 7 Przebieg strojenia parametrów dynamicznych regulatora w oparciu o charakterystyki wzorcowe w układzie z obiektem $T=3$, przy zakłóceniu typu skoku jednostkowego na wejściu obiektu i wskaźniku regulacji w postaci całki kwadratu odchyłki regulacji:

- nastawy początkowe $K=2,0$, $I=2,0$, $D=0,3$
- nastawy optymalne $K_{opt}=4,228$, $I_{opt}=1,205$, $D_{opt}=0,578$

Badania wykazały, że:

- Proces strojenia przebiega prawidłowo, a dostrojenie zbliżone do optymalnego jest osiągane na ogół w około 5÷15 krokach.
- Jakość regulacji jest zbliżona na ogół 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 leżących blisko granicy stabilności układu regulacji

LITERATURA

- [1] Świder Z., Trybus L.: *Samostrojenie i adaptacja w regulatorze przemysłowym RF-537*. Materiały Konferencji AUTOMATION'97, s.221-232, Warszawa 1997.
- [2] Pietrusiński Z.: *Koncepcja realizacji algorytmu samostrojenia i adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych w oparciu o analizę charakterystyki częstotliwościowej sygnału odchyłki regulacji*. Biuletyn PIAP, Nr 5-169/93 1993r, s. 3-35.
- [3] Pietrusiński Z.: *Metoda adaptacji parametrów dynamicznych regulatorów mikroprocesorowych*. Rozprawa doktorska. PW, Warszawa 1997.