Laboratorium problemowe V rok

ADAPTACYJNY REGULATOR DEAD-BEAT

Przedmiotem projektu jest synteza algorytmu sterowania odwołującego się w czasie rzeczywistym do modelu procesu. Model referencyjny lub odniesienia, który śledzi proces oraz dostarcza nam „wzorów" jego zachowania jest zazwyczaj dany jako analityczny lub symulacyjny model zaimplementowany na komputerze sterującym lub nadrzędnym. Wytwarza on wektor stanu, który wykorzystywany jest do doboru parametrów regulatora, lub bezpośrednio do doboru sterowania procesu .

Jako szczególny przypadek wybrano regulator stabilizujący "deadbeat". Ten algorytm, o skończonym czasie regulacji, zazwyczaj daje wyniki gorsze od spodziewanych, gdy w systemie sterowania pojawiają się nieliniowości. Nieliniowości te mogą być zawarte w samym modelu procesu lub też mogą wynikać z ograniczeń innych urządzeń technicznych składających się na układ sterowania. W dalszych rozważaniach uwzględniono te dwa typy nieliniowości :

- nasycenie charakterystyczne dla urządzeń wykonawczych,
- nieliniowości wewnętrzne procesu (modelu).

W pierwszym przypadku osiągnięcie, przez sterowanie stanu nasycenia powoduje, że czas przejścia systemu do nowego, zadanego stanu przestaje być określony zasadą „deadbeat". Wykonywana jest większa, zazwyczaj bliżej nieokreślona ilość dodatkowych kroków, nim zostanie osiągnięty punkt docelowy. Próbę rozwiązania tego problemu podjął Isermann, wprowadzając zadanie sterowania „deadbeat" ze zwiększoną (lecz z góry zdeterminowaną) ilością kroków, mające na celu ograniczenie wartości sterowania w krokach początkowych. Zastosowanie tej metoda jest ograniczone, o czym jest mowa poniżej.

Podejście implementowane w tym projekcie jest odmienne. Polega na takiej adaptacji jedynego dostępnego parametru regulatora „deadbeat" jakim jest okres sterowania, aby nie dopuszczać do wprowadzenia urządzenia wykonawczego w stan nasycenia. Adaptacja ta jest realizowana z wykorzystaniem w trybie „on-line" symulacyjnego modelu odniesienia.

W przypadku nieliniowości wewnętrznych modelu, obserwujemy efekty podobne do opisanych powyżej: liniowe sprzężenie od stanu określone według zasady „deadbeat" zastosowane do modelu nieliniowego powoduje, że po wykonaniu przewidzianej ilości kroków nie „trafiamy" w stan końcowy. Efektem jest zwiększenie ilości kroków. Zaproponowane poniżej rozwiązanie polega na zastosowaniu regulatora adaptacyjnego z predykcją o przesuwanym horyzoncie (RHR ang.- *receding - horizon regulation*). Synteza regulatora i jego parametryczna optymalizacja jest realizowana dla horyzontu predykcji wynikającego z zasady „deadbeat", ale wykonywany jest tylko jeden krok. Następnie, po korekcie parametrów modelu wynikającej z osiągnięcia nowego punktu pracy, procedura jest powtarzana od początku.

METODY SYNTEZY REGULATORA „DEADBEAT"

Podstawą rozważań będzie standardowy model sterowanego procesu nieliniowego w n-wymiarowej przestrzeni stanów:

$$\begin{aligned} &\dot{x}(t) = F\left(x(t), u(t)\right) \\ &y(t) = Cx(t) \\ &x(t) \in \overline{X} \subseteq R^n,\ u(t) \in \overline{U} \subseteq R^m \end{aligned} \tag{1}$$

$\overline{X}, \overline{U}$ - są nie niepustymi zbiorami stanów i sterowań dopuszczalnych.

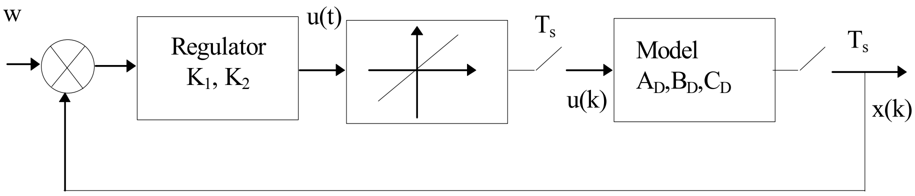
Zakłada się, że dla każdego ustalonego sterowania $u^{ust} \in \overline{U}$ istnieje ustalony stan procesu $x^{ust} \in \overline{X}$, jako rozwiązanie:

$$F(x^{ust}, u^{ust}) = 0$$

Dla modelu (1) poprzez linearyzację wokół wybranego stanu ustalonego (x^{ust}, u^{ust}) można uzyskać macierze (A,B,C) charakteryzujące model liniowy, a następnie model dyskretny w postaci (2):

$$\boldsymbol{x((k+1)T_s) = A_D x(kT_s) + B_D u(kT_s)} \qquad (2)$$
$$\boldsymbol{y(kT_s) = C_D x(kT_s)}$$

gdzie *k* jest indeksem kolejnych chwil sterowania, a przedział czasowy pomiędzy *k*, a *k+1-szą* chwilą sterowania jest równy okresowi dyskretyzacji T_s.

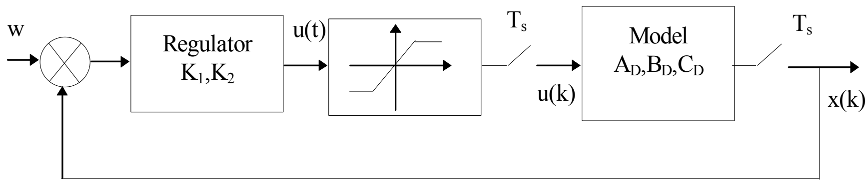


Rys.2. Idealny regulator „deadbeat"

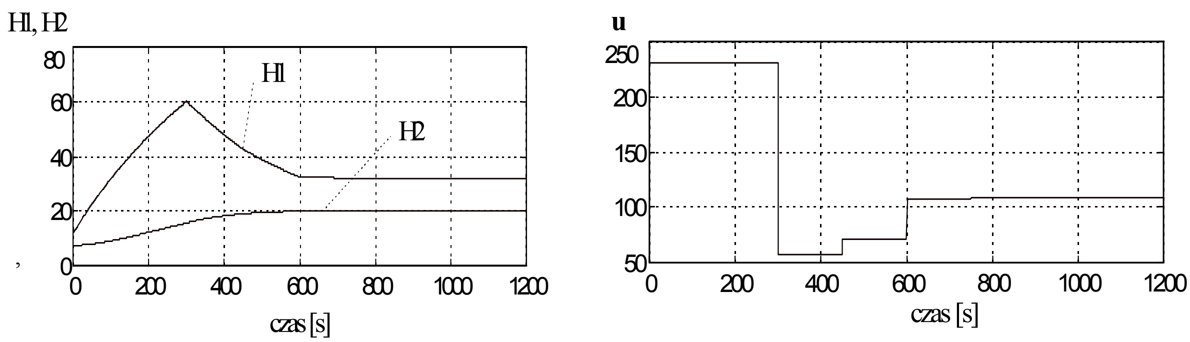
Przy pomocy sprzężenia zwrotnego od stanu (Rys. 2): $\boldsymbol{u(kT_s) = Kx(kT_s)}$, przy założeniu X-sterowalności układu (2), wartości własne macierzy stanu układu zamkniętego $\boldsymbol{(A_D - KB_D)}$ mogą być dowolnie umieszczone na płaszczyźnie zespolonej. W szczególności, istnieje sterowanie „deadbeat" sprowadzające każdy stan początkowy do stanu zerowego w skończonej ilości kroków, która nie przekracza wymiaru wektora stanu *n* [10]. Jedynym parametrem takiego regulatora jest okres dyskretyzacji T_s. Regulator taki będzie działał w opisany wyżej sposób, o ile $\boldsymbol{x(t) \in \mathrm{int}(\bar{X})}$, $\boldsymbol{u(t) \in \mathrm{int}\,\overline{U}}$, a różnica pomiędzy stanem aktualnym a końcowym jest na tyle mała, że błędy wynikające z linearyzacji modelu (1) nie stają się zbyt znaczące. Założenia te w praktyce rzadko bywają spełnione.

Najistotniejszym problemem jest uwzględnienie występujących w układzie ograniczeń, a w pierwszej kolejności nieliniowości o charakterze nasyceń. Typowym ograniczeniem jest ograniczenie amplitudy sterowania (Rys.3):

$$\boldsymbol{\overline{U} = \{u\colon u^{\min} \le u(t) \le u^{\max}\}} \qquad (3)$$



Rys.3. Regulator „deadbeat" o ograniczonej amplitudzie sterowania



Rys 4. Symulacja sterowania „deadbeat" poziomem cieczy (n=2) bez uwzględnienia ograniczeń na sterowanie. Parametry: T_s = 150 s, u_{max}=230.

Implementacja idealnego regulatora „deadbeat" dla układu o ograniczonej amplitudzie sterowania (Rys.3) powoduje, że traci on swoją podstawową cechę, jaką jest skończony czas regulacji.

Przykład taki przedstawia Rys 4. Regulator „deadbeat” stabilizujący model drugiego rzędu wchodzi w stan nasycenia i wykonuje 6 kroków zanim zostanie osiągnięty stan końcowy.

Dla liniowego modelu SISO Isermann zaproponował, aby czas regulacji „deadbeat” wydłużyć o m okresów sterowania w porównaniu z podejściem klasycznym. Umożliwia to wprowadzenie ograniczeń amplitudy sterowań w m pierwszych krokach do poziomu takiego, który nie powoduje nasycenia układu.

W tym przypadku założono, że obiekt opisany jest transmitancją (C_D=[0 1]):

$$G_0(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \ldots + b_m z^{-m}}{1 + a_1 z^{-1} + \ldots + a_m z^{-m}} = \frac{B(z)}{A(z)} \tag{4}$$

Przy obliczaniu parametrów regulatora wykorzystuje się następującą zależność określającą transmitancję dyskretną regulatora:

$$G_{DBm}(z) = \frac{q0 \cdot A(z) \cdot S(z)}{1 - q0 \cdot B(z) \cdot S(z)} \tag{5}$$

$S(z) = 1 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} + \ldots + s_n z^{-m}$ jest wielomianem stopnia m, którego współczynniki dobierane są w taki sposób, aby zapewnić ograniczoną amplitudę sterowania w pierwszych m krokach, przy czym $q0$ jest współczynnikiem skalowania.

Podstawowa niedogodność tej metody polega na konieczności założenia przed przystąpieniem do doboru współczynników wielomianu $S(z)$, które z nasyceń typu (3) będzie istotne w pierwszych krokach sterowania i w ilu kolejnych krokach to zjawisko wystąpi. Zatem wielomian $S(z)$ musi być dobierany dla szczególnych wartości zadanych $w(k)$. Te okoliczności, a także konieczność uwzględnienia modeli MIMO i nieliniowości wynikających z postaci modelu (1) skłaniają do poszukiwania innych sposobów doboru parametrów regulatora „deadbeat”. Zostały one omówione w kolejnych rozdziałach.

Adaptacyjny regulator „deadbeat”.

Zastosowanie adaptacji parametru T_s regulatora „deadbeat” z wykorzystaniem w trybie „on-line” modelu referencyjnego umożliwia pogodzenie dwóch tendencji: z jednej strony wykorzystanie maksymalnej wydajności urządzenia sterującego, a z drugiej nie dopuszczenie do wprowadzenia układu w stan nasycenia, a tym samym zachowanie podstawowej cechy idealnego sterowania „deadbeat”: ograniczonego czasu regulacji.

Niech w chwili t_k sterowanie „deadbeat”, przy założonym okresie sterowania T_s^d, wynosi:

$$u(kT_s^d) = K_d X(kT_s^d)$$

Sterowanie $u(T_s(k))$ będziemy nazywali *sterowaniem równoważnym* sterowaniu „deadbeat” $u(T_s^d)$ w k-tym okresie sterowania, jeśli dla identycznych warunków początkowych $x(t_k)$ po okresie sterowania $T_s(k)$ uzyskamy:

$$x(t_k + T_s(k), u(T_s(k)) = x(t_k + T_s^d, u(T_s^d))$$

Sterowanie $u(T_s(k))$ jest równoważne $u(T_i^d)$ w okresie k, gdy spełniony jest warunek:

$$u(T_s(k)) = \frac{x(t_k)(A_D(T_s^d) - A_D(T_s(k)) + B_D u(T_s^d)}{B_D(T_s(k))} \tag{6}$$

gdzie A_D, B_d są macierzami stanu i sterowania układu dyskretnego z podtrzymaniem zerowego rzędu, określonymi dla okresu dyskretyzacji T_s^d. Zależność (6) wynika z przyrównania rozwiązań równań systemu liniowego uzyskanych odpowiednio po czasie T_s *i* T_s^d.

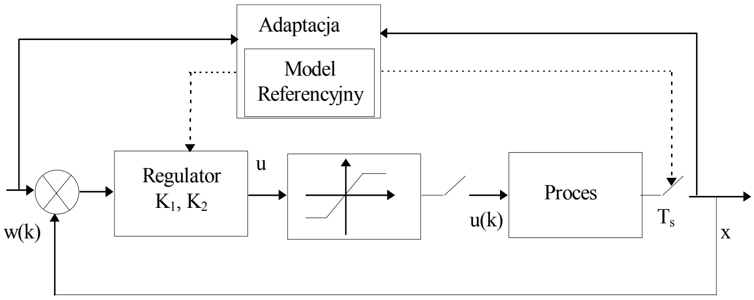
Adaptacja regulatora „deadbeat” zastosowana dla k-tego okresu sterowania polega na rozwiązaniu następującego zadania optymalizacji:

$$\max_{T_s(k)} \{u(T_s(k)\}$$

przy spełnieniu (6) oraz warunku przynależności sterowania do odpowiedniego brzegu zbioru dopuszczalnego w postaci (3):

$\boldsymbol{u(T_s(k)) \in \partial\overline{U}}$

Powyższe zadanie maksymalizacji sterowania może być rozwiązane z wykorzystaniem modelu referencyjnego (Rys.5) do którego odwołanie się następuje w czasie rzeczywistym [2], [3].



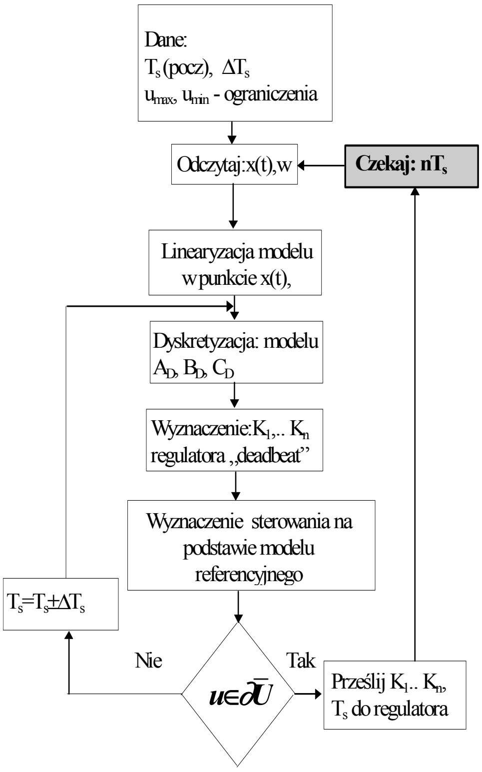
Rys.5. Adaptacyjny regulator "deadbeat"

Działanie algorytmu adaptacji regulatora „deadbeat” ilustruje Rys. 6. Adaptacja polega na takiej modyfikacji kroku dyskretyzacji T_s , aby równoważne sterowanie (6) nie przekroczyło ograniczeń związanych z wydajnością urządzenia sterującego. Krok dobierany poprzez zastosowanie iteracyjnej metody wykorzystującej model referencyjny dla określenia równoważnego sterowania (6) po każdej modyfikacji kroku.

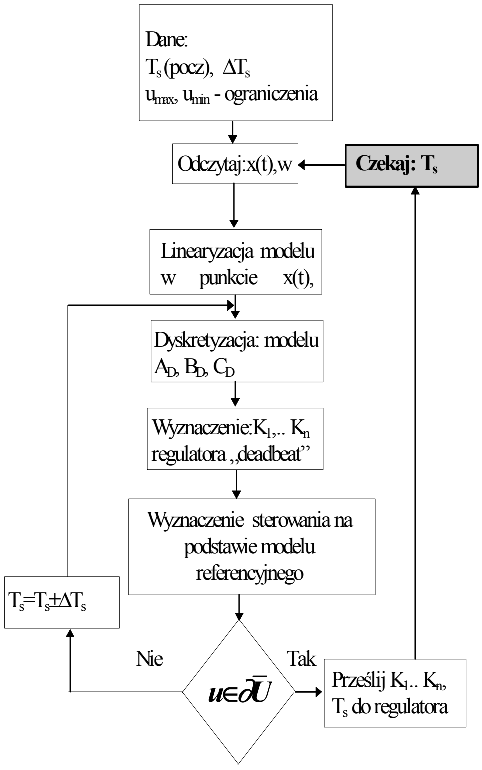
Adaptacyjny regulator „deadbeat” z predykcją.

Algorytm ten jest modyfikacją algorytmu adaptacyjnego opisanego w poprzednim rozdziale. Umożliwia lepsze uwzględnienie nieliniowości modelu sterowanego procesu.

Modyfikacja algorytmu polega na tym, że po wyliczeniu metodą adaptacyjną parametrów regulatora „deadbeat” (T_s, $K_1 ... K_n$) wykonywany jest tylko pierwszy krok sterowania, a następnie parametry regulatora „deadbeat” są przeliczane od początku, z uwzględnieniem jednak nowego punktu w przestrzeni w przestrzeni stanów, w którym znalazł się system po wykonaniu pierwszego kroku. Po wykonaniu kolejnego, pojedynczego kroku operacja modyfikacji nastaw regulatora jest powtarzana. Zasadę działania tego algorytmu ilustruje Rys. 7.



Rys. 6. Algorytm adaptacyjnego regulatora „deadbeat”(*x(t)*-stan bieżący, *w*- stan zadany)



Rys.7. Adaptacyjne sterowanie „deadbeat” z predykcją

Proponowany algorytm jest szczególnym przypadkiem algorytmu predykcyjnego RHR (ang.:*receding-horizon regulation*) opisanego w roku 1975 przez Thomasa, jako metody zastąpienia półnieskończonego horyzontu optymalizacji dyskretnego regulatora LQR horyzontem predykcji o długości N kroków. Zadanie sterowania predyktywnego RHR zostało także rozwiązane dla liniowych układów niestacjonarnych. Ten ostatni przypadek dotyczy w szczególności predyktywnego algorytmu „deadbeat” z Rys. 7. Ze względu na powtarzaną w każdym kroku linearyzację, przyjęty dla syntezy regulatora „deadbeat” model jest w postaci:

$$\boldsymbol{x((k+1)T_s) = A_D(kT_s)x(kT_s) + B_D(kT_s)u(kT_s)}$$

o współczynnikach A_D i B_D modyfikowanych w kolejnych krokach w wyniku linearyzacji.
Zapewnianie asymptotycznej stabilności takiej procedury wymaga założenia pełnej sterowalności pary ($\boldsymbol{A_D(kT_s), B_D(kT_s)}$) w każdym kroku, ale także zachowania odpowiedniej długości horyzontu predykcji N.