

Mariusz Nieniewski
Maria Kosicka

Zakład Badań Podstawowych
MPIH i PAN
w Instytucie Elektrotechniki

SYSTEMY ADAPTACYJNE W NAPĘDACH I ROBOTYCE:
CYFROWY SYMULATOR NAPĘDU PRĄDU STAŁEGO
ZE ŚLEDZENIEM MODELU

SPIS OZNACZEŃ

Ω	- Prędkość obrotowa.
V_a, i_a	- Napięcie i prąd twornika.
R_a, L_a	- Rezystancja i indukcyjność twornika.
J_m, J	- Moment bezwładności silnika i całkowity moment silnika i obciążenia.
k_e, k_t	- Stale siły elektromotorycznej i momentu obciążenia.
$T_c = J R_a / (k_e k_t)$	- Elektromechaniczna stała czasowa silnika.
$T_a = L_a / R_a$	- Elektromagnetyczna stała czasowa silnika.
T_L	- Moment obciążenia.
k_s	- Współczynnik wzmocnienia sterownika.
V_r, V_m	- Sygnał zadający prędkość obrotową i sygnał wejściowy modelu.
$V_{i0}, V_{\Omega 0}$	- Sygnały wyjściowe regulatora prądu i regulatora prędkości obrotowej.
e_i, e_{Ω}	- Sygnały uchybów regulatora prądu i regulatora prędkości obrotowej.
e, e^*	- Sygnał uchybu systemu regulacji prędkości oraz adaptacyjny sygnał uchybu ([4], [6]).
k_i, T_i	- Współczynnik wzmocnienia i stała czasowa całkowania regulatora prądu.
k_{Ω}, T_{Ω}	- Współczynnik wzmocnienia i stała czasowa całkowania regulatora prędkości obrotowej.
T_r	- Stała czasowa obwodu wejściowego regulatora prędkości obrotowej.
T_{cs}	- Zastępcza stała czasowa systemu regulacji prędkości.
T_1, T_2	- Stale czasowe zamkniętej pętli regulacji prądu [4].
$k_{if}, k_{\Omega f}$	- Współczynnik wzmocnienia toru sprzężenia zwrotnego pętli regulacji prądu i toru sprzężenia zwrotnego pętli regulacji prędkości obrotowej.
K_m, T_m	- Współczynnik wzmocnienia i stała czasowa modelu odniesienia.
x_m	- Sygnał wyjściowy modelu odniesienia.
T	- Okres próbkowania.
t	- Czas.
k	- Numer bieżący kroku.

- s - Operator Laplace'a.
 K_p, K_q - Współczynniki w równaniach algorytmu adaptacji.
 V_{ad} - Adaptacyjny sygnał sterujący.
 K_1, K_2, K_3 - Współczynniki wzmocnienia członów proporcjonalnych.
 $p_m = \exp(-T/T_m)$, $q_m = K_m(1 - p_m)$ - Parametry modelu odniesienia.
 $p = \exp(-T/T_{cs})$, $q = (1 - p)/k_{\Omega f}$ - Parametry uproszczonego układu regulacji prędkości.
 \hat{p}, \hat{q} - Estymaty parametrów p i q .

1. Wprowadzenie

Jedną z metod poprawy jakości sterowania układami automatycznej regulacji polega na stosowaniu systemów adaptacyjnych (rys. 1, 2) ze śledzeniem modelu (AMFC - Adaptive Model Following Control).

Niniejszy artykuł poświęcony jest badaniu zachowania się typowego przemysłowego systemu regulacji prędkości silnika prądu stałego z tranzystorowym lub tyrystorowym wzmacniaczem mocy przy zastosowaniu w nim mechanizmu adaptacji. Systemy napędowe z silnikami prądu stałego bardzo często stosowane są w robotyce, ale również w przemyśle papierniczym i hutniczym, gdzie celem regulacji jest utrzymanie odpowiedniej stałej prędkości obrotowej maszyny.

Teoria, jaką można znaleźć w literaturze [1] dotyczy opisu takich układów AMFC, w których zarówno model odniesienia, jak i obiekt regulacji opisane są równaniami stanu tego samego rzędu. Do takich przypadków odnoszą się warunki hiperstabilności. Trudności z interpretacją teoretyczną pojawiają się wówczas, gdy obiekt jest wyższego rzędu niż model, co zwykle ma miejsce w praktycznych zastosowaniach. Opis matematyczny dotyczący takiego przypadku nie został dotychczas opracowany, a jest wysoce prawdopodobne, że rozwiązanie analityczne w ogóle nie istnieje.

Można wykazać, że jeśli obiekt i model są tego samego rzędu, to przy odpowiednio dobranych współczynnikach K_1 , K_2 i K_3 (rys. 1) uchyb regulacji

$$e(t) = 0$$

i mamy do czynienia z systemem nieadaptacyjnym. Jeśli parametry obiektu regulacji są stałe, stosowanie adaptacji wydaje się zbyteczne. Stosowanie mechanizmu adaptacji staje się celowe wówczas, gdy parametry obiektu regulacji są zmienne w czasie. Na obiekt oddziałuje w tym przypadku pewien zmienny sygnał adaptacyjny V_{ad} (rys. 1) będący funkcją nieliniową sygnałów wejściowego V_m i wyjściowego Ω oraz sygnału uchybu e . Oddziaływanie to powoduje, że

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0.$$

Sygnał wejściowy obiektu, którym jest system regulacji prędkości ma dla schematu z rys. 1 następującą postać

$$V_r(k) = K_1 V_m(k) + K_2 x_m(k) - K_3 \Omega(k) + V_{ad}(k). \quad (1)$$

System adaptacyjny rozważany poniżej opiera się na nieco innej, ale jak można wykazać [2] równoważnej koncepcji (rys. 2). Nie powstaje tu dodatkowy zmienny sygnał, ale podczas trwania procesu adaptacji ulegają zmianie współczynniki wzmocnienia (rys. 2) zależne od estymat parametrów $\hat{p}(k)$ i $\hat{q}(k)$. Wielkości p i q charakteryzują uproszczony nieadaptacyjny system regulacji prędkości (p. Spis oznaczeń). Ich estymaty natomiast zależą nieliniowo od sygnałów wejściowego i wyjściowego obiektu oraz od sygnału uchybu.

Natomiast zgodnie z rozważaniami w [3], dla schematu z rys. 2 sygnał V_r można opisać zależnością

$$V_r(k) = \frac{q_m}{\hat{q}(k)} V_m(k) + \frac{p_m - \hat{p}(k)}{\hat{q}(k)} \Omega(k), \quad (2)$$

przy czym parametry p_m i q_m charakteryzują model odniesienia (p. Spis oznaczeń).

Ponieważ nie zostały nałożone żadne ograniczenia na wartości wzmocnień członów proporcjonalnych, można przyjąć $K_1 = 1$, $K_2 = 0$, $K_3 = 1/q_m$. Porównanie wzorów (1) i (2) przy powyższym założeniu wykazuje, że przy

$$V_{ad}(k) = \frac{q_m - \hat{q}(k)}{\hat{q}(k)} V_m(k) + \left[\frac{p_m - \hat{p}(k)}{\hat{q}(k)} - \frac{1}{q_m} \right] \Omega(k) \quad (3)$$

systemy pokazane na rys. 1 i rys. 2 są równoważne.

2. Projektowanie napędowych systemów adaptacyjnych

Przy projektowaniu systemów AMFC przyjmuje się zwykle, że model odniesienia jest członem inercyjnym 1. rzędu, ponieważ mając do czynienia tylko z jedną stałą czasową, można w sposób prosty i jasny określić wymagania stawiane dynamice projektowanego systemu,

Przemysłowe systemy napędowe są opisywane najczęściej transmitancjami 4. lub 5. rzędu ([4], [6]). Sam silnik prądu stałego natomiast bywa zwykle opisywany transmitancją 2. rzędu. W przypadku, gdy indukcyjność twornika L_a jest pomijalnie mała

$$T_a \approx 0$$

można przyjąć z dużym przybliżeniem, że silnik stanowi człon 1. rzędu. Jeśli tak opisany silnik sterowany bezpośrednio za pomocą siły elektromotorycznej pracuje w układzie adaptacyjnym ze śledzeniem modelu ([2], [3], [5]) to mówi się o dynamice modelowanej, ponieważ model silnika ma odpowiednik tego samego rzędu w modelu odniesienia. We wszystkich pozostałych przypadkach mamy do czynienia z dynamiką niemodelowaną obiektu to znaczy taką, która nie ma jednoznacznego odpowiednika w modelu odniesienia.

Wpływ dynamiki niemodelowanej na pracę systemu w procesie adaptacji może być zbadany tylko drogą symulacji komputerowej lub eksperymentów fizycznych. Natomiast badania analityczne są niewykonalne.

Parametrem, który ulega największym zmianom podczas pracy systemu i którego wartość jest trudna do dokładnego określenia jest moment bezwładności związany z przenoszonym

obciążeniem. Wpływa on w istotny sposób na wartość parametru ([4],[6]) zwanego w przybliżeniu zastępczą stałą czasową ([4], [6]) systemu regulacji prędkości. Stała ta, wyrażona dla systemów wyższych rzędów (rys. 3) wzorem

$$T_{cs} = \frac{k_{if}J}{k_n k_{\Omega} k_i} \quad (4)$$

pozwała na zorientowanie się, jaką należy przyjąć stałą czasową modelu odniesienia, tak aby system adaptacyjny miał możliwość uzyskania takiej dynamiki, jaka model odniesienia.

3. Przebieg symulacji dla systemów wyższych rzędów

Badania symulacyjne procesu adaptacji przeprowadzono zarówno dla silnika sterowanego bezpośrednio siłą elektromotoryczną ([2], [3], [5]), jak i dla przemysłowego systemu napędowego ([4], [6]). Z praktycznego punktu widzenia istotniejsze jest zbadanie zachowania się systemu przemysłowego, jednakże badanie przebiegów procesu adaptacji w uproszczonym modelu pozwala lepiej wczuć się w zagadnienie, ponieważ jak wykazano w [6] uproszczony model adaptacyjny sterowany siłą elektromotoryczną stanowi dobrą aproksymację systemów wyższych rzędów.

Bez względu na rząd rozpatrywanego systemu przyjęto następujący tok postępowania:

- opisano obiekt regulacji, tj. niedaptacyjny system regulacji prędkości, równaniami stanu z czasem ciągłym,
- przekształcono opis do postaci transmitancyjnej i uproszczono do członu inercyjnego 1. rzędu,
- przekształcono równania stanu systemu o działaniu ciągłym na odpowiednie równania stanu systemu o działaniu dyskretnym i uproszczono je do jednego równania różnicowego,
- przeprowadzono symulację systemu nieadaptacyjnego opisanego równaniami stanu z czasem ciągłym i dyskretnym,
- przeprowadzono symulację systemu adaptacyjnego dla następujących przypadków:
 - badanie przebiegu sygnałów w odpowiedzi na skok sygnału zadającego dla różnych wartości momentu bezwładności,
 - badanie przebiegu sygnałów w odpowiedzi na skok momentu obciążenia dla różnych wartości momentu bezwładności,
 - badanie przebiegu sygnałów w odpowiedzi na skok momentu obciążenia przy odłączonym mechanizmie adaptacji.

Ze względu na stosowanie algorytmu komputerowego, badano mechanizm dyskretny adaptacji, a więc otrzymane wyniki odnoszą się bezpośrednio raczej do systemów dyskretnych, choć równoważne im systemy o działaniu ciągłym powinny zachowywać się w podobny sposób.

W przemysłowych systemach napędowych (rys. 3) najczęściej stosuje się dwie pętle regulacyjne:

- pętlę regulacji prędkości obrotowej,
- podporządkowaną pętlę regulacji prądu.

W obu pętlach stosuje się regulatory PI, przy czym regulator prędkości zawiera na wejściu filtr opóźniający, zastosowany tu w celu ograniczenia wpływu zakłóceń oraz złagodzenia odpowiedzi dynamicznej na skok sygnału zadawania prędkości.

Tak skonstruowany system napędowy może być opisany transmitancją 5. rzędu. Transmitancja otwartej pętli regulacji prędkości będzie miała postać [4]

$$\frac{\Omega(s)}{e_{\Omega}(s)} = \frac{k_{\Omega} k_{\Omega f} R_a (1 + sT_i)(1 + sT_{\Omega})}{k_i k_e s^2 T_{\Omega} T_c (1 + sT_r')(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \quad (5)$$

Przebiegi linii pierwiastkowych dla tego systemu pokazano na rys. 4.

Parametry regulatora prądu są zwykle dobierane tak, aby bieguny pętli prądowej leżały daleko od początku układu współrzędnych i wywierały znikomą wpływ na dynamikę systemu, zatem można założyć $sT_1 \ll 1$ oraz $sT_2 \ll 1$, również $sT_r' \ll 1$. Można również przyjąć z pewnym przybliżeniem $T_i \ll T_{\Omega}$ i $T_i \ll T_{cs}$. Założenia te pozwalają na uproszczenie transmitancji zamkniętego systemu regulacji prędkości (rys. 3) do członu 2. rzędu

$$\frac{\Omega(s)}{V_r(s)} = \frac{1 + sT_{\Omega}}{k_{\Omega f}(1 + sT_{\Omega} + s^2 T_{\Omega} T_{cs})} \quad (6)$$

Przy dużych wartościach T_{Ω} można założyć, że $sT_{\Omega} \gg 1$, a zatem

$$\frac{\Omega(s)}{V_r(s)} = \frac{1}{k_{\Omega f}(1 + sT_{cs})}, \quad (7)$$

co umożliwia z dużym przybliżeniem zastąpienie transmitancji 5. rzędu członem inercyjnym 1. rzędu o zastępczej stałej czasowej T_{cs} .

Zastępcze równanie stanu systemu nieadaptacyjnego o działaniu ciągłym przyjmuje zatem postać

$$\dot{\Omega}(t) = -\frac{1}{T_{cs}}\Omega(t) + \frac{1}{T_{cs}k_{\Omega f}}V_r(t), \quad (8)$$

a odpowiadające mu równanie systemu o działaniu dyskretnym

$$\Omega(k+1) = p\Omega(k) + qV_r(k). \quad (9)$$

Ponieważ zgodnie z (4) parametr T_{cs} w (7), (8) i (9) zależy od warunków pracy silnika, a w szczególności od momentu bezwładności obciążenia, który często jest nieznan, głównym

zadaniem mechanizmu adaptacji będzie zapewnienie prawidłowego działania systemu przy różnych warunkach pracy, pomimo, że parametr T_{cs} został wyznaczony w sposób uproszczony w trakcie projektowania systemu i podczas jego pracy może ulegać dalszym zmianom.

Szczegółowe wyprowadzenie algorytmu adaptacji zapewniającego takie dostrajanie parametrów $\hat{p}(k)$ i $\hat{q}(k)$ (rys. 2), aby uchyb systemu adaptacyjnego osiągał wartość 0 w trakcie pracy, zostały podane w artykułach ([4] i [6]).

Badania systemu adaptacyjnego (rys. 1), w którym obiektem regulacji jest przemysłowy napędowy system prądu stałego z automatyczną regulacją prędkości (rys. 3) przeprowadzono dla następujących danych:

1. Dane silnika:

typ DKF - K7707, seria 5680;

napięcie znamionowe: 107 V;

moment znamionowy: 7.4 N·m;

prąd znamionowy: 8.7 A;

prędkość obrotowa znamionowa: 125.66 rad/s;

$R_a = 0.93 \Omega$; $L_a = 4.185 \text{ mH}$; $k_s = 0.85 \text{ (V}\cdot\text{s)/rad}$; $k_t = 0.85 \text{ (N}\cdot\text{m)/A}$;

$J_m = 0.012 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; $k_s = 12 \text{ V/V}$;

2. Dane pętli regulacji prądu:

$k_{ij} = 0.333 \text{ V/A}$; $k_i = 4.3137$; $T_i = 1.122 \text{ ms}$;

3. Dane pętli regulacji prędkości obrotowej:

$k_{\Omega} = 0.0796 \text{ (V}\cdot\text{s)/rad}$; $k_{\Omega} = 5$; $T_{\Omega} = 55 \text{ ms}$;

4. Dane modelu:

$K_m = 12.566 \text{ rad/(V}\cdot\text{s)}$; $T_m = 15 \text{ ms}$; $T = 3.33 \text{ ms}$.

5. Dane algorytmu adaptacji

$K_p = 1 \text{ s}^2/\text{rad}^2$; $K_q = 200 \text{ V}^{-2}$; $T_{cs} = 23.6 \text{ ms}$ dla $J = 2J_m$.

Powyższe dane odpowiadają parametrom systemu napędowego stosowanego w napędach robotów przemysłowych.

4. Wnioski

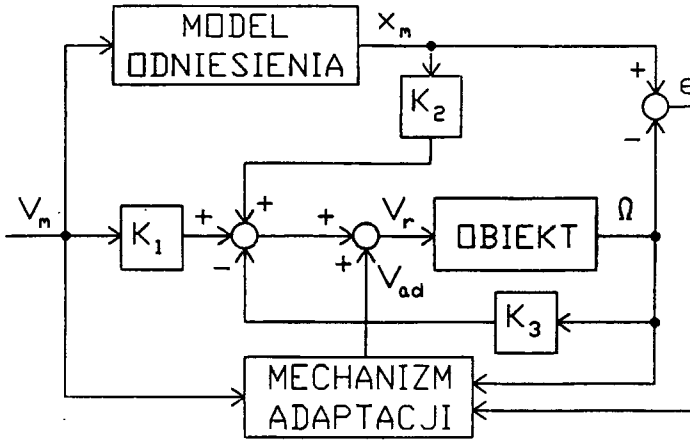
Przykładowe przebiegi dynamiczne charakteryzujące działanie systemu adaptacyjnego zostały przedstawione na rys. 5 i 6. Porównanie przebiegów dynamicznych dla systemów nieadaptacyjnych i adaptacyjnych ([4] i [6]) wykazuje znaczną poprawę jakości działania systemu przy zastosowaniu mechanizmu adaptacji. Poprawa ta polega m.in. na:

- skróceniu czasu trwania odpowiedzi na skok sygnału zadającego, szczególnie dla dużych wartości momentu bezwładności,
- zmniejszeniu maksymalnego spadku prędkości obrotowej przy skoku momentu obciążenia.

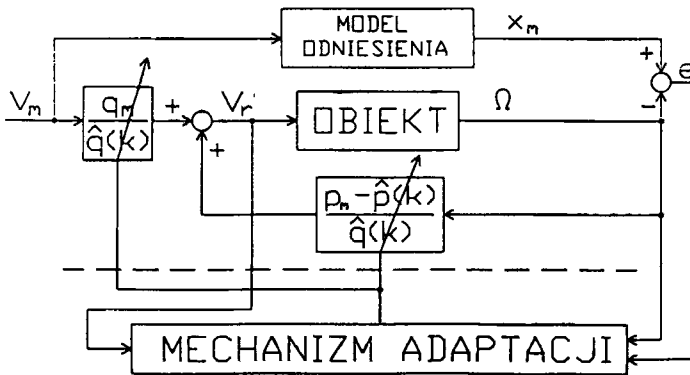
Gdy mechanizm adaptacji zostanie odłączony system zaczyna działać tak, jakby miał dodatkową pętlę sprzężenia zwrotnego proporcjonalnego. Przebiegi odpowiedzi na skok momentu obciążenia ulegają wówczas znacznemu spowolnieniu ([4] i [6]).

Cytowana literatura

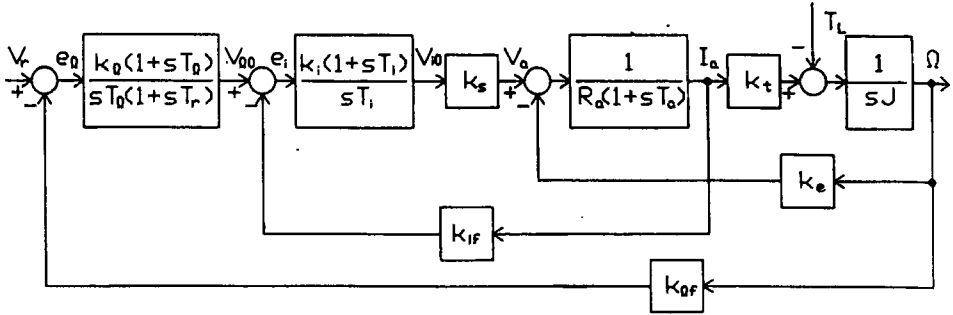
- [1] Y. D. Landau, "Adaptive Control. The Model Reference Approach", New York, NY: Marcel Dekker, 1979.
- [2] M. Nieniewski, "On Equivalence of Discrete-time Adaptive Model Following Control (AMFC) System and Model Reference Adaptive Systems MRAS)", *Prace Instytutu Elektrotechniki*, z. 165, 1991, str. 5-20.
- [3] M. Nieniewski, M. Kosicka, "How AMFC Improves DC Motor Dynamics", *Proc. of the AMSE Internat. Conf. on Appl. of Signals, Data, Systems Methodol. to Eng. Probl.*, Alexandria, grudzień 1992, t.1, str.121-123.
- [4] M. Nieniewski, M. Kosicka, "AMFC of the DC Motor Speed," *Proc. of the IEEE Internat. Conf. Industrial Electronics*, Budapest, czerwiec 1993, str. 379-384.
- [5] M. Nieniewski, M. Kosicka, "A Simplified Simulation of the dc Motor with Adaptive Model Following Control", *Prace Instytutu Elektrotechniki* (artykuł przyjęty do druku).
- [6] M. Nieniewski, M. Kosicka, "Unmodelled Dynamics in the AMFC System of the DC Motor Speed" (artykuł zgłoszony do druku).



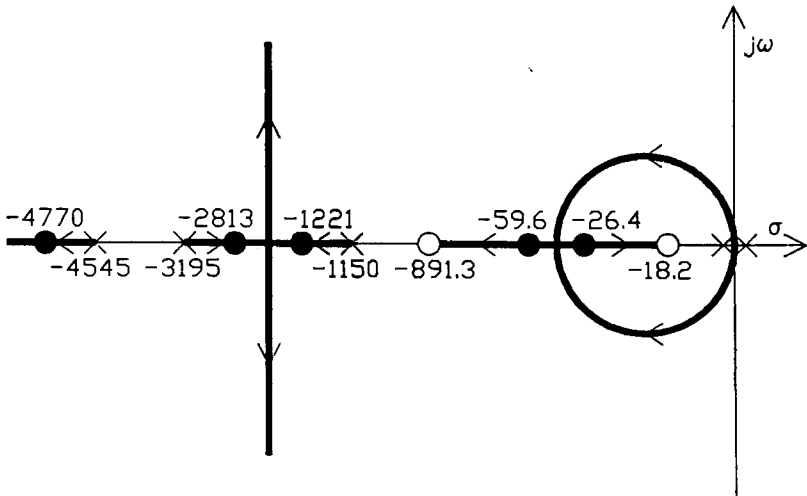
Rys. 1. Schemat koncepcyjny systemu adaptacyjnego ze śledzeniem modelu (AMFC).



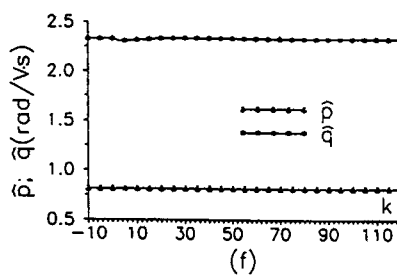
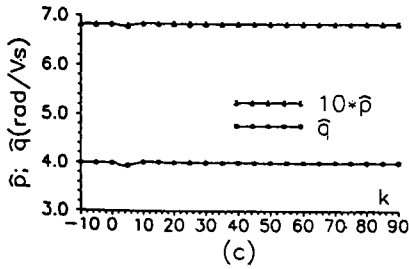
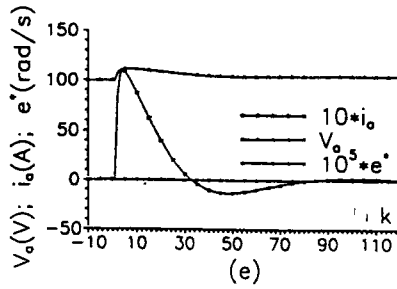
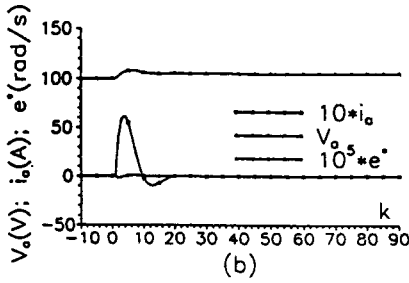
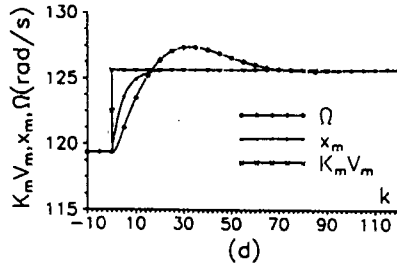
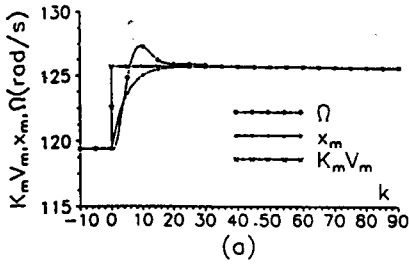
Rys. 2. Schemat blokowy napędowego systemu adaptacyjnego ze śledzeniem modelu.



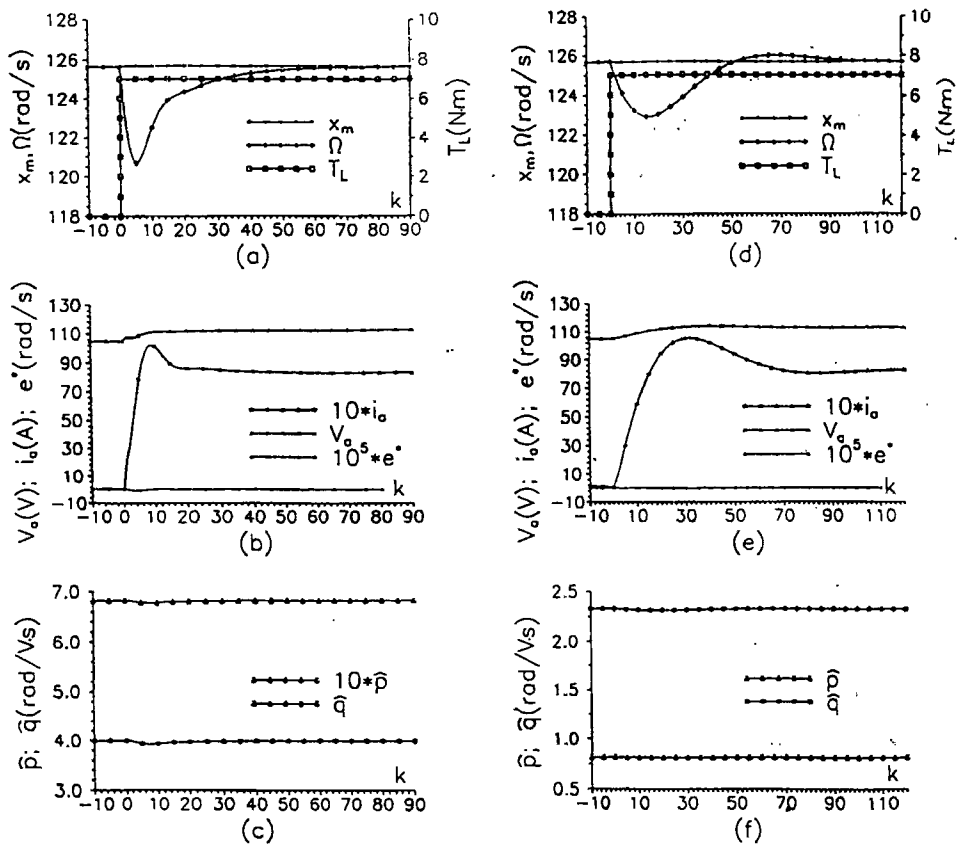
Rys. 3. Schemat blokowy przemysłowego nieadaptacyjnego regulacji prędkości silnika prądu stałego opisanego transmitancją 5. rzędu.



Rys. 4. Orientacyjny przebieg linii pierwiastkowych dla układu regulacji prędkości z rys. 3. Zaznaczony rozkład pierwiastków odpowiada danym z rozdz.3 przy $J = J_m$.



Rys. 5. Odpowiedź systemu adaptacyjnego 5. rzędu na skok sygnału wejściowego modelu $\Delta V_m = 0.5 \text{ V}$; $T_L = 0$. (a)-(c) $J = J_m$. (d)-(f) $J = 5J_m$.



Rys. 6. Odpowiedź systemu adaptacyjnego 5. rzędu na skok momentu obciążenia $\Delta T_L = 7 \text{ N}\cdot\text{m}$; $V_m = 10 \text{ V}$. (a)-(c) $J = J_m$. (d)-(f) $J = 5J_m$.