INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI STOSOWANEJ WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH POLITECHNIKA WARSZAWSKA





Piotr M. Marusak

STEROWANIE SILNIE NIELINIOWEGO OBIEKTU ELEKTROMECHANICZNEGO

(Praca dyplomowa magisterska)

Opiekun naukowy pracy: Doc. dr inż. Jerzy PUŁACZEWSKI

Ocena:

Podpis Przewodniczącego Komisji Egzaminu Dyplomowego Imię i nazwisko: Data urodzenia: Data rozpoczęcia studiów: Specjalność: Piotr Marusak 1 stycznia 1974 r. 1 października 1992 r. Systemy sterowania i wspomagania decyzji

ŻYCIORYS

Urodziłem się dnia 1 stycznia 1974 r. w Warszawie.

Do szkoły podstawowej uczęszczałem w Warszawie, w latach 1980-1988.

W latach 1988–1992 kontynuowałem naukę w klasie o profilu matematycznym eksperymentalnym w XIV Liceum Ogólnokształcącym im. St. Staszica w Warszawie. W 1992 roku uzyskałem świadectwo dojrzałości z wyróżnieniem, a także tytuł kandydata do zawodów finałowych XLIII Olimpiady Matematycznej.

W 1992 r. rozpocząłem studia na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej.

Dotychczas jestem współautorem trzech publikacji naukowych.

| Egzamin dyplomowy złożył dnia: | |
|------------------------------------|--|
| z wynikiem: | |
| Ogólny wynik studiów: | |
| Dodatkowe uwagi i wnioski Komisji: | |
| | |
| | |
| | |

Spis treści

| 1. Wstęp | 4 |
|---|----|
| 1.1. Wprowadzenie | 4 |
| 1.2. Projektowany układ sterowania | 4 |
| 1.3. Obiekt regulacji | 5 |
| 1.4. Regulatory | 6 |
| 2. Identyfikacja obiektu sterowania | 7 |
| 2.1. Model analityczny badanego obiektu | 7 |
| 2.2. Identyfikacja metodą regulacji dwupołożeniowej | 9 |
| 2.3. Opracowanie modelu Takagi — Sugeno | |
| 2.4. Weryfikacja, dopasowanie i testowanie rozmytego modelu obiektu | 14 |
| 3. Synteza układu regulacji | 16 |
| 3.1. Układ regulacji położenia wózka z regulatorem regułowym | |
| ze sprzężeniem od stanu obiektu | 16 |
| 3.2. Projektowanie regulatora dla podmodeli w rozmytym modelu silnika | 19 |
| 3.3. Modyfikacja funkcji przynależności dla prądu przy wyborze | |
| regulatorów lokalnych — powód i sposób zmiany | 21 |
| 3.4. Układ regulacji położenia wózka z regulatorem regułowym | 22 |
| ze sprzęzeniem od stanu obserwowanego | |
| 3.5. Projektowalile regulatora PID | |
| 3.7 Modyfikacia układu regulacji z regulatorem PID | |
| 3.8. Badania wrażliwości zaprojektowanych układów regulacji na zmiany | |
| masy wózka silnika | |
| 4. Symulator obiektu | |
| 4.1. Koncencia symulatora numerycznego | 45 |
| 4.2. Wsteppe informacie o programie | |
| 4.3. Obsługa programu | |
| 5. Symulator urządzenia sterującego | |
| 5.1. Wsteppe informacie o programie symulatora | 56 |
| 5.2 Obshiga programu | |
| 6 Badanie działania zespołu symulatorów na dwóch komputerach | 59 |
| | |
| 6.1. Opis konfiguracji komputerow tworzących stanowisko laboratoryjne | |
| 6.2. Roznice między symulacją układu sterowania na jednym komputerze i w zestawie dwukomputerowym | 60 |
| 6.3 Możliwość dalszego wykorzystania zestawu | |
| | |
| 7. Podsumowanie wyników badań i wnioski | |
| 8. Dodatki | 67 |
| 8.1. Dobieranie skali czasu w symulatorach | 67 |
| 8.2. Odpowiedzi na sygnał narastający liniowo (typu RAMP) | 69 |
| 8.3. Opis tarcia | 71 |
| 9. Bibliografia | 72 |

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

W laboratorium Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej znajduje się silnik o ruchu prostoliniowym. W czasie wykonywania tej pracy był on w fazie uruchamiania, a badania prowadzone były wielotorowo. Celem pracy była synteza regulatora położenia wózka silnika oraz opracowanie symulatorów programowych obiektu i urządzenia sterującego, pracujących na oddzielnych komputerach. Do tego celu wykorzystano model silnika, opisujący w sposób jakościowy zjawiska fizyczne występujące w nim. Przedstawiono różne typy układów regulacji położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym (z bezpośrednim sprzężeniem od stanu, ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem oraz układ sterowania z regulatorem PID) wraz z ich porównaniem. Opisano również problemy, jakie wystąpiły podczas projektowania wymienionych układów sterowania. Przedstawiono także sposoby rozwiązania tych problemów.

1.2. Projektowany układ sterowania

W ramach niniejszej pracy badano układy sterowania położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym, z bezpośrednim sprzężeniem od stanu oraz ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem. Na rys. 1.1 pokazano badany układ regulacji z bezpośrednim sprzężeniem od stanu.



Rys. 1.1. Model układu regulacji położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym; x — położenie wózka, v — prędkość wózka, i — prąd płynący w tworniku, x_{zad} — zadana wartość położenia, z — zakłócenie

Podczas badań przyjęto, że obiekt regulacji jest sterowany napięciem twornika przy założeniu stałości prądu wzbudzenia.

1.3. Obiekt regulacji

Obiektem sterowania jest silnik o ruchu prostoliniowym. Składa się on ze stojana, którego pole magnetyczne wytwarzają dwie nieruchome zwojnice zasilane prądem stałym, oraz z cewki ruchomej, umieszczonej w polu magnetycznym stojana, przytwierdzonej do wózka i poruszającej się wraz z nim. Położenie *x* wózka, może zmieniać się w przedziale [0; 1].



Rys. 1.2. Ogólny schemat blokowy silnika o ruchu prostoliniowym; x — położenie wózka na bieżni, v — prędkość wózka, F_e — siła elektromagnetyczna, u — napięcie zasilające ruchomą cewkę

W części elektromagnetycznej silnika występują dwie silne nieliniowości. Wynikają one z nierównomiernego rozkładu pola magnetycznego w szczelinie stojana. Pierwsza nieliniowość dotyczy siły elektromagnetycznej F_e działającej na ruchomą cewkę. Siła ta zależy zarówno od położenia x(t) cewki ruchomej na bieżni, jak też od prądu i(t) płynącego przez jej uzwojenie. Należy zauważyć, że zależność $F_e(x,i)$ jest niejednoznaczna (rys. 1.3). Druga nieliniowość związana jest z indukowaniem się siły elektromotorycznej w ruchomej zwojnicy w zależności nie tylko od jej prędkości, ale również od położenia [1].



Rys. 1.3. Przybliżona zależność siły napędzającej wózek silnika od położenia x(t) wózka na bieżni i znaku prądu i(t) w cewce twornika, przy stałej wartości prądu (|i| = const)

1.4. Regulatory

Podczas prowadzonych eksperymentów opracowano i zbadano układy regulacji z bezpośrednim sprzężeniem od stanu oraz ze sprzężeniem od stanu obserwowanego. Do ich projektowania wykorzystano metodę miejsc geometrycznych pierwiastków (procedura *place* z pakietu *Matlab*) i badania symulacyjne — na podstawie otrzymywanych wyników decydowano o ewentualnych dalszych modyfikacjach.

Przeprowadzono również porównanie działania opracowanych układów regulacji z układem sterowania z regulatorem PID. Brano przy tym pod uwagę wpływ zakłócenia wchodzącego na wejście obiektu oraz wpływ zmian parametrów obiektu, na jakość regulacji.

2. Identyfikacja obiektu sterowania

2.1. Model analityczny badanego obiektu

Model jakościowy omawianego silnika opracowano z uwzględnieniem występujących w nim silnych nieliniowości wymienionych wyżej oraz tarcia coulombowskiego F_{tc} . Na rys. 2.1 przedstawiono schemat blokowy omawianego modelu silnika (opracowany na podstawie [1]). Podwójną ramką oznaczono bloki nieliniowe.



Rys. 2.1. Schemat blokowy silnika o ruchu prostoliniowym

$$D$$
 — operator różniczkowania względem czasu; $D = \frac{d}{dt}$

- *u* napięcie zasilające zwojnicę ruchomą,
- v prędkość wózka,
- *i* prąd płynący w zwojnicy ruchomej,
- *m* masa zwojnicy ruchomej i wózka,
- *K_t* współczynnik tarcia prędkościowego,
- F_{tc} siła tarcia coulombowskiego,
- L indukcyjność cewki ruchomej,
- R opór cewki ruchomej,
- K_m współczynnik zależny od położenia zwojnicy ruchomej i od prądu w niej płynącego, opisany wzorem (2.1)
- K_e współczynnik zależny od położenia wózka, opisany wzorem (2.2)

W modelu przyjęto uproszczony wzór na siłę elektromagnetyczną:

$$F_{e}(t) = K_{m} \cdot i(t),$$

$$K_{m} = A\left\{ \left[1 + \operatorname{sgn}(i(t)) \right] \cdot \left[1 - (1 - B) \cdot x(t) \right] + \left[1 - \operatorname{sgn}(i(t)) \right] \cdot \left[B + (1 - B) \cdot x(t) \right] \right\}, \quad (2.1)$$

gdzie A, B — stałe współczynniki.

Zjawisko indukowania się siły elektromotorycznej jest opisane następującym wzorem:

$$s(t) = K_e \cdot v(t),$$

$$K_e = C \cdot (x(t) - 0.5)^2 + E,$$
(2.2)

gdzie C, E — stałe współczynniki.

Równania różnicowe powyższego modelu mają następującą postać:

$$w_{k} = u_{k} - s_{k}$$

$$i_{k} = a_{1} \cdot i_{k-1} + a_{3} \cdot w_{k}$$

$$F_{k} = a_{4} \cdot i_{k} \left\{ \left[1 + \operatorname{sgn}(i_{k}) \right] \cdot \left[1 - (1 - a_{5}) \cdot x_{k} \right] + \left[1 - \operatorname{sgn}(i_{k}) \right] \cdot \left[a_{5} + (1 - a_{5}) \cdot x_{k} \right] \right\} - F_{ic}(v_{k})$$

$$v_{k} = a_{2} \cdot v_{k-1} + a_{8} \cdot F_{k}$$

$$s_{k} = \left[a_{6} \cdot (x_{k} - 0.5)^{2} + a_{7} \right] \cdot v_{k}$$

$$x_{k} = x_{k-1} + T_{p} \cdot v_{k}$$

Do dalszych badań przyjęto następujące parametry:

$$a_1 = 0,5$$
 $a_3 = 0,5$ $a_5 = 0,25$ $a_7 = 0,125$ $a_2 = 0,8$ $a_4 = 2,0$ $a_6 = 2,0$ $a_8 = 0,1$

oraz okres próbkowania $T_p = 0,01$ s.

2.2. Identyfikacja metodą regulacji dwupołożeniowej

Następnym etapem pracy było przeprowadzenie badań symulacyjnych układu regulacji dwupołożeniowej położenia wózka na bieżni przy użyciu programu *Simulink*. Strukturę badanego układu sterowania przedstawiono na rys. 2.2. Przyjęto okres próbkowania $T_p = 0,01$ s. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów, pokazano na rys. 2.3 — 2.4.





Rys. 2.2. Układ regulacji dwupołożeniowej położenia wózka

Rys. 2.3. Przebiegi w układzie regulacji przekaźnikowej przy: a) $x_{zad} = 0,2$; b) $x_{zad} = 0,8$; c) $x_{zad} = 0,4$; d) $x_{zad} = 0,6$

W układzie zastosowano przekaźnik dwupołożeniowy z histerezą ze względu na potrzebę uzyskania przebiegów o amplitudach dostatecznie dużych do celów identyfikacji, a także ze względu na fakt, że idealnych przekaźników w rzeczywistości nie ma.

Cechą charakterystyczną przebiegów przedstawionych na rysunkach jest ich symetria wynikająca z symetrii nieliniowości występujących w obiekcie. Przy wartości zadanej $x_{zad} = 0,2$ (rys. 2.3*a*), wolniejszemu ruchowi wózka w lewo odpowiada wolniejszy ruch wózka w prawo przy $x_{zad} = 0,8$ (rys. 2.3*b*) i odwrotnie. Ponadto czas, kiedy sterowanie u = 1, przy wartości zadanej $x_{zad} = 0,2$ jest taki sam, jak czas, kiedy sterowanie u = -1, przy wartości zadanej $x_{zad} = 0,8$. Podobne prawidłowości można zauważyć na rys. 2.3*c* i 2.3*d* przy $x_{zad} = 0,4$ i $x_{zad} = 0,6$.



Rys. 2.4. Regulacja przekaźnikowa przy $x_{zad} = 0,5$ model obiektu: a) z tarciem coulombowskim; b) bez tarcia coulombowskiego

Warto również zwrócić uwagę na zmiany, jakie przyniosło dodanie do modelu opisanego w [1], modelu tarcia coulombowskiego (odpowiednie wykresy zostały przedstawione na rys. 2.4). Przebieg prędkości (rys. 2.4*a*) zmienia nachylenie przy przechodzeniu przez zero. Zjawisko to jest związane z dodaniem do modelu [1] siły tarcia coulombowskiego. Przypuśćmy, że wózek jedzie w prawo. Po zmianie znaku prądu płynącego w tworniku, a co za tym idzie zmianie zwrotu siły napędzającej, wózek zacznie jechać w lewo z pewnym opóźnieniem, ponieważ najpierw musi on wyhamować. Tarcie coulombowskie pomaga w hamowaniu wózka, lecz spowalnia jego rozpędzanie i dlatego prędkość szybciej maleje (co do modułu) niż wzrasta. Na wykresie zjawisko to przejawia się w postaci zmniejszenia nachylenia przebiegu prędkości po przejściu przez zero. Wprowadzenie tarcia coulombowskiego (rys. 2.4a) spowodowało również:

 zmniejszenie amplitudy prędkości, co jest wynikiem tego, że siła wypadkowa rozpędzająca wózek jest mniejsza.

 wydłużenie okresu przełączeń przekaźnika, ponieważ przy wolniej narastającej prędkości wózek dłużej dochodzi do zadanego położenia.

 zmniejszenie amplitudy prędkości, które powoduje zmniejszenie siły elektromotorycznej indukującej się w ruchomej cewce, a to z kolei wpływa na zmniejszenie przeregulowań prądu.

Postać przebiegów przejściowych uzyskanych w wyniku symulacji regulacji dwupołożeniowej wskazuje na możliwość wykorzystania ich do identyfikacji zależności dynamicznych wiążących prędkość wózka v(t) z sygnałem sterującym u(t). W oparciu o dane uzyskane z poszczególnych przebiegów, obliczono współczynniki modeli z układów dwudziestu równań z czterema niewiadomymi (współczynniki c_1 , c_2 , c_3 , c_4). Zastosowano do tego celu działanie *left division* z pakietu *Matlab*.

$$\begin{bmatrix} v_{k-1} & v_{k-2} & u_{k-1} & u_{k-2} \\ v_{k-2} & v_{k-3} & u_{k-2} & u_{k-3} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_k \\ v_{k-1} \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$$
(2.3)

Każdy z czterech modeli ma następującą postać:

$$v_k = c_1 \cdot v_{k-1} + c_2 \cdot v_{k-2} + c_3 \cdot u_{k-1} + c_4 \cdot u_{k-2}$$
(2.4)

Najpierw dokonano identyfikacji na podstawie wykresu malenia prędkości v(t) (rys. 2.3*a*). Po rozwiązaniu układu równań (2.3) otrzymano, zamieszczone w tablicy 2.1, szukane wartości współczynników c_1 , c_2 , c_3 , c_4 dla modelu 1. Podobnie postąpiono dla powiększającej się prędkości, uzyskując współczynniki dla modelu 2. Analogiczne obliczenia powtórzono dla przebiegów zamieszczonych na rys. 2.3*c* otrzymując modele 3 i 4.

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
| c_1 | 0,9287 | 0,1723 | 0,2069 | 0,7220 |
| c_2 | -0,2586 | 0,4037 | 0,4117 | -0,0670 |
| C ₃ | 0,0796 | 0,3376 | 0,2830 | 0,1751 |
| C 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tablica 2.1. Wartości współczynników we wzorze (2.4) dla poszczególnych modeli

Tak uzyskane modele posłużyły następnie do opracowania modelu Takagi—Sugeno silnika liniowego. Warto zwrócić uwagę na przydatność regulacji dwupołożeniowej położenia wózka do identyfikacji badanego obiektu. Zastosowanie innej metody mogłoby być kłopotliwe i nie przynieść zadowalających rezultatów.

2.3. Opracowanie modelu Takagi — Sugeno

Korzystając z wyników obliczeń przedstawionych powyżej, opracowano rozmyty model regułowy badanego obiektu. Kształt przyjętych funkcji przynależności pokazano na rys. 2.5. Każdy z modeli jest wykorzystywany dwukrotnie ze względu na symetrię występującą w obiekcie.



Rys. 2.5. Podział na modele

W otrzymanym modelu regułowym, prędkość liczy się jako sumę ważoną wyjść poszczególnych podmodeli, z których każdy ma postać (2.4). Zależność ta wyrażona jest wzorem (2.5). W przypadku przyjętych funkcji przynależności, niektóre wagi (dla pewnych wartości x) są równe 0, zaś suma wszystkich wag jest równa 1.

$$v_{k} = \sum_{m=1}^{4} n_{m} \cdot v_{k}^{m} , \qquad (2.5)$$

gdzie: v_k^m — prędkość w chwili k wyznaczona z m-tego podmodelu,

 v_k — wypadkowa prędkość całego modelu w chwili k,

 n_m — waga z jaką brane jest wyjście *m*-tego podmodelu.

Otrzymana ze wzoru (2.5) prędkość jest całkowana względem czasu, w wyniku czego otrzymuje się wielkość wyjściową x (położenie wózka w rozmytym modelu silnika liniowego). Sposób obliczania prędkości w modelu regułowym, opisuje poniższy przykład.

Przykład

Załóżmy, że w danej chwili prąd jest dodatni, a wózek znajduje się w położeniu:

a) $x_1 = 0,35$. Wówczas prędkość liczymy korzystając tylko z modelu 3 (waga $n_3 = 1$, zaś pozostałe wagi są równe 0).

b) $x_2 = 0,25$. Wówczas prędkość należy obliczyć korzystając z modeli 2 i 3, jako sumę ważoną (2.6).



Rys. 2.6. Sposób wyznaczania wag na podstawie funkcji przynależności

W przypadku funkcji przynależności z rys. 2.6, gdy wózek znajduje się w położeniu x_2 , $n_2 + n_3 = 1$, zaś pozostałe wagi (n_1 i n_4) są równe 0 (dlatego odpowiadające im wyrażenia nie zostały uwzględnione we wzorze (2.6)).

Z kształtu przyjętych funkcji przynależności wynika, że do obliczania prędkości wypadkowej przy danym położeniu *x*, w zaproponowanym modelu rozmytym mogą zostać wybrane najwyżej dwa podmodele. Funkcje przynależności dla prądu są prostokątne (nie są rozmyte), więc liczba rozpatrywanych w danej chwili modeli (wagi większe od 0) zależy jedynie od położenia, w którym znajduje się wózek (rys. 2.5).

2.4. Weryfikacja, dopasowanie i testowanie rozmytego modelu obiektu

Ważnym krokiem badań było porównanie modelu analitycznego przedstawionego w rozdz. 2 z modelem regułowym (rys. 2.7 - 2.8) i dokonanie poprawek modelu regułowego, mających na celu jak najlepsze dopasowanie go do modelu analitycznego. Rysunki 2.9 i 2.10 przedstawiają rezultaty porównania modeli po wprowadzeniu poprawek. Startowano z lewego skrajnego położenia, a wymuszenie dobrano w taki sposób aby wózek przebył cały zakres zmienności położenia *x* na bieżni.



Zmian parametrów dokonywano metodą modelu strojonego, przy założeniu modelu analitycznego jako wzorca. Poprawki wprowadzano w modelu, w którego obszarze działania różnica wyjścia przybliżonego modelu analitycznego i wyjścia modelu regułowego (rys. 2.8) zaczynała zauważalnie rosnąć (model 4, okolice punktu 0,6). W ten sposób dokonano weryfikacji wartości współczynników wzoru (2.4). Zmianie uległ jedynie współczynnik c_1 w modelu 4. Ostateczne wartości współczynników przedstawia tablica 2.2.

| Tablica 2.2. Zmienione wartości współczynników we wz | zorze (2.4) dla poszczególnych modeli |
|--|---------------------------------------|
|--|---------------------------------------|

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
| c_1 | 0,9287 | 0,1723 | 0,2069 | 0,95 |
| c_2 | -0,2586 | 0,4037 | 0,4117 | -0,0670 |
| C ₃ | 0,0796 | 0,3376 | 0,2830 | 0,1751 |
| c_4 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Wynik dopasowania modelu regułowego do modelu analitycznego przedstawia rys. 2.9. Wykres błędu dopasowania w zwiększonej skali pokazuje rys. 2.10.



Rys. 2.9. Porównanie modelu analitycznego (x) z regułowym (x_{mr}) po modyfikacji



Rys. 2.10. Różnica między wyjściem modelu analitycznego a wyjściem modelu regułowego

3. Synteza układu regulacji

3.1. Układ regulacji położenia wózka z regulatorem regułowym ze sprzężeniem od stanu obiektu

Podczas projektowania układu regulacji założono, że można mierzyć prąd w ruchomej zwojnicy, położenie wózka oraz prędkość, z jaką poruszają się wózek z ruchomą zwojnicą (wielkości te są dostępne). Model układu regulacji ze sprzężeniem od stanu obiektu, z regulatorem regułowym przedstawia rys. 3.1.



Rys. 3.1. Model układu regulacji położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym

Regulator regułowy zaprojektowano korzystając z regułowego modelu obiektu opracowanego w poprzednim rozdziale. Następnie przeprowadzono badania symulacyjne układu sterowania z rys. 3.1 z otrzymanym regulatorem i analitycznym modelem obiektu (na podstawie którego zbudowano model regułowy, który z kolei posłużył do doboru regulatora).

Schemat regulatora regulowego przedstawiono na rys. 3.2*a* i 3.2*b*. Każdemu blokowi modelu regulowego odpowiada jeden blok regulatora BL_r . Regulator składa się więc z czterech bloków, których wyjścia są sumowane — z wagą k_r każde, gdzie *r* jest numerem bloku dając wyjściowe sterowanie całego regulatora (rys. 3.2*a*).

Wejściami regulatora regułowego (rys. 3.2b) są:

- położenie x wózka na bieżni,
- prędkość wózka,
- prędkość wózka w poprzedniej chwili impulsowania,
- prąd i w ruchomej zwojnicy (używany jedynie do wyboru bloku obliczania wag k_r),
- wartość zadana *x*_{zad}.

Wejściami każdego bloku *BL_r* (rys. 3.2*a*) są:

- położenie x wózka na bieżni,
- prędkość wózka,
- prędkość wózka w poprzedniej chwili impulsowania,
- znak prądu sgn(i) (ponieważ funkcje przynależności dla prądu w przyjętym modelu rozmytym są prostokątne),
- całka uchybu regulacji.



Rys. 3.2. Regulator regulowy: a) schemat bloku; b) schemat regulatora

 $K_{w,r}$ — wzmocnienie na wejściu w, w bloku r,

 u_r — ważone wyjście bloku r,

 k_r — waga wyjścia bloku r.

Współczynniki wzmocnienia $K_{w,r}$ obliczono przy użyciu procedury *place* z pakietu *Matlab* [3], zakładając pożądane położenia biegunów układu zamkniętego $b_1, ..., b_4$ dla każdego podmodelu takie same i równe:

$$b_1 = 0.8 + 0.25 \cdot i$$
 $b_3 = 0.9$
 $b_4 = 0.7$

Otrzymane wartości współczynników wzmocnienia w regulatorze zawiera tablica 3.1.

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|
| K_1 | 3,8631 | 0,9108 | 1,0866 | 1,7561 |
| K_2 | 66,5829 | 15,6991 | 18,7279 | 30,2684 |
| K ₃ | 2,9384 | 2,6546 | 3,1951 | 2,4300 |
| K_4 | -3,4083 | -3,0441 | -3,5092 | -1,4278 |

Tablica 3.1. Wartości współczynników wzmocnienia w regulatorze regułowym I

Wyboru modeli regulatora dokonuje się tak samo, jak w przypadku regułowego modelu obiektu sterowania, co zostało dokładnie opisane w rozdz. 2. Każdy z modeli jest wykorzystywany w jednym bloku regulatora, a wybór modelu jest dokonywany analogicznie, jak w rozmytym modelu obiektu. Na przykład, model 1 jest brany z wagą 1, jeśli prąd w danej chwili jest dodatni, a wózek znajduje się w położeniu [0,9; 1] lub jeśli prąd w danej chwili jest ujemny, a wózek znajduje się w położeniu [0; 0,1] (rys. 2.5).

Dla regulatora I dobranego w sposób opisany wyżej, przeprowadzono badania symulacyjne, których wyniki przedstawiają rys. 3.3 — 3.5.



Rys. 3.3. Odpowiedź układu regulacji na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0,25$ (regulator I): a) przebiegi położenia, prędkości i prądu; b) sygnał położenia w powiększeniu





Rys. 3.4. Odpowiedź układu regulacji na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0,5$ (regulator I)

Rys. 3.5. Odpowiedź układu regulacji na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0,75$ (regulator I)

Przebiegi sygnałów są oscylacyjne, układ dochodzi do stanu ustalonego stosunkowo długo i w większości przypadków z wyraźnym przeregulowaniem rzędu 20 %.

3.2. Projektowanie regulatora dla podmodeli w rozmytym modelu silnika

Doboru regulatora regulowego dokonano przy założeniu, że model 1 w rozmytym modelu obiektu liczono na podstawie przebiegów uzyskanych podczas regulacji dwupołożeniowej przy $x_{zad} = 0.9$, a model 2 — przy $x_{zad} = 0.1$, tak, jak w rozdz. 2.2. Pozostałe modele przyjęto bez zmian. Współczynniki nowego modelu obiektu otrzymane tą metodą przedstawia tablica 3.2 (zmianie uległy jedynie modele 1 i 2).

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|
| c_1 | 1,1674 | 1,4142 | 0,2069 | 0,95 |
| c ₂ | -0,4313 | -0,5139 | 0,4117 | -0,0670 |
| c ₃ | 0,0287 | 0,0793 | 0,2830 | 0,1751 |
| C 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tablica 3.2. Wartości współczynników we wzorze (2.4) dla regułowego modelu obiektu II

Na podstawie tych nowych danych (tablica 3.2) zaprojektowano nowy regulator regułowy II w sposób analogiczny jak poprzednio. Obliczone współczynniki sprzężenia od stanu dla regulatora II przedstawiono w tablicy 3.3, a wyniki badań symulacyjnych układu sterowania z regulatorem II zamieszczono na rysunkach 3.6 — 3.8.

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|----------------|----------|---------|---------|---------|
| K_1 | 10,7143 | 3,8777 | 1,0866 | 1,7561 |
| K ₂ | 184,6690 | 66,8348 | 18,7279 | 30,2684 |
| K ₃ | 2,1324 | -0,2699 | 3,1951 | 2,4300 |
| K_4 | -1,1359 | 2,7011 | -3,5092 | -1,4278 |

Tablica 3.3. Wartości współczynników wzmocnienia w regulatorze regułowym II



Rys. 3.6. Odpowiedź układu sterowania z regulatorem II na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0,25$: a) przebiegi położenia, prędkości i prądu; b) powiększenie rys. 3.6*a*





Rys. 3.7. Odpowiedź układu sterowania z regulatorem II na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0.5$

Rys. 3.8. Odpowiedź układu sterowania z regulatorem II na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0,75$

Porównanie wyników badań symulacyjnych układu z regulatorem I i układu z regulatorem II (porównanie rys. 3.3 z rys. 3.6) natychmiast nasuwa konkluzję, że dobór punktu przyjmowanego jako reprezentatywny dla danego obszaru przynależności jest niezwykle istotny i wpływa znacząco na otrzymywane później wyniki symulacji. Charakter przebiegów uzyskanych przy zastosowaniu regulatora II w układzie sterowania, jest inny. Na początku można zaobserwować gwałtowne zmiany prądu oraz prędkości. Układ regulacji działa jednak szybciej, a przeregulowanie widać dopiero na przebiegu powiększonym — rys. 3.6*b* (skala rysunków 3.3 i 3.6 jest taka sama). W układzie regulacji z regulatorem I maksymalna wartość sterowania jest mniejsza (przy $x_{zad} = 0,5$ wynosi ok. 4 V) niż w układzie z regulatorem II (przy $x_{zad} = 0,5$ — ok. 5,6 V).

3.3. Modyfikacja funkcji przynależności dla prądu przy wyborze regulatorów lokalnych — powód i sposób zmiany

Kolejny eksperyment polegał na wprowadzeniu skokowego zakłócenia $z_o = 1(t-5)$ działającego na wejście obiektu. W trakcie badań okazało się konieczne wprowadzenie poprawki do rozmytych regulatorów regułowych. Spowodowane to było pojawieniem się oscylacji w uzyskanych odpowiedziach. Na rys. 3.9 pokazano przebiegi otrzymane w układzie sterowania z regulatorem rozmytym i ze sprzężeniem od stanu po wprowadzeniu skoku zakłócenia na wejście obiektu w chwili t = 5 s. O wyborze reguł rozmycia w regulatorze decydował znak prądu i(k), co było równoznaczne z prostokątnymi ("ostrymi") funkcjami przynależności).



Rys. 3.9. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem II na skok zakłócenia, $x_{zad} = 0,2$: a) przebieg położenia; b) przebieg sygnału sterującego na tle sygnału położenia



Rys. 3.10. Zmieniony kształt funkcji przynależności dla prądu w regułowym modelu silnika

Sposobem na zlikwidowanie wspomnianych oscylacji okazało się rozmycie funkcji przynależności dla prądu, stosowanych przy wyborze bloków z modelami lokalnymi regulatora regułowego. Resztę modelu pozostawiono bez zmian. Nowe funkcje przynależności pokazuje rys. 3.10.

Po dokonaniu powyższej zmiany, uzyskano zadowalającą odpowiedź układu regulacji na skok zakłócenia na wejściu obiektu w chwili t = 5 s (rys. 3.11). Obiekt był sterowany regulatorem rozmytym, ze sprzężeniem od stanu, przy rozmytych funkcjach przynależności dla prądu i(k) (rys. 3.10) i przy $x_{zad} = 0,2$. Oscylacje zaobserwowane poprzednio (rys. 3.9) teraz nie występują. Były więc one związane z gwałtownym przełączaniem modeli, czego powodem były "ostre" (prostokątne) funkcje przynależności dla prądu.



Rys. 3.11. Odpowiedź układu regulacji z poprawionym regulatorem II na skok zakłócenia, $x_{zad} = 0,2$: a) przebieg położenia; b) przebieg sygnału sterującego na tle sygnału położenia

Powyższe wyniki (rys. 3.9 i rys. 3.11) świadczą o tym, jak ważny podczas projektowania modelu rozmytego jest problem podziału zmiennych na przedziały i dobór odpowiedniego kształtu funkcji przynależności. Różnica między przebiegami z rys. 3.9 i z rys. 3.11 jest za-sadnicza.

Konstrukcja modelu rozmytego wpłynęła w sposób znaczący na zachowanie się układu sterowania z regulatorem opracowanym na podstawie poprawionego modelu.

Pomimo trudności ze stosowaniem modeli Takagi—Sugeno wynikających z braku algorytmów podziału zmiennych na podprzedziały i doboru kształtu funkcji przynależności, warto zwrócić uwagę na dużą zaletę tych modeli, jaką jest możliwość modelowania bardzo skomplikowanych obiektów przy użyciu stosunkowo prostych zależności.

3.4. Układ regulacji położenia wózka z regulatorem regułowym ze sprzężeniem od stanu obserwowanego

Jeśli założymy, że prędkość wózka jest niemierzalna, to w projektowanym układzie regulacji należy zastosować obserwator (rys. 3.12). Ogólny schemat układu regulacji położenia wózka z rozmytym regulatorem regułowym ze sprzężeniem od stanu obserwowanego pokazuje rys. 3.12. Jest on podobny do układu z rys. 3.1, lecz ma dodany obserwator regułowy. Obserwator opracowany na podstawie równań (2.4) jest rozmyty, a podział na podmodele i kształt funkcji przynależności jest taki sam, jak w przypadku regulatora (rys. 2.5). Współczynniki $Lp_1,..., Lp_3$ pętli korekcyjnej, obliczone za pomocą procedury *place* z pakietu *Matlab* [3], przy założeniu biegunów układu zamkniętego $o_1,..., o_3$, przedstawione są w tablicy 3.4.

$$o_1 = 0,4 + 0,4 \cdot i$$
 $o_2 = 0,4 - 0,4 \cdot i$ $o_3 = 0,5$

Wejściami tego obserwatora są:

- sygnał sterowania *u*,
- położenie x wózka na bieżni,
- prąd *i* w ruchomej zwojnicy (używany do wyboru bloku obliczania wag k_r).

Różnica $x - x_o$, gdzie x_o — obserwowana wielkość wyjściowa, służy do korekcji działania obserwatora, co widać w układzie równań (3.2) — jest ona mnożona przez współczynniki korekcji z tablicy 3.4.



Rys. 3.12. Układ regulacji położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym z obserwatorem

Tablica 3.4. Współczynniki pętli korekcyjnej dla obserwatora.

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|-----------------|---------|---------|----------|---------|
| Lp_1 | 0,8674 | 1,1142 | -0,0931 | 0,6500 |
| Lp ₂ | 13,3903 | 36,7602 | 90,5538 | 32,0500 |
| Lp ₃ | 5,3508 | 30,1175 | -42,2674 | 16,7925 |

Schemat blokowy obserwatora pokazano na rys. 3.13*a* i 3.13*b*.

a)



Rys. 3.13. Observator regułowy: a) schemat observatora; b) schemat bloku

Równania bloków obserwatora są następujące:

$$\begin{cases} v_{o,k+1} = c_1 \cdot v_{o,k} + c_2 \cdot v \mathbf{1}_{o,k} + c_3 \cdot u_k + L p_3 \cdot (x_k - x_{o,k}) \\ v \mathbf{1}_{o,k+1} = v_{o,k} + L p_2 \cdot (x_k - x_{o,k}) \\ x_{o,k+1} = T p \cdot v_{o,k} + x_{o,k} + L p_1 \cdot (x_k - x_{o,k}) \end{cases}$$
(3.2)

Następnie przeprowadzono badania symulacyjne układu regulacji ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem. Przebiegi uzyskane przy $x_{zad} = 0,3$ pokazuje rys. 3.14.



Rys. 3.14. Odpowiedź układu regulacji z obserwatorem na skok zakłócenia, $x_{zad} = 0,3$: a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania na tle przebiegu położenia

Pokazane przebiegi otrzymano w układzie sterowania z regulatorem rozmytym, ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem, w odpowiedzi na skok zakłócenia na wejściu obiektu w chwili *t* = 5 s. Analiza przyczyn występowania oscylacji wykazała, że są one spowodowane różnicą między kształtem odpowiedzi na skok zakłócenia dla podmodelu 3, a kształtem odpowiedzi reszty podmodeli. Widać to na rys. 3.15, który pokazuje przebiegi prędkości i położenia dla poszczególnych podmodeli uzyskane w podukładach regulacji: a) bez obserwatorów — w tym przypadku odpowiedzi podukładów regulacji dla każdego z podmodeli są podobne i b) z obserwatorami — widać, że odpowiedź dla podmodelu 3 różni się znacznie od odpowiedzi dla pozostałych podmodeli.







Rys. 3.17. Położenie i prędkość w podukładach regulacji dla poszczególnych podmodeli; poprawiony obserwator dla podmodelu 3

Sposobem na rozwiązanie problemu, okazało się przyjęcie w obserwatorze innych współczynników korekcji dla podmodelu 3 — takich, jak w przypadku podmodelu 2 (tablica 3.5). Takie rozwiązanie wybrano, ze względu na podobieństwo odpowiedzi podmodelu 2 i 3 na skok jednostkowy (rys. 3.16). Przebiegi położenia i prędkości w podukładach regulacji dla poszczególnych podmodeli, po wprowadzeniu tej modyfikacji przedstawia rys. 3.17.

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| Lp_1 | 0,8674 | 1,1142 | 1,1142 | 0,6500 |
| Lp ₂ | 13,3903 | 36,7602 | 36,7602 | 32,0500 |
| Lp ₃ | 5,3508 | 30,1175 | 30,1175 | 16,7925 |

Tablica 3.5. Poprawione współczynniki pętli korekcyjnej dla obserwatora.

Wyniki symulacji całego układu regulacji ze sprzężeniem od stanu i z poprawionym obserwatorem regułowym (zmieniony blok 3 obserwatora), pokazuje rys. 3.18.



 $x_{zad} = 0,3$: a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania na tle przebiegu położenia

Wyniki symulacji układu regulacji ze sprzężeniem od stanu i ze zmodyfikowanym obserwatorem zamieszczono na rys. 3.19 — 3.21.



Rys. 3.19. Odpowiedź układu regulacji z obserwatorem na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0,25$: a) przebiegi położenia, prędkości i sterowania; b) powiększenie rys. 3.19*a*



Rys. 3.20. Odpowiedź układu regulacji z obserwatorem na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0,5$





Przebiegi uzyskane w układzie regulacji z obserwatorem są inne od tych, które otrzymano w układzie regulacji z bezpośrednim sprzężeniem od stanu (rys. 3.6 - 3.8). Jest to rezultat błędów wynikających z niedokładności estymacji, na podstawie której odtwarzane są potrzebne zmienne stanu. Obserwator oparto na modelu rozmytym opisanym w rozdz. 2, zaś "sterowano" modelem analitycznym. Czas regulacji jest nieco dłuższy, a przeregulowanie — nieco większe. Maksymalne wartości prędkości i prądu są mniejsze, zaś maksymalna wartość sterowania wynosi 3,65 V (przy $x_{zad} = 0,5$). Zaletą układu sterowania z obserwatorem, jest to, że nie trzeba stosować czujnika prędkości.

3.5. Projektowanie regulatora PID

Następnym krokiem syntezy układu sterowania położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym było zaprojektowanie cyfrowego regulatora PID (3.1) w celu porównania z opracowanymi wcześniej regulatorami. [2, 3, 4, 5]

$$u_{k+1} = u_k + r_0 \cdot e_k + r_1 \cdot e_{k-1} + r_2 \cdot e_{k-2}$$
(3.1)

Do obliczenia współczynników r_0 , r_1 , r_2 , zastosowano metodę Zieglera — Nicholsa. Przeprowadzono eksperyment symulacyjny z układem regulacji zawierającym model analityczny obiektu i regulator proporcjonalny. W modelu obiektu zdjęto ograniczenia położenia i zmieniając wzmocnienie doprowadzono układ do granicy stabilności. Na podstawie otrzymanych tym sposobem danych, obliczono następujące nastawy regulatora PID:

$$r_0 = 204,24$$
 $r_1 = -293,04$ $r_2 = 106,56$

Przebiegi uzyskane w wyniku symulacji układu regulacji z tak zaprojektowanym regulatorem PID przedstawia rys. 3.22.



Rys. 3.22. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem PID na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0,25$: a) przebieg sterowania na tle przebiegu położenia; b) przebieg położenia

Układ sterowania z cyfrowym regulatorem PID (3.1) jest znacznie szybszy od poprzednio omówionych układów regulacji. Dzieje się tak niestety kosztem dużej wartości sygnału sterującego (7,5 V). Ponadto w odpowiedzi skokowej występuje duże przeregulowanie wynoszące ok. 11 %. Wady te można jednak usunąć zmniejszając wzmocnienie regulatora PID, niestety kosztem wydłużenia czasu regulacji.

3.6. Badania porównawcze układów regulacji silnika i dalsze ich modyfikacje

Badania odpowiedzi (rys. 3.23) na skok zadania i skok zakłócenia podany na wejście obiektu w układach sterowania:

— ze sprzężeniem od stanu,

- ze sprzężeniem od stanu obserwowanego,
- z regulatorem PID,

wykazały, że najszybciej działa układ sterowania z regulatorem PID (znacznie krótszy czas regulacji, niż w pozostałych przypadkach). Ze wszystkich trzech układów regulacji najmniejsze przeregulowanie ma układ ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora i wynosi ono 1,3 %. Układ sterowania z obserwatorem ma przeregulowanie równe ok. 1,8 %, a układ z regulatorem PID — 10,6 % (rys.3.23*a*).

Inaczej jest z reakcją na skok zakłócenia (rys.3.23*c*). W tym przypadku regulator PID jest bezkonkurencyjny, gdyż zaburzenie sygnału położenia jest znacznie mniejsze niż w pozostałych układach regulacji (największa wartość położenia wynosi 0,507). Drugi jest regulator z bezpośrednim sprzężeniem od stanu — maksymalna wartość położenia wynosi 0,524, a najgorzej wypadł układ regulacji z obserwatorem, ponieważ maksymalna wartość położenia w odpowiedzi na zakłócenie osiągnęła wartość 0,535.

Na rys. 3.23*b*, *d* zamieszczono sygnały sterowania towarzyszące przebiegom położenia *x* wózka z rys. 3.23*a*, *c*. Szybka reakcja regulatora PID na skok wartości zadanej odbywa się kosztem dużych wartości sygnału sterowania (maksimum wynosi 14,83 V). Dla regulatora ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora maksymalna wartość sterowania ma wartość ok. 5,7 V, zaś dla układu z obserwatorem — ok. 3,6 V.

W przypadku reakcji na skok zakłócenia (rys.3.23*c*, *d*), sygnał sterowania ma podobne wartości maksymalne dla wszystkich trzech przypadków, przy czym w układzie sterowania ze sprzężeniem od stanu (RSS) — najmniejszą, a w układzie regulacji z obserwatorem (RSSO) — największą. Najszybciej dochodzi do stanu ustalonego układ z regulatorem PID, zaś najwolniej — układ z obserwatorem, lecz jest on niewiele wolniejszy od układu sterowania bez obserwatora.



Rys. 3.23. Odpowiedzi układów regulacji z regulatorem PID, ze sprzężeniem od stanu (RSS) oraz ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem (RSSO) na skok zadania ($x_{zad} = 0,5$): a) przebiegi położenia; b) przebiegi sterowania; na skok zakłócenia w chwili t = 5 s: c) przebiegi położenia; d) przebiegi sterowania

Sprawdzono także, czy nie jest możliwe dobranie takiego sprzężenia od stanu, aby układ regulacji był równie dobry pod względem szybkości działania jak układ sterowania z regulatorem PID. W tym celu podjęto próbę odgadnięcia takich biegunów układu ze sprzężeniem od stanu, aby otrzymać odpowiedź podobną do otrzymanej w układzie sterowania z regulatorem PID. Znalezienie odpowiednich wartości własnych okazało się trudne i czasochłonne, ponieważ wymagało obliczenia wielu przebiegów symulacyjnych. Ostatecznie wybrano następujące wartości biegunów:

$$b_1 = 0.8 + 0.25 \cdot i$$

 $b_2 = 0.8 - 0.25 \cdot i$
 $b_4 = 0.7 - 0.1 \cdot i$

Następnie przy pomocy procedury *place* (tak, jak poprzednio) obliczono wartości współczynników w regulatorze III ze sprzężeniem od stanu (tablica 3.6).

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|----------------|----------|----------|---------|---------|
| K_1 | 35,7143 | 12,9256 | 3,6219 | 5,8538 |
| K ₂ | 353,6585 | 127,9950 | 35,8657 | 57,9669 |
| K ₃ | 0,3902 | -0,9004 | 3,0184 | 2,1445 |
| K4 | 5,8328 | 5,2232 | -2,8025 | -0,2856 |

Tablica 3.6. Wartości współczynników wzmocnienia w regulatorze regułowym III

Odpowiedź układu regulacji z regulatorem regułowym III, ze sprzężeniem od stanu, na skok zadania $x_{zad} = 0,5$ i skok zakłócenia pokazano na rys. 3.24 i 3.25.



Rys. 3.24. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem III, ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora, na skok wartości zadanej ($x_{zad} = 0,5$): a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania; na skok zakłócenia w chwili t = 5 s: c) przebieg położenia; d) przebieg sterowania

Czas regulacji w badanym układzie jest zbliżony do czasu regulacji układu z regulatorem PID. Niestety szybkość działania została okupiona równie dużym sygnałem sterowania pod-

czas odpowiedzi skokowej (od ok. –13 V do 18,6 V). Przeregulowanie w otrzymanym układzie jest małe (mniejsze niż dla układów, których odpowiedzi pokazano na rys. 3.23) i wynosi ok. 0,8 %.

Odpowiedź na skok zakłócenia podanego między regulator a obiekt jest zbliżona do odpowiedzi układu regulacji z regulatorem PID (największa wartość położenia wynosi 0,512), sygnał sterowania dla tej odpowiedzi ma mniejszą wartość maksymalną od wartości otrzymanych w poprzednich układach regulacji i ustala się szybciej niż dla układu z regulatorem II i z bezpośrednim sprzężeniem od stanu (rys. 3.23*d*).

Niestety ten sam układ regulacji przy skrajnych wartościach położenia zadanego (np. $x_{zad} = 0,9$) wykazuje silne drgania sygnału sterującego oraz przebiegu położenia i nie dochodzi do wartości zadanej (rys. 3.25). Sterowanie osiąga przy tym bardzo duże, nierealistyczne wartości rzędu 90 V (rys. 3.25*b*).



Rys. 3.25. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem III, ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora, na skok wartości zadanej $x_{zad} = 0.9$: a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania

Problem ten można rozwiązać przez dwukrotne zmniejszenie wzmocnień w blokach 1 i 2 regulatora III, przy małych wartościach uchybu regulacji (|e| < 0,05). Bloki te są odpowiedzialne za działanie regulatora w pobliżu końców bieżni (rys. 3.10). Odpowiedź układu regulacji z usprawnionym regulatorem III przedstawia rys. 3.26.

Przy czterokrotnym zmniejszaniu wzmocnienia (rys. 3.27), na początku odpowiedzi skokowej nie występują oscylacje jak na rys. 3.26, ale odchylenie spowodowane skokiem zakłócenia jest większe niż poprzednio (przy dwukrotnym zmniejszaniu wzmocnienia).



Rys. 3.26. Odpowiedź układu regulacji z poprawionym regulatorem III, ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora, na skok wartości zadanej ($x_{zad} = 0.9$) oraz na skok zakłócenia w chwili t = 2 s: a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania



Rys. 3.27. Odpowiedź układu regulacji z poprawionym regulatorem III, ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora, na skok wartości zadanej ($x_{zad} = 0.9$) oraz na skok zakłócenia w chwili t = 2 s, wzmocnienie zmniejszane 4x, a nie 2x: a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania

W układzie sterowania z poprawionym regulatorem III z obserwatorem nie zmieniano samego obserwatora (przyjęto współczynniki korekcji takie, jak poprzednio — z tablicy 3.5). Uzyskane w trakcie badań symulacyjnych przebiegi przedstawiono na rys. 3.28*a* — 3.28*d*.

Przeregulowanie w odpowiedzi na skok zadania, w układzie regulacji z poprawionym regulatorem III z obserwatorem, wynosi 0,3 % (rys. 3.28*a*), i jest mniejsze niż w poprzednich przypadkach (układ z regulatorem III bez obserwatora (rys. 3.25*a*) — ok. 0,8 %, układ z regulatorem II bez obserwatora — ok. 1,3 %, układ z regulatorem II z obserwatorem — ok. 1,8 %, układ z regulatorem PID — 10,5 % (rys. 3.23*a*)).



Rys. 3.28. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem III, ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem, na skok wartości zadanej ($x_{zad} = 0,5$): a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania; na skok zakłócenia w chwili t = 5 s: c) przebieg położenia; d) przebieg sterowania

Niestety maksymalna wartość położenia w odpowiedzi na zakłócenie (rys.3.28*c*) jest duża (wartość największa wynosi 0,519 i jest mniejsza tylko od wartości otrzymanych w układach z regulatorem II bez obserwatora i z obserwatorem (rys. 3.23*c*)).

Procesy przejściowe są teraz szybsze (tylko układ sterowania z regulatorem PID ma krótszy czas regulacji), ale zostało to okupione bardzo dużym sygnałem sterującym (wartość maksymalna sterowania na początku odpowiedzi skokowej wyniosła 29 V).

Przedstawione wyniki wskazują, że przez odpowiedni wybór biegunów układu zamkniętego i obliczenie na ich podstawie wag sprzężenia od stanu można dobrać regulator o parametrach zbliżonych lub lepszych od regulatora PID. Można było się tego spodziewać, ponieważ układ sterowania z regulatorem PID jest szczególnym przypadkiem układu sterowania ze sprzężeniem od stanu. Dla układów liniowych i układów bardzo zbliżonych do liniowych można przejść, drogą przekształceń schematów, z jednej struktury w drugą.

Niestety projektowanie układu ze sprzężeniem od stanu polega na zgadywaniu biegunów, symulowaniu kolejnych układów i ocenie ich działania. Proces ten powtarza się aż do uzy-skania zadowalających rezultatów, co następuje po wielu próbach.

Podstawową wadą układów regulacji z regulatorem PID oraz z regulatorem III ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem i bez obserwatora, jest duży sygnał sterowania potrzebny do zapewnienia szybkiego działania. Przeprowadzono więc kolejny eksperyment w celu znalezienia takich współczynników sprzężenia od stanu, aby sygnał sterujący był akceptowalny wynosił maksimum 12 V z możliwością niewielkiego przekraczania tej wartości. Ostatecznie przyjęto bieguny:

$$b1 = 0.8 + 0.25 \cdot i$$

 $b2 = 0.8 - 0.25 \cdot i$
 $b4 = 0.85$

Po założeniu powyższych biegunów $b_1,..., b_4$, postępując tak, jak poprzednio uzyskano współczynniki regulatora IV ze sprzężeniem od stanu zamieszczone w tablicy 3.7. Przebiegi przejściowe w układzie regulacji z regulatorem IV przedstawiono na rys. 3.29.

| | model 1 | model 2 | model 3 | model 4 |
|----------------|----------|---------|---------|---------|
| K_1 | 13.9286 | 5.0410 | 1.4600 | 2.2830 |
| K ₂ | 200.7840 | 72.6671 | 21.0464 | 32.9098 |
| K ₃ | 2.2369 | -0.2320 | 2.9346 | 2.4472 |
| K_4 | -0.7875 | 2.8272 | -3.1775 | -2.6728 |

Tablica 3.7. Wartości współczynników wzmocnienia w regulatorze regułowym IV

Układ sterowania z regulatorem IV bez obserwatora jest nieco wolniejszy od układu z regulatorem III (rys. 3.24). Ma również nieco większe przeregulowanie (ok. 1,1 %), maksymalna wartość położenia w odpowiedzi na skok zakłócenia jest również większa (wynosi 0,525). Jednak maksimum sygnału sterowania jest w okolicy 9,6 V przy $x_{zad} = 0,5$ (rys. 3.29*b*) i 12,26 V przy $x_{zad} = 0,65$ (rys.3.30*a*). Ponadto sygnał sterowania przy $x_{zad} = 0,9$ (rys.3.30*b*) osiąga zdecydowanie mniejszą wartość maksymalną (równą ok. 8,9 V) niż w układzie z poprawionym regulatorem III (rys. 3.26*b*), w którym wynosi ona prawie 22 V.



Rys. 3.29. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem IV, ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora na skok wartości zadanej ($x_{zad} = 0,5$): a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania; na skok zakłócenia w chwili t = 5 s: c) przebieg położenia; d) przebieg sterowania



Rys. 3.30. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem IV, ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora na skok wartości zadanej i na skok zakłócenia w chwili t = 2 s przy: a) $x_{zad} = 0,65$; b) $x_{zad} = 0,9$
Przeprowadzono również badania symulacyjne układu regulacji z regulatorem IV z obserwatorem dobranym w rozdz. 3.4, ze współczynnikami korekcji zestawionymi w tablicy 3.5 (rys. 3.31 przedstawia uzyskane przebiegi przejściowe).



Rys. 3.31. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem IV, ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem na skok wartości zadanej ($x_{zad} = 0,5$): a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania; na skok zakłócenia w chwili t = 5 s: c) przebieg położenia; d) przebieg sterowania

Przeregulowanie w tym układzie wynosi ok. 1,0 %. Wynik ten jest bardzo zbliżony do uzyskanego w układzie bez obserwatora. Jednak maksymalna wartość położenia w odpowiedzi na skok zakłócenia podanego na wejście obiektu wynosi 0,533 (rys.3.31*c*) i jest tylko nieznacznie mniejsza od wartości maksymalnej w układzie z regulatorem II z obserwatorem (rys. 3.23*c*). Przyczyną takiego stanu rzeczy jest małe wzmocnienie układu regulacji (w porównaniu z innymi układami). Z tego też powodu, wartość maksymalna sterowania w odpowiedzi na skok wartości zadanej jest mniejsza niż w układzie sterowania z regulatorem IV bez obserwatora i wynosi 4,7 V przy $x_{zad} = 0,5$ (rys. 3.31*b*) oraz 6,2 V przy $x_{zad} = 0,65$ i 8,5 V przy $x_{zad} = 0,9$.

3.7. Modyfikacja układu regulacji z regulatorem PID

W celu zmniejszenia wartości maksymalnej sygnału sterującego w układzie regulacji z regulatorem PID, przed wejściem wartości zadanej umieszczono modyfikator (rys. 3.32) człon inercyjny o stałej czasowej T = 0.2 s.



Rys. 3.32. Schemat układu regulacji z regulatorem PID i z modyfikatorem





Rys. 3.33. Odpowiedź układu regulacji z regulatorem PID i z członem jednoinercyjnym na skok wartości zadanej ($x_{zad} = 0,5$): a) przebieg położenia; b) przebieg sterowania; na skok zakłócenia w chwili t = 5 s: c) przebieg położenia; d) przebieg sterowania

Po dokonanej zmianie zmalała maksymalna wartość sygnału sterującego i wyniosła 6,28 V przy $x_{zad} = 0,5$ (rys.3.33*b*) i 11,18 V przy $x_{zad} = 0,9$, a w odpowiedzi na skok wartości zadanej nie ma przeregulowania. Wydłużył się jednak czas dochodzenia układu regulacji do stanu ustalonego. Dodanie inercji jest także przyczyną wolniejszego nadążania. Dobór zbyt dużej stałej czasowej podczas eksperymentów powodował znaczne zwiększenie czasu regulacji. Reakcja układu na zakłócenie nie uległa zmianie, ponieważ modyfikator znajduje się poza pętlą sprzężenia zwrotnego.

Stosując modyfikację sygnału zadanego, można w miarę potrzeby, ograniczać wartość maksymalną sygnału sterującego, jednak trzeba się liczyć ze zmniejszeniem szybkości działania układu regulacji.

Zbadano również działanie modyfikatora w postaci członu dwuinercyjnego (o stałych czasowych $T_1 = T_2 = 0,06$ s), w celu skrócenia czasu regulacji przy zachowaniu założonego ograniczenia wartości sterowania (rys. 3.34).



Rys. 3.34. Odpowiedź na skok zadania ($x_{zad} = 0,5$) układu regulacji z regulatorem PID i z członem dwuinercyjnym: a) przebieg położenia; b) sygnał sterowania

Układ sterowania z dwuinercyjnym modyfikatorem działa szybciej niż poprzednio badany układ regulacji (z modyfikatorem jednoinercyjnym), przy zbliżonej wartości maksymalnej sygnału sterującego (6,36 V przy $x_{zad} = 0,5$ i 11,3 V przy $x_{zad} = 0,9$) i zbliżonym kształcie przebiegów przejściowych. Odpowiedź na skok zakłócenia tak, jak w układzie z członem jednoinercyjnym, pozostała bez zmian.

3.8. Badania wrażliwości zaprojektowanych układów regulacji na zmiany masy wózka silnika

Masa obiektu ruchomego ma zawsze znaczny wpływ na jego dynamikę. W przypadku przyjętego w rozdz. 2 modelu silnika o ruchu prostoliniowym, masa wózka m_w wpływa jedynie na wartość parametru a_2 .

Przyjęto następujący plan badań wrażliwości układów regulacji na zmiany masy wózka:

założono zwiększenie masy wózka: a) dwukrotne (m_a = 2·m_w) i b) czterokrotne (m_a = 4·m_w). Przekłada się to na następujące wartości parametru a₂: a) a₂ = 0,896 i b) a₂ = 0,95;

— założono skokowe zmiany: zadania $x_{zad}(t) = 0, 5 \cdot I(t)$ oraz zakłócenia $z_o(t) = I(t-5)$.

Rezultaty przeprowadzonych badań przedstawiono w postaci przebiegów przejściowych (rys. 3.35 — 3.37) i w tablicach 3.8 i 3.9.

| | regulator PID | regulator II bez ob- serwatora | regulator II z obser- watorem |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| $m_w = m_o$ | <i>H</i> = 10,6 % | H = 1,3 % | <i>H</i> =1,8 % |
| | $u_{max} = 14,8 \text{ V}$ | $u_{max} = 5,7 \text{ V}$ | $u_{max} = 3,6 \text{ V}$ |
| $m_a = 2 \cdot m_o$ | <i>H</i> = 20,2 % | H = 0,7 % | H = 1 % |
| | $u_{max} = 14,48 \text{ V}$ | $u_{max} = 7,16 \text{ V}$ | $u_{max} = 3,65 \text{ V}$ |
| $m_b = 4 \cdot m_o$ | układ niestabilny | H = 0,8 % | $u_{max} = 3,93 \text{ V}$ |
| | | $u_{max} = 5,86 \text{ V}$ | odpowiedź z zachwianiem |

Tablica 3.8. Wyniki badań przy skoku zadania $x_{zad}(t) = 0.5 \cdot I(t)$

Tablica 3.9. Wyniki badań przy skoku zakłócenia $z_o(t) = I(t-5)$.

| | regulator PID | regulator II bez ob- serwatora | regulator II z obser- watorem |
|---------------------|-------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| $m_w = m_o$ | $x_m = 0,507$ | $x_m = 0,524$ | $x_m = 0,535$ |
| $m_a = 2 \cdot m_o$ | $x_m = 0,508$ | $x_m = 0,526$ | $x_m = 0,542$ |
| $m_b = 4 \cdot m_o$ | układ niestabilny | $x_m = 0,528$ | $x_m = 0,550$ |



Rys. 3.35. Przebiegi położenia w odpowiedziach układów regulacji z parametrem $a_2 = 0,896$ w obiekcie, na skok wartości zadanej (a, c ,e) i skok zakłócenia (b, d, f): a), b) ze sprzężeniem od stanu (regulator II) bez obserwatora; c), d) z obserwatorem; e), f) z regulatorem PID



Rys. 3.36. Przebiegi sterowania w odpowiedziach układów regulacji z parametrem $a_2 = 0,896$ w obiekcie, na skok wartości zadanej (a, c ,e) i skok zakłócenia (b, d, f): a), b) ze sprzężeniem od stanu (regulator II) bez obserwatora; c), d) z obserwatorem; e), f) z regulatorem PID



Rys. 3.37. Przebiegi położenia w odpowiedziach układów regulacji z parametrem $a_2 = 0.95$ w obiekcie, na skok wartości zadanej (a, c, e) i skok zakłócenia (b, d, f): a), b) ze sprzężeniem od stanu (regulator II) bez obserwatora; c), d) z obserwatorem; e), f) z regulatorem PID



Rys. 3.38. Przebiegi położenia w odpowiedziach układów regulacji z parametrem $a_2 = 0.95$ w obiekcie na skok wartości zadanej a) z regulatorem PID b) z regulatorem PID i z modyfikatorem

W odpowiedzi układu regulacji z regulatorem PID pojawiły się oscylacje i wydłużył się czas regulacji przy $m_a = 2 \cdot m_o$ (rys. 3.35*e*), a przy $m_b = 4 \cdot m_o$ — pojawiła się niestabilność (rys. 3.38*c*). Okres drgań wynosił $T_{osc} = \frac{1}{9}$ s. Znacznie wzrosło przeregulowanie (przy $m_a = 2 \cdot m_o$ było prawie dwukrotnie większe niż przed zmianą parametru a_2). Układ z regulatorem PID jest mniej odporny na zmianę masy wózka niż układy ze sprzężeniem od stanu z regulatorem II. Dzieje się tak dlatego, że układ regulacji z regulatorem PID ma mniejsze zapasy stabilności, o czym świadczą szybkie przebiegi przejściowe i oscylacyjny charakter otrzymanych odpowiedzi.

Lepiej po zmianie parametrów działa układ sterowania z modyfikatorem — jest stabilny także przy $m_b = 4 \cdot m_o$. Jednak charakter otrzymanego przebiegu zmienia się znacznie — poprzednio układ dochodził do stanu ustalonego bez przeregulowania (rys. 3.34*a*), a teraz na początku odpowiedzi skokowej są oscylacje (rys. 3.38*b*). Zastosowanie szybszego modyfikatora — o mniejszych stałych czasowych ($T_1 = T_2 = 0,05$ s), spowodowało wystąpienie przy $m_b = 4 \cdot m_o$ oscylacji takich, jak w przypadku układu sterowania z samym regulatorem PID.

Najbardziej odporny okazał się układ sterowania ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora. Przy zmianach masy wózka kształt przebiegów przejściowych nie ulega zmianie, a przeregulowanie i maksimum odpowiedzi na skok zakłócenia zmieniają się stosunkowo niewiele.

Układ regulacji z obserwatorem działał podczas badań gorzej, niż układ z bezpośrednim sprzężeniem od stanu. Wraz ze wzrostem wartości parametru a_2 , znacznie rosła maksymalna wartość położenia w odpowiedzi zakłóceniowej (tablica 3.9). Ponadto przy $m_b = 4 \cdot m_o$, zmienił się charakter odpowiedzi skokowej — pojawiło się zachwianie.

4. Symulator obiektu

4.1. Koncepcja symulatora numerycznego

Opracowując symulator silnika, kierowano się wygodą użytkownika. Starano się więc, aby program był przyjazny i łatwy w obsłudze. Dlatego napisano aplikację z interfejsem graficznym, którego cechą jest prostota posługiwania się nim. Żądane polecenia można wybierać myszą, podobnie, jak opcje sterujące pracą programu. Dane liczbowe podaje się w oknach dialogowych. W celu łatwego porównania działania różnych układów regulacji, wprowadzono możliwość ich modyfikacji (wyboru ich struktury), w sposób prosty, przez ustawienie myszą odpowiednich opcji w oknach dialogowych.

Starano się również, aby informacje uzyskane w wyniku obliczeń były dostępne w formie umożliwiającej ich łatwą analizę. Dlatego wprowadzono możliwość rysowania przebiegów wybranych przez użytkownika.

Wykresy można skalować dowolnie (z okna dialogowego) lub wybrać tryb ich automatycznego rysowania.

Oprócz pokazywania danych na rysunkach, wprowadzono animację wózka prowadzoną na bieżąco podczas symulacji. Zdecydowano się na to, aby użytkownikowi wygodniej było analizować wyniki obliczeń, ponieważ podczas animacji łatwiej jest dokonać wstępnej oceny pracy układu, gdyż taka prezentacja lepiej przemawia do wyobraźni.

4.2. Wstępne informacje o programie

Symulator obiektu napisano używając kompilatora *Visual C++* v. 1.5, firmy *Microsoft*. Zrobiono to tak, aby jego obsługa była możliwie łatwa i intuicyjna (zachowanie standardów obowiązujących w systemie *Windows 3.1*). Wyniki obliczeń generowane przez program mogą być zapisane do pliku (o nazwie *dane_sym*), co umożliwia ich późniejszą obróbkę. Ponadto zamieszczono szereg mechanizmów mających ułatwić obsługę i uatrakcyjnić program. Są to:

- udogodnienia dotyczące przedstawiania wyników symulacji
- zilustrowanie ruchu wózka na bieżni przez wprowadzenie animacji wózka odbywającej się na bieżąco podczas obliczeń,
- możliwość rysowania przebiegów wybranych wielkości, uzyskanych podczas symulacji,

- zaznaczenie położenia zadanego podczas pracy na jednym komputerze przez wprowadzenie wskaźnika,
- wydłużanie bądź skracanie bieżni podczas zmian szerokości okna,
- udogodnienia dotyczące wykresów:
- możliwość dowolnego skalowania wykresów,
- opcja podpisywania wykresów,
- możliwość wydrukowania otrzymanych przebiegów na drukarce,
- możliwość skalowania okna wykresów,
- udogodnienia dotyczące obsługi programu:
- wprowadzenie oprócz menu rozwijalnego, także paska narzędzi z poleceniami wyprowadzonymi w postaci przycisków,
- wprowadzenie klawiszy skrótów dla często używanych poleceń jak start symulacji lub rysowanie wykresu,
- pasek stanu, na którym wypisywane są podpowiedzi pomocne podczas korzystania z programu,
- możliwość przerwania obliczeń, a następnie —jeśli nie zmieniono parametrów ich wznowienia,
- możliwość zadawania położenia początkowego wózka na bieżni za pomocą myszy,
- możliwość podawania wartości zadanej położenia również za pomocą myszy,
- udogodnienia dotyczące badań układów regulacji:
- możliwość pracy z regulatorem zewnętrznym lub wewnętrznym,
- możliwość wybrania regulatora z obserwatorem / regulatora bez obserwatora / regulatora PID podczas pracy na jednym komputerze,
- możliwość dodania modyfikatora (członu dwuinercyjnego) na wejściu układu regulacji z regulatorem PID,
- możliwość wprowadzenia skoku zakłócenia na wejście obiektu w wybranej przez użytkownika chwili.

Na rys. 4.1. pokazano wygląd ekranu symulatora silnika liniowego, z opisem jego elementów oraz okno wykresu.



Rys. 4.1. Widok ekranu symulatora silnika liniowego z oknem wykresu; A — pasek menu, B — pasek narzędzi, C — wózek, D — wskaźnik położenia zadanego, E — bieżnia, F — okno wykresu, G — pasek stanu

4.3. Obsługa programu

Użytkownik komunikuje się z programem wydając polecenia za pośrednictwem paska menu lub paska narzędzi. Za pomocą wybieranych poleceń wywołuje się okna dialogowe, w których można zmieniać dane potrzebne do funkcjonowania programu bądź sterować jego reakcjami. Oprócz menu rozwijalnego, jest dostępne standardowe menu systemowe (wywoływane z lewego górnego rogu okna).

W menu Plik (pasek menu) dostępne są dwa polecenia: Drukuj i Koniec.

Polecenie **Drukuj** służy do ustawienia parametrów wydruku wykresów. Możliwy jest wybór drukarki (jeśli w systemie jest zainstalowanych kilka tego typu urządzeń). Można też wybrać wymiary papieru jaki został włożony do drukarki, jak również orientację wykresu (w pionie lub w poziomie). Jeśli drukarka dysponuje wieloma podajnikami papieru, można też nastawić ten wybrany przez siebie.

Okno dialogowe jest standardowe (przedstawiono je na rys. 4.2), dzięki czemu użytkownik korzystający już z jakichś programów nie musi uczyć się od nowa sposobu wysyłania danych na drukarkę. Pod przyciskiem **Options** dostępne są ustawienia sterownika wybranej drukarki (jeśli taki istnieje).



Rys. 4.2. Okno dialogowe polecenia Drukuj

Jeżeli użytkownik zażąda drukowania wykresu, a danych symulacyjnych jeszcze nie będzie (brak pliku z wynikami działania symulatora), to ukaże się okno informujące o tym i cała akcja zostanie odwołana.

Program dostosowuje wielkość rysunku do dostępnego miejsca, ale skalowanie odbywa się z zachowaniem proporcji. Dlatego też, jeśli wybierze się orientację pionową, to o wymiarach rysunku zadecyduje szerokość kartki i rysunek zostanie wydrukowany mniejszy, niż gdy użytkownik wybierze orientację poziomą.

Polecenie Koniec służy do natychmiastowego opuszczenia programu.

W menu Ustawienia (dotyczące symulatora) są do wyboru cztery polecenia: Czas, Początek, Zapamiętaj i Regulator. Wywołanie każdego z nich powoduje ukazanie się na ekranie odpowiedniego okna dialogowego.

Polecenie **Czas** służy do ustawienia czasu trwania symulacji. Podaje się go w sekundach w zakresie od 0 s do 10000 s. Przekroczenie tego zakresu spowoduje wyświetlenie komunikatu ostrzegawczego. Wartością domyślną jest 10 s. Jeśli obowiązująca w danej chwili wartość jest inna, to klawiszem **Domyślny** można ją szybko ustawić.



Rys. 4.3. Okno dialogowe polecenia Początek

Polecenie **Początek** służy z kolei do ustawienia punktu początkowego, z którego wystartuje wózek oraz do włączenia skoku zakłócenia na wejściu obiektu w wybranej chwili (w oknie dialogowym *Ustawienia początkowe* (rys. 4.3)).

Wartości położenia początkowego, jakie można ustawić należą do

przedziału [0; 1]. To okno może być użyte do dokładnego ustawienia parametru początkowego po uprzednim umiejscowieniu wózka na bieżni w okolicy żądanego miejsca przez przeciągnięcie go myszą.

Opcja **Skok zaklócenia** służy do włączenia skoku zakłócenia na wejściu obiektu. Chwilę wystąpienia zakłócenia można wybrać z zakresu 0 do 10000s. Jeśli nie jest ustawiona opcja **Skok zakłócenia**, to pole **Chwila skoku zakłócenia** będzie nieaktywne (koloru szarego) i nie będzie można zmienić jego wartości.

Użytkownik może symulować układ, w którym występuje zakłócenie lub nie, dobierając długość trwania symulacji, bez konieczności przełączania opcji **Skok zakłócenia**.

W sytuacji z rys. 4.3, wózek wystartuje z początku bieżni (lewe skrajne położenie), skok zakłócenia zostanie wprowadzony na wejście obiektu (zaznaczona opcja **Skok zakłócenia**) w



Rys. 4.4. Okno dialogowe polecenia **Zapamiętaj**

chwili t = 5 s.

Polecenie **Zapamiętaj** służy do wybrania zmiennych (przez zaznaczenie odpowiednich kwadratów w oknie dialogowym zatytułowanym *Co zapamiętać?* (rys. 4.4)), które zostaną zapisane do pliku (będą tym samym mogły być umieszczone po zakończeniu obliczeń, na wykresie). Są to: \mathbf{x} — położenie wózka na bieżni, \mathbf{v} — prędkość wózka, \mathbf{i} — prąd w ruchomej zwojnicy, \mathbf{e} — uchyb re-

gulacji, **u** — napięcie sterujące, **F** — siła działająca na wózek. Można również polecić zapisanie (w osobnym pliku) podpisu umieszczonego pod ostatnio skomentowanym rysunkiem (opcja **Ostatni podpis**). Będzie to tekst proponowany domyślnie w oknie dialogowym umożliwiającym opisanie otrzymanego wykresu. Jest to opcja użyteczna szczególnie wtedy, kiedy podpisy pod rysunkami są długie, a użytkownik chce opisać kilka rysunków, przy czym podpisy niewiele się różnią. Ponadto, po przerwaniu użytkowania programu, można zorientować się, co było robione podczas ostatniej sesji (efekt uboczny, ale użyteczny).

| I F | Regulator | | | | | | |
|------------------|-------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Położenie zadane | 0.2 | | | | | | |
| 🛛 Obserwator | Regulator PID | | | | | | |
| | Modyfikator | | | | | | |
| 🗌 Regula | 🗌 Regulator ze w nętrzny | | | | | | |
| ОК | Anuluj | | | | | | |

Ostatnim poleceniem w menu Ustawienia jest polecenie Regulator. Po jego wybraniu ukazuje się na ekranie okno dialogowe *Regulator*, przedstawione na rysunku zamieszczonym obok (rys. 4.5). W oknie tym znajduje się opcja Regulator zewnętrzny, której wybranie przełącza symulator w tryb pracy z zewnętrznym urządzeniem sterującym.

Rys. 4.5. Okno dialogowe polecenia Regulator

Przekazywanie danych odbywa się wtedy za pośrednictwem karty z wejściami / wyjściami analogowymi (rozdz. 6). Jeśli wybierzemy ten tryb pracy, to pozostałe obiekty w oknie dialogowym będą nieaktywne (koloru szarego i nie będzie możliwa zmiana ich wartości).

Podczas pracy na jednym komputerze symulowany jest cały układu regulacji, możliwe jest zadawanie położenia x_{zad} w zakresie [0; 1]. Ponadto do zmiany regulatora ze sprzężeniem od stanu, służą opcje **Regulator PID**, **Modyfikator** i **Obserwator**.

Pierwsza z tych opcji służy do wybierania regulatora PID do sterowania modelem silnika. Jeśli jest ona ustawiona, wówczas trzecia opcja (**Obserwator**) jest nieaktywna (taka sytuacja jest pokazana na zamieszczonym rysunku). Opcja **Obserwator** włącza regulator ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem. Opcja **Modyfikator** dołącza do układu regulacji z regulatorem PID, na wejściu wartości zadanej, człon dwuinercyjny (jeśli opcja **Regulator PID** jest wyłączona, to opcja **Modyfikator** jest nieaktywna).

W kolejnym menu — **Obliczenia** użytkownik ma do dyspozycji dwa polecenia: **Start** oraz **Kontynuacja**.

Polecenie **Start** służy do rozpoczęcia symulacji. Zamiast wywoływać to polecenie myszą, można użyć klawisze skrótu: Ctrl+T.

Polecenie **Kontynuacja** jest początkowo nieaktywne, a za jego pomocą można rozpocząć obliczenia od miejsca, w którym się je przerwało (klawiszem *Escape*). Jeśli po przerwaniu nie zmieniło się parametrów wpływających na symulację, to opcja ta jest aktywna. Jeśli jednak dokonało się takich zmian, to staje się ona znowu niedostępna. Opcja ta zostaje również wyłączona, jeśli rozpocznie się nowe obliczenia. Następne menu — **Wykres** dotyczy rysowania wykresów (w oddzielnym oknie). W menu tym znajdują się cztery polecenia: **Rysuj**, **Parametry**, **Co narysować**, **Podpis**. Za pomocą tych rozkazów użytkownik może ustalić, jak będą przedstawiane wybrane przebiegi.

Polecenie **Rysuj** włącza / wyłącza okno wykresu, na którym umieszczone są przebiegi wybranych zmiennych w czasie. Do jego wywołania można użyć "szybkiej kombinacji" klawiszy *Ctrl+R*. Znacznik który pojawia się przy tej pozycji menu, świadczy o tym, że okno już istnieje i ponowne wydanie tego polecenia, zamknie je.

| Ustawienia wykresu | | | | | | |
|--------------------|----|----------------|--|--|--|--|
| Min X |). | Max X 10. | | | | |
| Min Y |). | Max Y 0.527641 | | | | |
| Siat | ka | 🛛 Auto | | | | |
| 0 | к | Anuluj | | | | |

Rys. 4.6. Okno dialogowe do ustawiania parametrów wykresu

Wydanie polecenia **Parametry** powoduje pojawienie się na ekranie okna dialogowego *Ustawienia wykresu* (rys. 4.6). Można tu wybrać opcję **Siatka**, która uaktywnia rysowanie siatki na wykresie. Podziałka siatki jest dobierana automatycznie. Podobnie jest ze skalowaniem wykresu. Jeśli aktywna jest

opcja Auto, to szukane są wartości maksymalne i minimalne zmiennych. Jeśli na rysunku ma być narysowanych kilka przebiegów, to zostaną wybrane wartości skrajne dla wszystkich zmiennych. Wybór trybu automatycznego skalowania wykresu powoduje dezaktywację pół w oknie dialogowym służących do skalowania (taka sytuacja jest przedstawiona na rysunku). Jeśli użytkownik wybierze skalowanie ręczne (wyłączy opcję Auto), wtedy w kolejnych polach może podać: Min X i Max X — wartość minimalną i wartość maksymalną na osi odciętych, Min Y i Max Y — odpowiednio dla osi rzędnych. Kontrolowane jest przy tym, czy Min X < Max X i czy Min Y < Max Y. Jeśli któryś z tych warunków nie jest spełniony, to użytkownik jest o tym fakcie zawiadamiany przez program komunikatem wyświetlanym w odpowiednim oknie dialogowym.

W celu uproszczenia działania można opcję Auto wykorzystać w sposób następujący:

- wybrać tryb automatyczny skalowania wykresu w sposób opisany powyżej,

- narysować żądane przebiegi (polecenie Rysuj),

— wyłączyć opcję **Auto** i dowolnie zmienić wartości maksymalne i minimalne na osiach wykresu. Warto w tym miejscu zauważyć, że w odpowiednich polach okna *Ustawienia wykresu* (rys. 4.6) są wstawiane aktualne wartości uzyskane w wyniku automatycznego skalowania, dlatego dalsze zmiany parametrów wykresu są uproszczone. Ponadto łatwo jest z tych pól odczytać wartości maksymalne i minimalne dowolnej zmiennej, jakie zostały osiągnięte w trakcie symulacji.



Rys. 4.7. Okno dialogowe polecenia **Co nary**sować

Polecenie **Co narysować** wyświetla okno dialogowe *Co narysować?* (rys. 4.7), w którym wybiera się zmienne do umieszczenia na wykresie. Można kazać wykreślić: \mathbf{x} — położenie wózka na bieżni, \mathbf{v} — prędkość wózka, \mathbf{i} — prąd w ruchomej zwojnicy, \mathbf{e} — uchyb regulacji, \mathbf{u} — napięcie sterują-

ce, F — siłę działającą na wózek. W przypadku pokazanym na rys. 4.7, na wykresie zostanie



Rys. 4.8. Okno dialogowe polecenia Podpis

umieszczony jedynie przebieg położenia wózka na bieżni.

Polecenie **Podpis** powoduje wyświetlenie okna dialogowego *Podpis pod rysunkiem* (rys. 4.8), w którym można zapisać informacje, pojawiające się następnie pod rysunkiem (maksymalna długość tekstu, który

można wprowadzić, wynosi 1000 znaków. Domyślny tekst podpisu jest brany z pliku (jeśli taki istnieje, czyli jeśli użytkownik włączył opcję zapamiętywania podpisów dostępną przez wywołanie okna dialogowego polecenia **Zapamiętaj** z menu **Ustawienia** i wybranie opcji **Ostatni podpis**).

Wpisany tekst pojawi się pod rysunkiem tylko wtedy, gdy wybrana zostanie opcja **Podpis**. Ponadto, z powodu długości umieszczanych pod rysunkiem informacji i domyślnego wypełniania pola zapamiętanym uprzednio podpisem, mając na względzie wygodę użytkownika, wprowadzono przycisk **Wyczyść**, przy pomocy którego wymazuje się zawartość pola, w któ-

| - | 0 Silniku | |
|-------------|---|--|
| € /€ | Silnik wersja 2.0 Copyright © 1997 by Piotr Marusak OK | |

Rys. 4.9. Okno informacyjne

osobnym oknie standardowo zamieszczanym w programach (rys. 4.9).

re wpisuje się tekst.

W ostatnim menu o nazwie **Pomoc**, znajduje się polecenie **O Silniku**, które wyświetla podstawowe informacje o programie w Oprócz paska menu, wprowadzono również <u>pasek narzędzi</u>, na który wyprowadzono polecenia, aby ułatwić dostęp do nich. Rys. 4.10 przedstawia pasek narzędzi z programu symulatora silnika.

| | 0 | t. | | IRI | L ^S | , | ₽ | 갑수 | <u>, t</u> e | ‡-‡ | i | |
|-----|---|----|---|-----|----------------|--------------|---|----|--------------|-----|----|--|
| 1 1 | ↑ | 1 | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | 1 | ↑ | 1 | ↑ | |
| 1 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |

Rys. 4.10. Widok paska narzędzi

Opis znaczenia klawiszy paska narzędzi:

- 1 natychmiastowe wyjście z programu, odpowiednik polecenia Koniec z menu Plik,
- 2 szybkie posłanie wykresu na drukarkę, bez wyświetlania okna dialogowego (przyjmowane są domyślne wartości parametrów wydruku),
- 3 wywołanie okna dialogowego, w którym podaje się czas symulacji, odpowiednik polecenia Czas z menu Ustawienia,
- 4 wywołanie okna dialogowego Ustawienia początkowe (rys. 4.3), w którym podaje się położenie początkowe wózka na bieżni oraz decyduje się o wprowadzeniu skoku zakłócenia na wejściu obiektu i ustawia się chwilę, w której ma on nastąpić, odpowiednik polecenia Początek z menu Ustawienia,
- 5 wywołanie okna dialogowego *Co zapamiętać*? (rys. 4.4), w którym podaje się, które zmienne mają być zapamiętane w pliku i czy zapamiętać ostatni podpis pod rysunkiem, odpowiednik polecenia **Zapamiętaj** z menu Ustawienia,
- 6 wywołanie okna dialogowego *Regulator* (rys. 4.5), w którym podaje się wartość zadaną oraz decyduje się, czy korzysta się z regulatora zewnętrznego, czy też symulacja całego układu regulacji ma się odbywać na jednym komputerze. Wybiera się również regulator, który ma być użyty podczas symulacji na jednym komputerze, odpowiednik polecenia **Regulator** z menu **Ustawienia**,
- 7 rozpoczęcie symulacji, odpowiednik polecenia Start z menu Obliczenia,
- 8 rysowanie wykresu, odpowiednik polecenia **Rysuj** z menu **Wykres**,
- 9 wywołanie okna dialogowego *Ustawienia wykresu* (rys. 4.6), w którym ustawia się parametry wykresu, odpowiednik polecenia **Parametry** z menu **Wykres**,

- 10 wywołanie okna dialogowego *Co narysować?* (rys. 4.7), w którym wybiera się, zmienne, których przebiegi zostaną umieszczone na wykresie, odpowiednik polecenia Co narysować z menu Wykres,
- 11 wywołanie okna dialogowego *Podpis pod rysunkiem* (rys. 4.8), w którym podaje się tekst podpisu pod rysunkiem i decyduje się o jego pokazaniu, odpowiednik polecenia **Podpis** z menu **Wykres**,
- 12 włączanie / wyłączanie rysowania siatki, odpowiednik opcji Siatka z okna dialogowego Ustawienia wykresu (rys. 4.6), wywoływanego poleceniem Parametry z menu Wykres,
- 13 wywołanie okna dialogowego (rys. 4.9), w którym pokazywane są podstawowe informacje o programie.

Wózek umieszczony na ekranie służy do dwóch celów:

1. pokazywania aktualnego położenia wózka podczas symulacji (animacja),

2. ustawiania położenia początkowego, z którego startują obliczenia. W celu zmiany tego parametru, należy kursorem myszy najechać na wózek, wcisnąć lewy klawisz myszy, ustawić wózek w żądanym położeniu i puścić lewy klawisz myszy. W prawym górnym rogu obszaru użytkowego okna, podczas przesuwania wózka jest wyświetlane jego aktualne położenie.

<u>Wskaźnik położenia zadanego</u> służy, oprócz spełniania funkcji wynikającej z jego nazwy, także do ustawiania wartości zadanej położenia. Czyni się to w sposób analogiczny do podejścia stosowanego przy zmianie położenia początkowego wózka na bieżni. Informacja o aktualnej wartości zadanej, podczas jej ustawiania, jest również wyświetlana w prawym górnym rogu obszaru użytkowego okna.

<u>Bieżnia</u> po której porusza się wózek ma podziałkę, dzięki której można zorientować się, w jakim położeniu znajduje się on w danej chwili (strzałka pod wózkiem to wskazuje). Ponadto podczas rozciągania lub zwężania okna, zmienia ona swoją długość dostosowując się do aktualnej szerokości okna.

<u>Okno wykresu</u> można umieścić w dowolnym miejscu ekranu monitora. Można je skalować (w pewnych granicach — zostały przyjęte jego minimalne wymiary). Między innymi od jego wymiarów zależy to, czy podpis zostanie wyświetlony, czy nie — jego wysokość nie może przekraczać połowy wysokości rysunku.

Na <u>pasku stanu</u> wypisywane są krótkie podpowiedzi do poleceń z menu rozwijalnego i przycisków z paska narzędzi. Wystarczy na któryś z tych obiektów najechać kursorem myszy i wcisnąć lewy klawisz myszy (nie puszczając go), aby pojawiła się informacja o przeznaczeniu wskazanego polecenia lub przycisku.

5. Symulator urządzenia sterującego

5.1. Wstępne informacje o programie symulatora

Symulator urządzenia sterującego napisano używając kompilatora *Visual* C++ v. 1.5, firmy *Microsoft*. Jest on przeznaczony do współpracy z symulatorem obiektu opisanym w rozdz. 4, działającym na innym komputerze. Łączność pomiędzy tymi programami jest zapewniona za pośrednictwem kart ADDA wejść i wyjść analogowych. Karty te oprogramowano używając sterowników dołączonych do nich przez producenta. Widok ekranu omawianego symulatora urządzenia sterującego o nazwie *Regulator* przedstawia rys. 5.1. Symulator regulatora oblicza, na podstawie dostarczonych danych, wartość sterowania i udostępnia ją symulatorowi obiektu.



Rys. 5.1. Ekran symulatora urządzenia sterującego; A — pasek menu, B — pasek narzędzi, C — wartości zmiennych podczas symulacji, D — pasek stanu

Do dyspozycji użytkownika jest pasek menu oraz pasek narzędzi. Ponadto wartość zadana, położenie bieżące wózka na bieżni (otrzymane np. z symulatora obiektu albo z obiektu rzeczywistego) oraz wartość napięcia sterującego (wyjście regulatora) są wypisywane w oknie i zmieniają się na bieżąco podczas prowadzenia symulacji. Oprócz położenia wózka na bieżni, z symulatora obiektu są również odczytywane wartości prądu płynącego w ruchomej zwojnicy. Służą one do wybierania modeli lokalnych w regulatorze rozmytym i w obserwatorze rozmytym. Podstawowe informacje o poleceniach programu są wyświetlane na pasku stanu.

5.2. Obsługa programu

Użytkownik komunikuje się z programem za pośrednictwem menu rozwijalnego. Przy pomocy części poleceń wywołuje się okna dialogowe, w których można zmieniać dane potrzebne do funkcjonowania programu. W celu ułatwienia obsługi, polecenia są wyprowadzone w postaci klawiszy na pasek narzędzi. Okno symulatora dysponuje oprócz menu rozwijalnego, także standardowym menu systemowym, znajdującym się w jego lewym górnym rogu.

W menu **Plik** (z paska menu), dostępne jest jedynie polecenie **Koniec**, które służy do natychmiastowego opuszczenia programu.

W menu Wyślij, dostępne są dwa polecenia: Wartość zadana i Start.

Po wybraniu polecenia Wartość zadana, na ekranie pojawia się okno dialogowe Ustawie-

| 🛥 Ustawienia | |
|---------------------------|--------|
| Wartość zadana 0.2 | OK |
| Sodyfikator Regulator PID | Anuluj |

nia (rys. 5.2). W oknie tym znajduje się pole, w którym można podać wartość położenia zadanego (z przedziału [0; 1]). Oprócz tego znajduje się tam opcja **regulator PID**, po wybraniu której algorytm regulacji jest zmieniany

Rys. 5.2. Okno dialogowe polecenia Wartość zadana

z algorytmu ze sprzężeniem od stanu obserwowanego, na algorytm PID. Dostępne regulatory są takie same, jak ich odpowiedniki używane do symulacji układu regulacji na jednym komputerze, z symulatora obiektu. Ponadto, jeśli wybrana jest opcja **regulator PID**, można również wybrać opcję **Modyfikator**, która włącza człon dwuinercyjny na wejściu wartości zadanej.

W sytuacji z rys. 5.2, wartość zadana położenia wynosi 0,2. Ponieważ opcja **regulator PID** nie jest wybrana, więc jest włączony regulator ze sprzężeniem od stanu i obserwator, a ponadto opcja **Modyfikator** jest nieaktywna i nie można jej przełączyć.

Polecenie **Start**, z menu **Wyślij** służy do rozpoczęcia pracy programu. Jeśli podczas korzystania z karty PCL–812 pojawi się jakiś błąd, wówczas jest wyświetlane odpowiednie okno dialogowe z komunikatem przesyłanym przez sterownik. Taka sytuacja może mieć miejsce podczas uruchomienia programu na komputerze, na którym nie jest zainstalowana wspomniana karta.



Ostatnie menu, o nazwie Pomoc, zawiera polecenie O Regulatorze, które wyświetla osobne okno, z podstawowymi informacjami o programie. Okno to jest

standardowo zamieszczane w programach. Jego wyglad przedstawia rys. 5.3.

Oprócz paska menu, wprowadzono również <u>pasek narzędzi</u>, na którym zostały umieszczone klawisze do wywoływania poleceń, aby ułatwić dostęp do nich. Rys. 5.4 przedstawia pasek narzędzi z programu symulatora urządzenia sterującego.

| | IRI | Ľ | ů |
|---|-----|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 2 | 3 | 4 |

Rys. 5.4. Widok paska narzędzi symulatora urządzenia sterującego

Opis poszczególnych klawiszy:

- 1 natychmiastowe wyjście z programu, odpowiednik polecenia Koniec z menu Plik,
- 2 wywołanie okna dialogowego Ustawienia (rys. 5.2), w którym podaje się wartość zadaną oraz wybiera się regulator, który ma być użyty podczas symulacji, odpowiednik polecenia Wartość zadana z menu Wyślij,
- 3 rozpoczęcie symulacji, odpowiednik polecenia Start z menu Wyślij,
- 4 wywołanie okna dialogowego (rys. 5.3), w którym pokazywane są podstawowe informacje o programie.

Na <u>pasku stanu</u> wypisywane są krótkie podpowiedzi do poleceń z menu rozwijalnego i przycisków z paska narzędzi. Aby uzyskać informację o przeznaczeniu wybranego polecenia lub przycisku, należy na któryś z tych obiektów najechać kursorem myszy i wcisnąć lewy klawisz myszy (nie puszczając go).

6. Badanie działania zespołu symulatorów na dwóch komputerach

6.1. Opis konfiguracji komputerów tworzących stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne składa się z dwóch komputerów PC połączonych interfejsem analogowym (rys. 6.1 i 6.2). Każda z maszyn jest przeznaczona do uruchomienia na niej jednego z opracowanych symulatorów. Symulatory elementów układu sterowania (symulator obiektu i symulator regulatora) pracują na różnych komputerach. Wybór miejsca działania konkretnego symulatora zależy od operatora stanowiska laboratoryjnego.

Poniżej opisano konfigurację każdego z komputerów:

komputer PC1 jest wyposażony w:

- procesor 486DX2 80 MHz,
- 20 MB RAM,
- kartę graficzną Trident 8800,
- kartę Multi I/O z kontrolerami FDD i HDD,
- dysk twardy o pojemności ~500 MB,
- stacje dysków miękkich 3,5" oraz 5,25",
- kartę ADDA PCL-812 firmy ADVANTECH,
- monitor monochromatyczny,
- mysz i klawiaturę;

komputer PC2 (firmy ACER) jest wyposażony w:

- procesor 486DX4 100 MHz,
- 20 MB RAM,
- zintegrowany z płytą główną układ graficzny firmy Cirrus Logic,
- zintegrowane z płytą główną układy I/O oraz kontrolery FDD i HDD,
- dysk twardy o pojemności ~200 MB,
- stację dysków miękkich 3,5",
- kartę ADDA PCL-812 firmy ADVANTECH,
- monitor kolorowy,
- mysz i klawiaturę.



Rys. 6.1. Schemat stanowiska laboratoryjnego

Fotografię stanowiska laboratoryjnego przedstawia rys. 6.2.



Rys. 6.2. Wygląd stanowiska laboratoryjnego: 1, 2 — monitory, 3 — komputer PC1, 4 — komputer PC2, 5 — sterownik PLC

6.2. Różnice między symulacją układu sterowania na jednym komputerze i w zestawie dwukomputerowym

Na rys. 6.3 — 6.5 przedstawiono wyniki symulacji układów regulacji na dwóch i na jednym komputerze:

- odpowiedzi układów sterowania z regulatorem PID na skok jednostkowy wartości zadanej ($x_{zad} = 0,5$) i na skok zakłócenia podany na wejście obiektu, w chwili t = 5 s (rys. 6.3),
- odpowiedzi układu sterowania z regulatorem PID i z modyfikatorem w postaci członu dwuinercyjnego, umieszczonego na wejściu układu (rys. 6.4),

 — odpowiedzi układu sterowania z regulatorem II, ze sprzężeniem od stanu obserwowanego (rys. 6.5).

Podczas symulacji układów regulacji na dwóch komputerach, przesyłane sygnały są zaszumione (szczególnie sygnału sterowania). Dotyczy to wszystkich trzech badanych układów sterowania.

Charakter odpowiedzi na skok zakłócenia *z*, podany na wejście obiektu, pozostał we wszystkich przypadkach bez większych zmian.

Odpowiedzi na skok zadania na dwóch maszynach różniły się natomiast, od przebiegów uzyskanych podczas symulacji na jednym komputerze, we wszystkich trzech przypadkach.

Najmniejsze różnice wystąpiły w przypadku układu sterowania z regulatorem PID i modyfikatorem (członem dwuinercyjnym), maksymalna wartość sterowania przy $x_{zad} = 0,5$ wyniosła: 6,36 V w przypadku symulacji na jednym komputerze (rys. 6.4*c*) i 6,33 V — na dwóch komputerach (rys. 6.4*d*). Kształt przebiegów położenia nie zmienił się (rys. 6.4*a* i 6.4*b*) — w obu przypadkach układ dochodził do wartości zadanej bez oscylacji.

Dla układu sterowania z regulatorem PID, bez modyfikatora (rys. 6.3) kształt obu odpowiedzi był podobny z wyjątkiem początkowej części przebiegów (od 0 do 0,1 s). Maksymalne wartości położenia i sterowania były większe podczas symulacji na dwóch maszynach maksymalna wartość sterowania wyniosła: ok. 14,8 V podczas symulacji na jednym komputerze (rys. 6.3*c*) i 20,0 V — na dwóch maszynach (rys. 6.3*d*), zaś przeregulowanie, odpowiednio: 10,6 % (rys. 6.3*a*) i 13,8 % (rys. 6.3*b*).

Dla układu regulacji z regulatorem II ze sprzężeniem od stanu z obserwatorem sterowanie osiągnęło: 3,6 V podczas symulacji na jednym komputerze (rys. 6.5c) i 7,1 V — na dwóch komputerach (rys. 6.5d). Duża różnica wystąpiła na początku odpowiedzi — w przypadku symulacji na dwóch komputerach, oprócz większych wartości sterowania, wystąpił chwilowy spadek wartości położenia, co widać na rys.6.5b.

Różnice występujące pomiędzy wynikami badań układów sterowania na jednym i na dwóch komputerach są spowodowane szeregiem przyczyn. Można do nich zaliczyć: \diamond zakłócenia występujące podczas przesyłania danych pomiędzy komputerami, \diamond kwantyzację sygnałów oraz \diamond różnice w "szybkości upływu czasu" dla obu komputerów wynikające z tego, że odmierzanie 0,01 s w każdym komputerze jest czynione z pewną dokładnością. Nawet, jeśli jest ona duża, to po zsumowaniu błędów (np. po 10 s), różnice mogą być już zauważalne.



Rys. 6.3. Wyniki symulacji układu regulacji z regulatorem PID na jednym (a, c) i na dwóch (b, d) komputerach: a), b) przebiegi położenia; c), d) przebiegi sterowania



Rys. 6.4. Wyniki symulacji układu regulacji z regulatorem PID i z członem dwuinercyjnym na jednym (a, c) i na dwóch (b, d) komputerach: a), b) przebiegi położenia; c), d) przebiegi sterowania



Rys. 6.5. Wyniki symulacji układu regulacji z regulatorem II z obserwatorem na jednym (a, c) i na dwóch (b, d) komputerach: a), b) przebiegi położenia; c), d) przebiegi sterowania

6.3. Możliwość dalszego wykorzystania zestawu

Omawiane stanowisko laboratoryjne można wykorzystać, poza badaniami opisanego układu sterowania położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym, także do symulacji innych układów regulacji. Ponadto można zestawić ze sobą różne elementy służące razem do badania układów sterowania.

Oprogramowanie wykonane w ramach pracy można wykorzystywać w różnych zestawach laboratoryjnych do badania układów ze sprzężeniem zwrotnym. Możliwe konfiguracje pokazano na poniższych rys. 6.6 — 6.8.



Rys. 6.6. Model urządzenia sterującego na pierwszym komputerze i model obiektu na drugim komputerze (wykonano w ramach niniejszej pracy)



Rys. 6.7. Sterownik i model obiektu na komputerze



Rys. 6.8. Model urządzenia sterującego na komputerze i rzeczywisty obiekt

7. Podsumowanie wyników badań i wnioski

W niniejszej pracy zaprezentowano syntezę regulatora położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym znajdującego się w laboratorium Instytutu Automatyki i Informatyki Stosowanej.

Interesujące jest podejście do identyfikacji badanego obiektu metodą regulacji dwupołożeniowej, które przyniosło dobre rezultaty pomimo astatycznego i silnie nieliniowego charakteru obiektu (rozdz. 2.2). Ponadto, wyniki uzyskane tą metodą są szczególnie przydatne do opracowania rozmytego regulatora regułowego (rozdz. 3).

Podczas badania rozmytych regulatorów regułowych dostrzeżono problemy związane ze stosowaniem modeli Takagi — Sugeno. Ważne jest, jaki punkt wybierze się za reprezentatywny dla danego podprzedziału rozmycia (rozdz. 3.2), jak również sposób podziału zmiennych na te podprzedziały i wybór kształtu funkcji przynależności (rozdz. 3.3). Trudności ze stosowaniem modeli Takagi — Sugeno związane z brakiem algorytmów wykonania wymienionych czynności projektowych są jednak rekompensowane możliwością modelowania skomplikowanych obiektów przy pomocy prostych, liniowych zależności.

Prace nad udoskonaleniem regulatora ze sprzężeniem od stanu, przyniosły zadowalające rezultaty (rozdz. 3.6). Przez dobór odpowiednich biegunów możliwe jest znalezienie układu regulacji o żądanych właściwościach (np. o przebiegach podobnych do tych, jakie uzyskuje się w układzie sterowania z regulatorem PID lub o sygnale sterowania nie przekraczającym założonego zakresu wartości). Niestety proces szukania jest czasochłonny i wymaga przeprowadzenia wielu badań symulacyjnych.

Zbadano również możliwość zastosowania modyfikatora na wejściu układu regulacji w celu zmniejszenia maksymalnych wartości sterowania w odpowiedzi skokowej przy niezmienionej odpowiedzi na skok zakłócenia (rozdz. 3.7).

Przedstawiony w pracy tok postępowania prowadzący do opracowania układu regulacji położenia wózka silnika o ruchu prostoliniowym może być wykorzystany (w częściach lub w całości), także w przypadku innych silnie nieliniowych obiektów.

Symulacje prowadzone na dwóch komputerach, pokazały, że opracowane regulatory działają dobrze pomimo zakłóceń towarzyszących przekazywaniu danych (rozdz. 6).

Zestawione stanowisko laboratoryjne wraz z symulatorami opracowanymi z myślą o ich łatwej obsłudze i dającymi możliwość wielorakiego obserwowania wyników symulacji, nadaje się również do badania różnych układów regulacji (nie tylko tego przedstawionego w niniejszej pracy), w różnych konfiguracjach sprzętowych (rozdz. 6.3).

8. Dodatki

8.1. Dobieranie skali czasu w symulatorach

Symulator urządzenia sterującego i symulator obiektu, zostały opracowane tak, aby naśladowały rzeczywistość. Dlatego brak jest jakichkolwiek powiązań pomiędzy oboma programami. Jednak istnieje wspólna wielkość zarówno dla obiektu jak i dla urządzenia sterującego — jest nią czas płynący tak samo dla obu urządzeń.

Podczas korzystania z opracowanych programów może się zdarzyć, i miało to miejsce, że symulatory zostaną uruchomione na dwóch komputerach działających z różną szybkością. Ponadto czas wykonania jednego obiegu pętli w symulatorze obiektu jest różny (dłuższy) od czasu, potrzebnego na przeprowadzenie jednej iteracji w symulatorze urządzenia sterującego. Dlatego, w celu umożliwienia wzajemnej współpracy programów, wprowadzono do nich odmierzanie jednakowego czasu (obliczenia w każdym z symulatorów powtarzane są co 0,01 s).

Wykorzystano do tego celu jeden z liczników dostępnych na karcie PCL-812. Poniżej przedstawiono fragmenty programu, służące do odmierzania czasu (napisane w asemblerze i wstawione do programu w języku C).

```
//Sprawdzanie zawartości licznika
_asm
{
         mov dx, ADRES REJ KONTROLNEGO
wroc:
                                                                  //w dx adres rejestru kontrolnego
         mov al,0000000b
                                                                  //wybór licznika 0 i odczytu z zatrzaśnię-
                                                                  ciem
         out dx,al
                                                                  //przesłanie do rejestru kontrolnego
         mov dx, ADRES_LICZNIKA_0
                                                                  //w dx adres licznika 0
         in al,dx
                                                                  //w al młodszy bajt zawartości licznika
         mov ah,al
                                                                  //przesłanie zawartości al do ah
         in al.dx
                                                                  //w al starszy bajt zawartości licznika
         xchg al,ah
                                                                  //zamiana miejscami al z ah (w ax to, co
                                                                  odczytano z licznika)
         cmp ax, PRZEDZIAL CALY
                                                                  //porównanie zawartości ax z liczbą, po
                                                                  której koniec odliczania
        jb wroc
                                                                  //jeśli poniżej, to wróć, jeśli nie - przerwij
}
```

//Ustawianie licznika _asm mov dx,ADRES_REJ_KONTROLNEGO mov al.00110000b

out dx,al mov dx,ADRES_LICZNIKA_0 mov al,PRZEDZIAL_LSB out dx,al

mov al,PRZEDZIAL_MSB out dx,al //w dx adres rejestru kontrolnego
//wybór licznika 0 i zapisu najpierw bajtu
mniej znaczącego, potem — bardziej znaczącego
//przesłanie do rejestru kontrolnego
//w dx adres licznika 0
//w al mniej znaczący bajt
//przesłanie do licznika

//w al mniej znaczący bajt //przesłanie do licznika

}

{

Pierwsza część (sprawdzanie zawartości licznika) działa w ten sposób, że dopóki nie minie określony czas T_k , program krąży w pętli i cyklicznie odczytuje zawartość licznika. Czas $T_k = 0,01$ s, ponieważ taki okres próbkowania przyjęto do syntezy regulatorów i co tyle czasu powinny być powtarzane obliczenia. Najpierw do rejestru kontrolnego wpisywany jest bajt, którego bitami wybierany jest licznik 0 i operacja odczytu zawartości licznika z zatrzaśnięciem (*counter latch operation*), dzięki której proces odliczania nie jest zakłócany. Następnie jest odczytywany mniej znaczący bajt, potem bardziej znaczący i zapisywane do rejestru *ax* tak, aby znalazło się w nim całe słowo. W dalszej kolejności liczba z rejestru *ax* jest porównywana z liczbą, jaką osiągnie licznik po odliczeniu żądanego czasu i jeśli jest ona większa od stanu licznika lub jemu równa, to program wychodzi z pętli, jeśli nie — powyższe działania są powtarzane.

Druga część (ustawianie licznika) służy do zapisania liczby odpowiadającej odmierzanemu czasowi do licznika i rozpoczęcia odliczania. W tym celu do rejestru kontrolnego jest wpisywany bajt, za pomocą którego zostaje wybrany licznik 0 i operacja zapisu najpierw mniej, a następnie bardziej znaczącego bajtu. Potem wpisywane są odpowiednie wartości i po wprowadzeniu drugiego bajtu, licznik zaczyna odliczanie.

8.2. Odpowiedzi na sygnał narastający liniowo (typu RAMP)

Ze względu na istnienie podwójnego całkowania w zaprojektowanych układach regulacji, mogą one nadążać za sygnałem typu RAMP, z zerowym uchybem. Przeprowadzono eksperymenty symulacyjne w celu poznania odpowiedzi na sygnał narastający liniowo. Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 8.1. Sygnałem zadanym była funkcja $f(t) = 0, 1 \cdot t \cdot I(t)$. Rys. 8.1*a* przedstawia odpowiedź układu regulacji z rozmytym regulatorem regułowym II ze sprzężeniem od stanu bez obserwatora, rys. 8.1*b* — układu sterowania ze sprzężeniem od stanu i z rozmytym obserwatorem regułowym, a rys. 8.1*c* — odpowiedź układu regulacji z regulatorem PID.

Ze wszystkich trzech układów regulacji najlepiej działa układ z regulatorem PID, ponieważ już na samym początku odpowiedzi (w pierwszej sekundzie) dochodzi do sygnału wejściowego i nadąża za nim. Pozostałe dwa układy sterowania niestety aż do końca symulacji mają stosunkowo duży uchyb.

Przebiegi sterowania w układach regulacji ze sprzężeniem od stanu (rys. 8.1*a* i 8.1*b*) mają nieregularny kształt w porównaniu z sygnałem sterowania uzyskanym w układzie z regulatorem PID (rys. 8.1*c*). Występują na nich fragmenty, kiedy sterowanie rośnie szybciej niż w pozostałych częściach przebiegu, a chwilami maleje (dla porównania w przypadku przebiegów uzyskanych w układzie z regulatorem PID, sterowanie cały czas rośnie, z wyjątkiem początkowej części przebiegu). Jednak generalna tendencja (wzrostu sygnału sterowania) we wszystkich trzech przypadkach jest podobna. Duża różnica między przebiegami w poszczególnych przypadkach, występuje na początku regulacji. W układach regulacji ze sprzężeniem od stanu, przebieg sterowania narasta łagodnie i stosunkowo wolno w porównaniu z przebiegiem wielkości sterującej z układu sterowania z regulatorem PID (na rys. 8.1*c* widać, że sterowanie narasta szybko i z przeregulowaniem).



Rys. 8.1. Odpowiedzi układów regulacji na sygnał narastający liniowo: a) regulator ze sprzężeniem od stanu (regulator II) bez obserwatora; b) z obserwatorem; c) z regulatorem PID

8.3. Opis tarcia

W pracy uwzględniono wpływ różnych rodzajów sił tarcia na ruch zwojnicy silnika o ruchu prostoliniowym. Są to siły tarcia:

 $-F_v$ — liniowego (prędkościowego nazywanego tarciem lepkim albo wiskotycznym),

 $-F_c$ — coulombowskiego.

Tarcie lepkie F_{ν} , zależy, w przybliżeniu, liniowo od prędkości poruszającego się ciała (rys. 8.2).



Rys. 8.2. Zależność siły tarcia lepkiego od prędkości

Przybliżoną zależność siły tarcia coulombowskiego od prędkości pokazuje rys. 8.3.



Rys. 8.3. Przybliżona zależność siły tarcia coulombowskiego od prędkości: F_{sm} — siła tarcia statycznego; F_d — siła tarcia dynamicznego

Największa wartość siły tarcia spoczynkowego (F_{sm}), jest to ta wartość którą musi przekroczyć siła działająca na ciało, aby wprawić je w ruch. Jeśli natomiast na ciało znajdujące się w spoczynku, działa siła o wartości $F_1 < F_{sm}$, to nie porusza się ono, a w takim razie siła \vec{F}_1 , jest równoważona właśnie przez siłę tarcia spoczynkowego. W rozważanym przypadku siła tarcia spoczynkowego ma więc wartość F_1 i zwrot przeciwny do zwrotu siły \vec{F}_1 .

W badaniach symulacyjnych przyjęto uproszczony model tarcia coulombowskiego z tarciem spoczynkowym, w postaci członu z nasyceniem o nachyleniu 10.

9. Bibliografia

- [1] Jerzy Pułaczewski: *Identyfikacja i koncepcja regulacji cyfrowej nieliniowego obiektu dynamicznego o niejednoznacznej charakterystyce*, raport I. A. i I. S., 1996.
- [2] Jerzy Pułaczewski: Podstawy algorytmów sterowania 1. Notatki z wykładu.
- [3] Konstanty J. Kurman: *Teoria regulacji podstawy, analiza, projektowanie*. WNT, Warszawa, 1975.
- [4] Yasundo Takahashi, Michael J. Rabins, David M. Auslander: Sterowanie i systemy dynamiczne. WNT, Warszawa, 1976.
- [5] Poradnik inżyniera automatyka praca zbiorowa. WNT, Warszawa, 1973.
- [6] George J. Thaler, Marvin P. Pastel: *Nieliniowe układy automatycznego sterowania*. WNT, Warszawa, 1965.
- [7] PCL-812 Enhanced multi lab card user's manual.
- [8] Jan Bielecki: *Microsoft Visual C++*. Notatki z wykładu.
- [9] Brian W. Kernighan, Dennis M. Ritchie: Język C. WNT, Warszawa, 1988.
- [10] William H. Murray III, Chris H. Pappas: *Windows 3.1 programming*. Osborne McGraw– –Hill 1992.