

Projektowanie algorytmów sterujących w układach sterowanych napięciowo i prądowo

Mariusz Pauluk *

Rozwój techniki mikroprocesorowej sprawia, że nawet dla skomplikowanych systemów mechatronicznych coraz łatwiej jest spełnić wymogi sterowania w czasie rzeczywistym. Duża moc obliczeniowa powszechnie dostępnych mikroprocesorów pozwala na zastosowanie bardziej dokładnych modeli matematycznych [3, 4, 5, 7]. Stopniowo ciężar prac związanych z konstrukcją algorytmów sterowania jest przenoszony z optymalizacji kodu regulatora na dokładność zamodelowania zjawisk fizycznych zachodzących w regulowanym obiekcie. Korzyści z takiego podejścia są oczywiste [1]. Dokładny model matematyczny to:

- precyzyjne i oszczędne energetycznie sterowanie
- spełnienie warunku koniecznego dla sterowania optymalnego
- bardziej odporne działanie regulatora na nieprzewidziane zdarzenia występujące podczas procesu regulacji
- dokładniejsze prognozy zachowania układu.

W rozwiązaniach przemysłowych [2] najczęściej są dostępne dwa rodzaje sterowania obiektem: siłowe i prędkościowe. Praktyczna realizacja pierwszego sprowadza się na ogół do regulacji prądu przepływającego przez silnik. Sterowanie prędkościowe w najprostszej wersji polega na utrzymywaniu zadanego (proporcjonalnego do sterowania) napięcia na uzwojeniach silnika. Spotykana jest także inna odmiana sterowania napięciowego (prędkościowego) – PWM (*Pulse Width Modulation*). Wybór rodzaju sterowania wiąże się nie tylko ze zmianami w równaniach modelu matematycznego, ale także z innym podejściem do identyfikacji parametrów tych równań. W artykule omówiono powyższe rodzaje sterowań: prądowe i dwie odmiany sterowania napięciowego, a także ich wpływ na proces konstrukcji regulatora i identyfikacji obiektu. Rozważania teoretyczne zostały zweryfi-

kowane na dwóch modelach laboratoryjnych suwnicy 3D, opisywanych za pomocą dziesięciu nieliniowych równań różniczkowych. Sterowanie suwnicami odbywa się w czasie rzeczywistym.

Poniższe modele laboratoryjne są przydatnymi obiektami do zdobywania doświadczeń w zakresie konstrukcji i weryfikacji algorytmów sterujących [5, 7]. Ich zachowanie pod wieloma aspektami jest podobne do reakcji na sterowanie prawdziwych suwnic przemysłowych. Dzięki temu są pomocne w analizie problemu stabilizacji masy zawieszonyj na linie, jak również w konstrukcji algorytmów kompensujących zakłócenia, których źródłem w przemysłowych aplikacjach są np. wiatr lub fale morskie [2].

Modele laboratoryjne

W badaniach wykorzystano dwa modele laboratoryjne suwnic trójwymiarowych. Pierwszy – (a), zbudowano w Katedrze Automatyki AGH (rys. 1). Suwnica ma szerokość 1,5 m i długość 2,5 m. Tabele 1 i 2 zawierają podstawowe parametry suwnicy.

Tabela 1. Podstawowe parametry silników napędowych – suwnica (a)

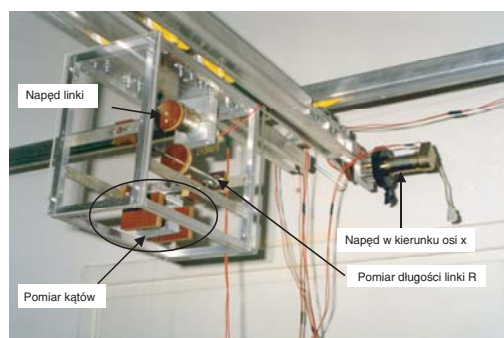
Nazwa parametru	Wartość
Napięcie znamionowe zasilania silnika U_z	24 V
Stała czasowa mechaniczna silnika τ_m	$21 \cdot 10^{-3}$ s
Stała czasowa elektryczna silnika τ_e	$0,48 \cdot 10^{-3}$ s
Rezystancja uzwojenia silnika R_{sil}	12,5 Ω
Indukcyjność rozproszona silnika L_{sil}	$5,93 \cdot 10^{-3}$ H
Stała momentu napędowego k_m	0,0265 N·m/A
Przekładnia silnika p	60,5
Stała elektryczna k_e	0,02607 V·s/rad

* dr inż. Mariusz Pauluk – Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza

Tabela 2. Podstawowe parametry suwnicy (a)

Nazwa parametru	Wartość
Szerokość suwnicy	1,5 m
Długość suwnicy	2,5 m
Masa wózka m_w	2,49 kg
Masa szyny m_s	4,09 kg
Masa obciążnika (ładunek) m_c	1 kg
Promień bloków napędzających suwnicę R_n	0,0185 m

Wózek z podwieszonym obciążnikiem może przemieszczać się w płaszczyźnie poziomej, wzdłuż kierunków x i y , a także może podnosić lub opuszczać obciążnik wzdłuż kierunku z (rys. 3). Suwnicę można sterować napięciowo lub prądowo.

**Rys. 1.** Suwnica laboratoryjna – model edukacyjny (a)**Rys. 2.** Suwnica laboratoryjna, model edukacyjny (b)

Drugi obiekt (b) jest modelem trójwymiarowej suwnicy (rys. 2), produkowanym komercyjnie [8], który także może przemieszczać ładunek w trzech wymiarach. Suwnica (b) jest wyposażona w interfejs sterujący typu PWM. Jej szerokość, długość i wysokość wynoszą 1 m, a podwieszony obciążnik ma masę 1 kg.

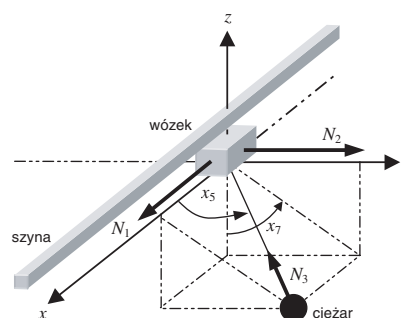
Obydwa modele laboratoryjne są zintegrowane ze środowiskiem MATLAB-Simulink, w którym odbywa się proces regulacji w czasie rzeczywistym. Środowisko to, uzupełnione przybornikiem (*toolbox*) czasu rzeczywistego [9], pozwala zmieniać parametry układu sterowania w trakcie eksperymentu, jak również obserwować na bieżąco wybrane przebiegi [6].

Napęd suwnic realizują trzy silniki prądu stałego wyposażone w przekładnie. Podłączone do silników

wały z zębatkami zamieniają ruch obrotowy na posuwisty. Na wałach są umieszczone także czujniki enkoderowe mierzące kąt obrotu wału. Dwa dodatkowe czujniki kąta obrotu są umieszczone w mechanizmie wózka. Mierzą one kąty odchylenia liny od pionu w dwóch płaszczyznach (rys. 3).

Model matematyczny

Rozważania nad konstrukcją algorytmu sterującego rozpoczęto od matematycznego opisu zjawisk fizycznych zachodzących podczas przemieszczania ładunku. Przyjęto oznaczenia kierunków, kątów, a także określono siły działające w układzie (rys. 3).

**Rys. 3.** Przyjęte oznaczenia kierunków, kątów i sił

Mierzone wielkości fizyczne:

x_1 – odległość wózka od środka szyny,

x_3 – odległość wózka z szyną od środka ramy konstrukcji,

x_9 – długość liny,

x_5 – kąt pomiędzy osią x a linką,

x_7 – kąt pomiędzy ujemną częścią osi z a rzutem długości liny na płaszczyznę yz .

Przyjęto także oznaczenia:

u – wektor sterowania,

u_1 – składowa wektora sterowania w kierunku x ,

u_2 – składowa wektora sterowania w kierunku y ,

u_3 – składowa wektora sterowania wzdłuż linki,

N_1 – wypadkowa siła sterująca w kierunku osi x ,

N_2 – wypadkowa siła sterująca w kierunku osi y ,

N_3 – wypadkowa siła sterująca wzdłuż linki,

k_1, k_2, k_3 , – współczynniki tarcia w kierunkach x, y i w kierunku linki.

Dokładny opis modelu matematycznego trójwymiarowej suwnicy można znaleźć w [3, 4]. Założono, że tarcie kinematyczne występujące w układzie jest proporcjonalne do odpowiedniej składowej prędkości. Tak więc składowe siły wypadkowej można opisać następująco:

$$N_1 = u_1 - k_1 x_2 \quad (1)$$

$$N_2 = u_2 - k_2 x_4 \quad (2)$$

$$N_3 = u_3 + k_3 x_{10} \quad (3)$$

Przy wyprowadzaniu równań pominięto tarcie statyczne ze względu na nieciągłości jakie wprowadza ono do prawych stron równań różniczkowych. Tarcie statyczne zostało skompensowane w regulatorze.

Następujący układ dziesięciu nieliniowych równań różniczkowych opisuje zachowanie suwnicy:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= N_1 + \mu_1 c_5 N_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= N_2 + \mu_2 s_5 s_7 N_3 \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= (s_5 N_1 - c_5 s_7 N_2 + (\mu_1 - \mu_2 s_7^2) c_5 s_5 N_3 + V_5) / x_9 \\ \dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= -(c_7 N_2 + \mu_2 s_5 c_7 s_7 N_3 + V_6) / (s_5 x_9) \\ \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= -c_5 N_1 - s_5 s_7 N_2 - (1 + \mu_1 c_5^2 + \mu_2 s_5^2 s_7^2) N_3 + V_7 \quad (4)\end{aligned}$$

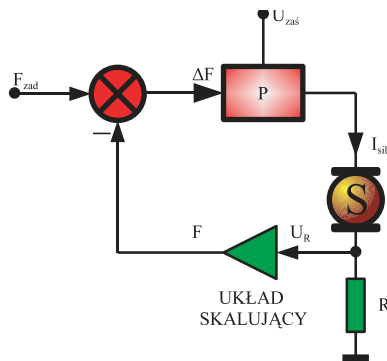
gdzie:

$$\begin{aligned}s_n &\equiv \sin(x_n) \\ c_n &\equiv \cos(x_n) \\ V_5, V_6 \text{ i } V_7 &\text{określają nieliniowe funkcje trygonometryczne} \\ V_5 &= c_5 s_5 x_8^2 x_9 - 2x_{10} x_6 + g c_5 c_7 \\ V_6 &= 2x_8 (c_5 x_6 x_9 + s_5 x_{10}) + g s_7 \\ V_7 &= s_5^2 x_8^2 x_9 + g s_5 c_7 + x_6^2 x_9\end{aligned}$$

Sterowanie siłą

W przedstawionym modelu matematycznym elementami wektora sterowania u są siły. Taki model jest wygodny przy konstrukcji algorytmu sterującego. Jego fizyczny charakter ułatwia także intuicyjną analizę zachowania się obiektu.

Praktyczna realizacja sterowania prądowego nie jest trudna. Najczęściej w obwodzie zasilania silnika umieszcza się czujnik, np. rezystor o małej rezystancji. Napięcie zmierzone na rezystorze jest proporcjonalne do prądu przepływającego przez uzwojenie silnika, a to z kolei jest proporcjonalne do momentu siły, z jaką wał silnika jest napędzany. Sygnał z rezystora zamyka pętlę sprzężenia zwrotnego układu regulacji typu P, który stabilizuje wartość zadaną siły (rys. 4).



Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy sterowania prądowego

Sterowanie prędkościowe

Ten rodzaj sterowania często występuje w zastosowaniach przemysłowych. Jest to także najbardziej naturalny sposób sterowania silnikiem prądu stałego.

Polega on na regulowaniu wartości napięcia przyłożonego do szczotek silnika.

Przyjmując oznaczenia:

U_{sil} – napięcie zasilające silnik,
 I_{sil} – prąd płynący przez cewkę silnika,
 R_{sil} – rezystancja uzwojenia silnika,
 L_{sil} – indukcyjność uzwojenia silnika,
 p – przekładnia silnika,
 k_e – stała elektrokinematyczna silnika,
 ω – prędkość wału silnika,
 M_n – moment napędowy silnika,
 k_m – współczynnik proporcjonalności momentu napędowego do prądu silnika,
 J_{sil} – moment bezwładności stojanu silnika,
 k – współczynnik tarcia,
 R_n – promień bloków napędzających suwnicę,
 M_0 – moment obciążenia silnika,
silnik prądu stałego z przekładnią można opisać następującymi równaniami:

$$U_{sil} = L_{sil} \frac{dI_{sil}}{dt} + R_{sil} I_{sil} + p k_e \omega \quad (5)$$

$$M_n = p k_m I_{sil} = J_{sil} \frac{d\omega}{dt} + R_n k \omega + M_0 \quad (6)$$

Stałe czasowe związane z indukcyjnością uzwojenia silnika oraz z momentem bezwładności można pominąć. Na ogół ich wartości są z zakresu od 0,001 s do 0,01 s. Równania 5 i 6 dla stanu ustalonego można przedstawić w prostszej formie:

$$U_{sil} = R_{sil} I_{sil} + p k_e \omega \quad (7)$$

$$M_n = p k_m I_{sil} = R_n k \omega + M_0 \quad (8)$$

Po wyliczeniu I_{sil} z równania 8 i wstawieniu do 7 otrzymamy:

$$U_{sil} = R_{sil} \frac{R_n k}{p k_m} \omega + \frac{M_0}{p k_m} + p k_e \omega$$

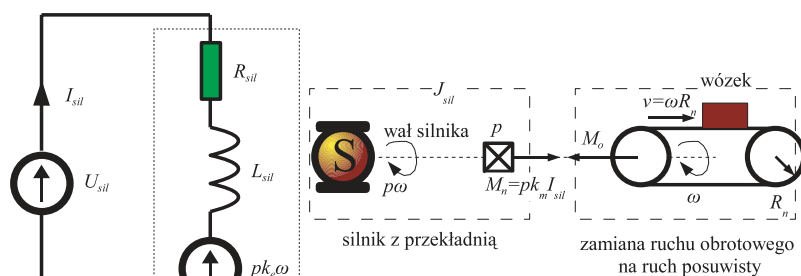
i dalej

$$U_{sil} - \frac{M_0}{p k_m} = \left(R_{sil} \frac{R_n k}{p k_m} + p k_e \right) \omega \quad (9)$$

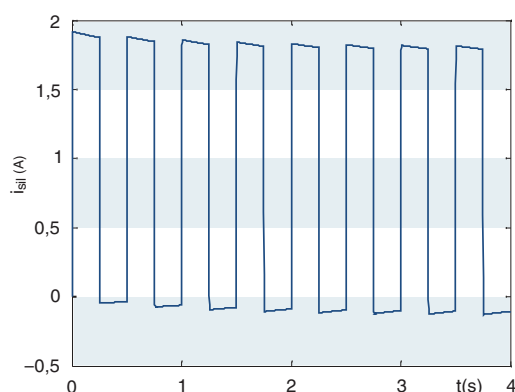
Przy zastosowaniu odpowiednio dużej przekładni, wpływ momentu obciążenia M_0 można pominąć w równaniu 9. Z równania tego wynika także, że w stanie ustalonym prędkość obrotowa silnika jest wprost proporcjonalna do przyłożonego napięcia, zatem przy takich założeniach sterowanie napięciowe można uznać za sterowanie prędkościowe.

Praktyczna realizacja sterownika, który reguluje napięcie stałe silnika proporcjonalne do sterowania jest niewygodna. Sterowniki takie charakteryzują się małą sprawnością, mają duże gabaryty i wymagają odprowadzenia dużej ilości ciepła.

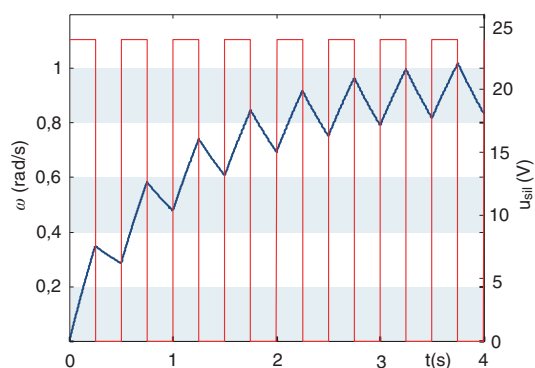
Powyższych wad nie mają sterowniki typu PWM. Jest to sterowanie także napięciowe, które jest podawane na silnik w postaci napięciowej fali prostokątnej. Sterowanie to charakteryzuje się bardzo dużym



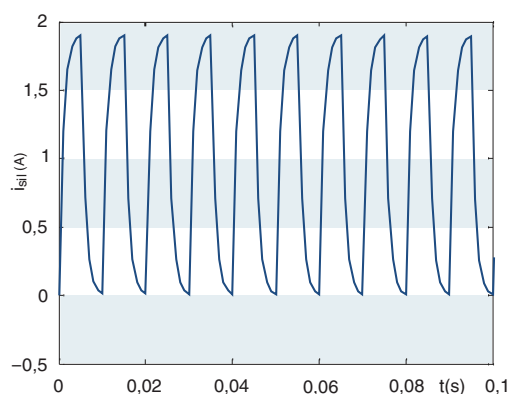
Rys. 5. Schemat blokowy układu napędowego suwnicy laboratoryjnej z silnikiem DC



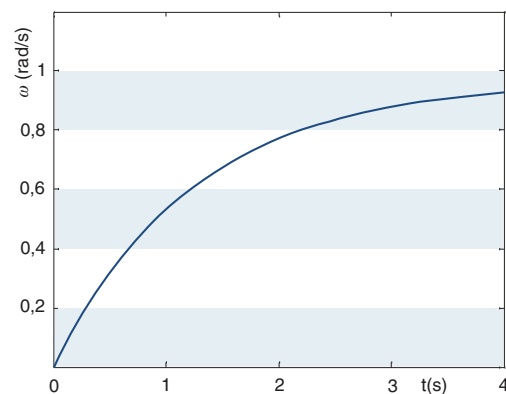
Rys. 6. Sterowanie PWM – 2 Hz, prąd silnika



Rys. 7. Sterowanie PWM – 2 Hz, prędkość kątowa – linia niebieska, sterowanie napięciowe – linia czerwona



Rys. 8. Prąd silnika, sterowanie PWM – 100 Hz



Rys. 9. Prędkość kątowa, sterowanie PWM – 100 Hz

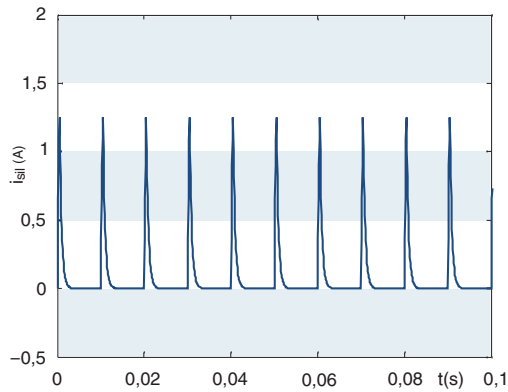
współczynnikiem sprawności, a ustalona prędkość obrotowa wału silnika jest wprost proporcjonalna do współczynnika wypełnienia fali prostokątnej.

Z równań 5 i 6 wynika, że dynamikę silnika określają dwie stałe czasowe: pierwsza jest związana z indukcyjnością silnika L_{sil} , a druga z momentem bezwładności wału silnika J_{sil} . Dla małych częstotliwości fali sterującej (poniżej 1 kHz) indukcyjność uzwojenia silnika można pominąć (rys. 6).

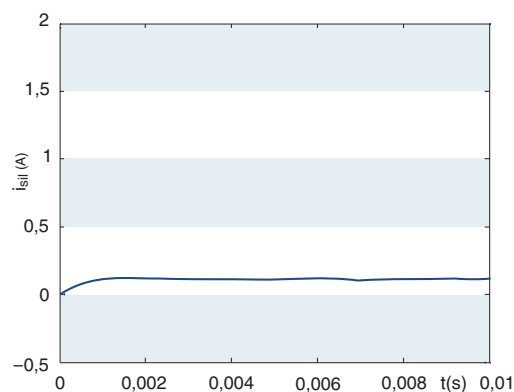
Założmy, że do silnika przyłożono napięciową falę prostokątną o współczynniku wypełnienia równym 0,5. W pierwszej połowie okresu prędkość obrotowa silnika wzrasta, a w drugiej maleje. W początkowej fazie rozruchu silnika przyrost prędkości jest większy w pierwszej połowie okresu niż jej spadek w drugiej części. Powoduje to wzrost średniej prędkości kątowej wału silnika, aż do ustalonej średniej wartości prędkości kątowej (rys. 7). Czas, po którym zostanie osiągnięta wartość ustalona prędkości kątowej, określa moment bezwładności J , im większa jest jego wartość, tym dłuższy czas dojścia do wartości ustalonej. Częstotliwość fali sterującej nie ma wpływu ani na stałą czasową powyższego przebiegu, ani na średnią wartość prędkości kątowej (rys. 7, 9, 13).

W symulacjach przedstawionych na rys. 7, 9 i 13 czas, po którym prędkość kątowa jest ustalona, wynosi około 4 s. Dobrano celowo tak długi czas, aby można było wygodnie prześledzić zjawiska zachodzące w silniku podczas sterowania falą prostokątną. W praktyce ten czas jest rzędu kilkuset milisekund.

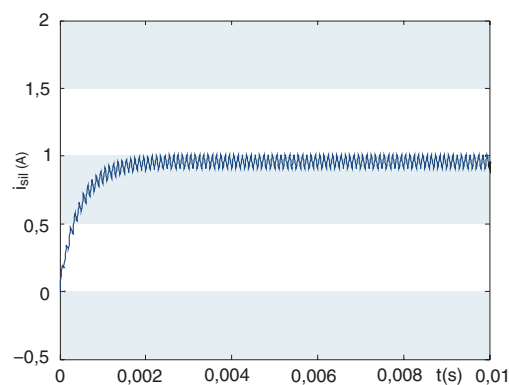
W sterownikach typu PWM częstotliwość fali sterującej jest stała i jest dobierana w zależności od wartości indukcyjności uzwojeń silnika. Z reguły przyjmuje się ją z zakresu od 100 Hz do 15 kHz. Zbyt duża częstotliwość jest przyczyną powstawania tzw. strefy martwej, czyli minimalnej wartości współczynnika wypełnienia, od której wał silnika zaczyna się obracać. Im większa jest częstotliwość, tym większa strefa martwa. Szerokość strefy martwej jest związana z występowaniem tarcia statycznego. Przy większych częstotliwościach indukcyjność uzwojenia silnika działa



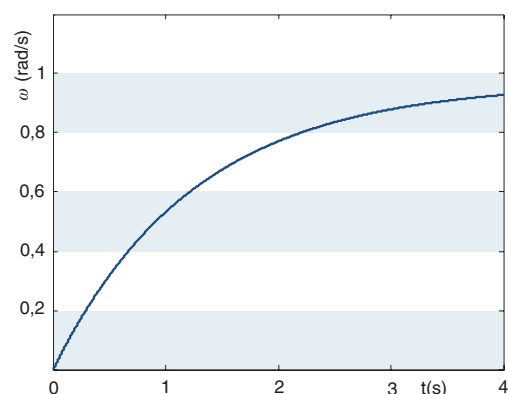
Rys. 10. Prąd silnika, współczynnik wypełnienia - 5 %, częstotliwość PWM 100 Hz



Rys. 11. Prąd silnika, współczynnik wypełnienia - 5 %, częstotliwość PWM 10 kHz



Rys. 12. Prąd silnika, sterowanie PWM - 10 kHz



Rys. 13. Prędkość kątowa, sterowanie PWM - 10 Hz

jak filtr dolnoprzepustowy (rys. 8 i 12), w szczególności dla fali sterującej o małym współczynniku wypełnienia, prąd przepływający przez silnik ma na tyle małą wartość, że indukowany moment napędowy jest mniejszy od tarcia statycznego (rys. 11). Dla fali o tym samym współczynniku wypełnienia, ale mniejszej częstotliwości chwilowa wartość prądu jest znacznie większa (rys. 10), a tym samym indukowany moment napędowy jest wystarczający do pokonania tarcia statycznego.

Wadą tego rodzaju sterowania jest charakterystyczny pogłos dźwiękowy, który powstaje wskutek drgania elementów uzwojenia z częstotliwością równą częstotliwości fali prostokątnej. Źle dobrana częstotliwość sterowania PWM może także nieco naruszyć położenie uzwojeń silnika, a to może pogorszyć jakość pracy silnika.

Schemat blokowy napędu suwnicy dla obu sterowników: napięcia stałego i fali PWM jest taki sam. Zmienia się tylko charakter źródła napięcia U_{sil} (rys. 5).

Tarcie

Problem modelowania tarcia w układach mechanicznych należy do najbardziej skomplikowanych zagadnień i w większości wypadków stanowi najpoważniejszą przeszkodę w uzyskaniu zgodności modelu matematycznego z modelem obiektem. Związane jest to z różnorodnością zjawisk fizycznych wpływających na tę wielkość, a są to m.in.: temperatura, wilgotność powietrza, naprężenia, a także siła dociskająca powierzchnie tarcie. Powyższe czynniki wpływają na to, że tarcie jest wielkością silnie nieliniową oraz niestacjonarną.

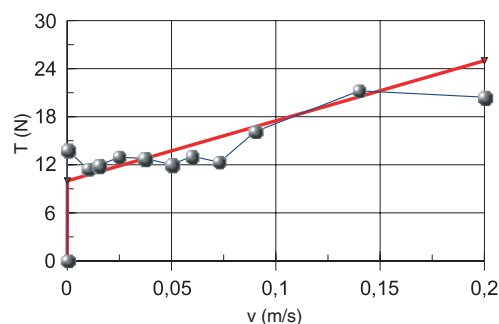
W zastosowaniach przemysłowych wartości działających sił, a także stosowane przekładnie powodują, że tarcie nie ma dużego wpływu na dynamikę układu. Sytuacja jest inna w małych i precyzyjnych układach mechatronicznych, sterowanych niedużymi siłami. Wówczas wielkości sił tarcia są porównywalne z pozostałymi siłami i ich niestacjonarność w poważny sposób utrudnia modelowanie zachowania systemu. W praktycznych realizacjach problem ten rozwiązuje się przez zastosowanie dodatkowych regulatorów, stabilizujących położenie lub prędkość układu dynamicznego poprzez ciągłą kompensację tarcia w zamkniętej pętli regulacji.

W najprostszym ujęciu przyjmuje się, że siła tarcia T składa się z tarcia statycznego T_s i lepkiego (kinematycznego), które jest wprost proporcjonalne do prędkości v , gdzie współczynnikiem proporcjonalności jest parametr k (10).

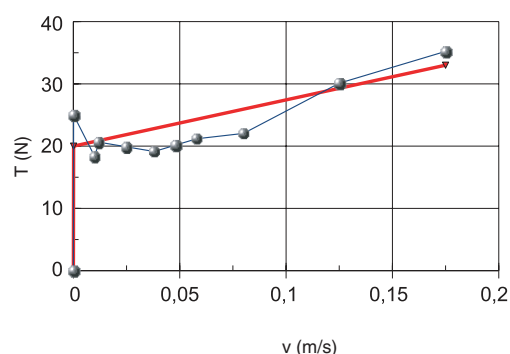
$$T = T_s \operatorname{sgn}(v) + kv \quad (10)$$

W modelu matematycznym (4) tarcie statyczne pominięto ze względu na jego nieciągłą postać i związane z tym trudności w obliczeniach numerycznych. Aby otrzymać zgodność wyników symulacyjnych z zachowaniem modelu laboratoryjnego, należy wyliczone sterowanie u zastąpić przez:

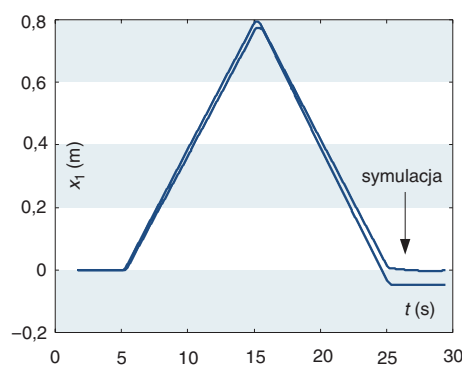
$$u := u + T_s \operatorname{sgn}(v) \quad (11)$$



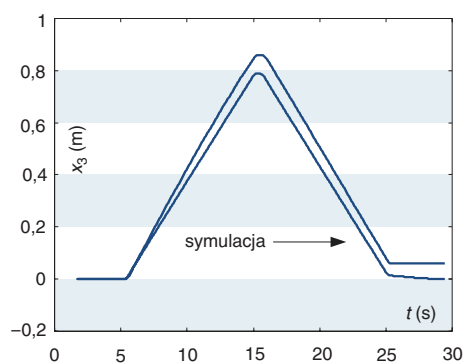
Rys. 14. Identyfikacja tarcia wzdłuż osi x – suwnica (a)



Rys. 15. Identyfikacja tarcia wzdłuż osi y – suwnica (a)



Rys. 16. Zmiana położenia wózka w osi x: eksperyment i symulacja



Rys. 17. Zmiana położenia wózka w osi y: eksperyment i symulacja

Tarcie w układach sterowanych siłą

Sterowanie siłą, spośród przedstawionych sterowań, jest najbardziej wrażliwe na niedokładności zamodelowania tarcia. Wynika to wprost z równania (6). Siła tarcia wpływa bezpośrednio na wypadkową siłę napędową, a więc każde odstępstwo siły tarcia od przyjętego modelu matematycznego pogarsza dokładność symulacji. Zgodnie z równaniem (6), ustalona prędkość kątowa silnie zależy od współczynnika tarcia k .

Rys. 14 i 15 przedstawiają wyniki identyfikacji dla modelu suwnicy (a). Gruba linia przedstawia zidentyfikowane, uśrednione tarcie zgodnie ze wzorem (6), a punkty połączone cieńszą linią prezentują przykładowe rzeczywiste wartości siły tarcia otrzymane eksperymentalnie. Rozbieżności pomiędzy przyjętą uśrednioną wartością a rzeczywistymi wynikami eksperymentalnymi wynoszą kilkanaście procent. Wartości eksperymentalne są niepowtarzalne. W każdym eksperymencie tarcie się nieco różni. W związku z powyższym, sterowanie prądowe jest mało użyteczne dla algorytmów, których efektywność silnie zależy od dokładności modelu matematycznego.

Tabele 3 i 4 zawierają zidentyfikowane uśrednione parametry tarcia. W trakcie eksperymentów z podnoszeniem i opuszczaniem obciążnika okazało się, że współczynnik k_3 jest inny gdy obciążnik jest podnoszony niż gdy jest opuszczany.

Tabela 3. Wyniki identyfikacji tarcia w kierunku osi x i y – suwnica (a)

Parametr	Wartość
T_{s1}	10 N
T_{s2}	22 N
k_1	$75 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
k_2	$75 \text{ N} \cdot \text{s/m}$

Tabela 4. Wyniki identyfikacji tarcia występującego przy podnoszeniu i opuszczaniu obciążnika – suwnica (a)

Parametr	Wartość
T_{s3}	10 N
k_g	$218 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
k_d	$142 \text{ N} \cdot \text{s/m}$

W związku z tym zmodyfikowano model tarcia, przyjmując dla ruchu związanego z podnoszeniem i opuszczaniem obciążnika (ładunku):

$$k_3 = \begin{cases} k_g & \text{dla } \dot{R} < 0 \\ k_d & \text{dla } \dot{R} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

Przeprowadzono eksperyment, w którym przesunięto wózek suwnicy (a) wzdłuż osi x i y o ok. 0,8 m, a następnie cofnięto go do pozycji wyjściowej. Przeprowadzono symulację dla takiego samego sterowania. Rysunki 16 i 17 przedstawiają zestawienie wyników eksperymentu i obliczeń numerycznych.

Przy sterowaniu siłą wyniki eksperymentalne wyraźnie różnią się od symulacji. Tarcie jest także niesymetryczne – wózek inaczej przemieszcza się podczas ruchu w stronę dodatnich wartości x_1 i x_3 , niż w stronę przeciwną.

Tarcie w układach sterowanych napięciowo

Załóżmy, że chcemy sterować stałą siłą F . Taką siłę, przy nominalnym współczynniku tarcia k_{nom} , można uzyskać, przykładając napięcie U_{nom} , które – na podstawie (5) i (6) – przedstawia się następującym wzorem:

$$U_{nom} = \left(\frac{R_{sil} R_n}{p k_m} + \frac{p k_e}{k_{nom}} \right) F \quad (13)$$

Po przyłożeniu do silnika napięcia U_{nom} silnik kręci się z prędkością kątową ω :

$$\omega = \frac{p k_m U_{nom}}{R_n R_{sil} k + p^2 k_m k_e} \quad (14)$$

Po wstawieniu wartości liczbowych, odpowiadających parametrom konstrukcyjnym i elektrycznym suwnicy (a), równanie (14) przyjmuje postać:

$$\omega = \frac{1,57 U_{nom}}{0,23 k + 2,47} \quad (15)$$

Zidentyfikowana wartość parametru k dla kierunków: x , y i z waha się w zakresie od 75 do 250. Zgodnie ze wzorem (15) wpływ zmian (kilkanaście procent) parametru k (pomnożonego przez stałą 0,23) na ruch suwnicy jest pomijalnie mały, a zatem fluktuacje tarcia są naturalnie kompensowane przy sterowaniu napięciowym.

Kompensacja zmian tarcia wynika z samej zasady działania silnika prądu stałego. Załóżmy, że przy stałym napięciu U_{nom} wzrosło tarcie, spowoduje to zmniejszenie prędkości ω , a to z kolei spowoduje wzrost prądu przepływającego przez uzwojenie silnika. Wzrost prądu silnika powoduje wzrost prędkości kątowej ω , a zatem, kompensacja tarcia odbywa się za pomocą mechanizmu ciągłej modyfikacji siły napędzającej wał silnika. Możliwe jest to dzięki występującej w naturalny sposób ujemnej pętli sprzężenia zwrotnego, w której zmniejszenie prędkości obrotowej powoduje wzrost prądu przepływającego przez uzwojenia silnika przy stałej wartości napięcia. Sytuacja jest analogiczna przy zmniejszeniu się wartości tarcia. Wówczas większa prędkość kątowa spowoduje zmniejszenie prądu silnika itd.

Na podstawie powyższych rozważań (choć nie odzwierciedla to zjawisk fizycznych zachodzących w silniku) łatwo zauważyć, że przy sterowaniu napięciowym silnik zachowywał się tak, jakby był sterowany siłą, a układ laboratoryjny miał tarcie lepkie o niezmiennym współczynniku k . Spostrzeżenie to pozwala połączyć zachowanie obiektu sterowanego napięciowo z modelem matematycznym, w którym jest sterowanie siłą. W tym celu, na podstawie odpowiedzi modelu laboratoryjnego na napięciowy skok jednostkowy, należy zidentyfikować wartość parametru k oraz współczynnik skalujący siłę na napięcie. Takie podejście jest uprawnione dopóki przekładnie w silniku są duże, a obciążnik przenoszony przez suwnicę jest na tyle mały, że jego wahania nie mają wpływu na ruch wózka. Oddziaływanie obciążnika na wózek również jest kompensowane przez sterowanie napięciowe, dlatego jeżeli to zjawisko uwidacznia się w symulacjach matematycznych (gdzie jest sterowanie siłą), to sterowanie napięciowe nie może być identyfikowane jako sterowanie siłą. W praktycznych zastosowaniach nie dopuszcza się do sytuacji, w której wahający się ładunek powoduje przemieszczanie się wózka.

Powyższe wnioski są także ważne dla sterowania typu PWM. Wynika to z faktu, że podobnie jak w sterowaniu stałym napięciem, prędkość kątowa wału silnika w stanie ustalonym zależy liniowo od sterowania (współczynnika wypełnienia). Analogicznie zachowuje się masa napędzana siłą z niezmiennym współczynnikiem tarcia kinematycznego.

W tabelach 5 i 6 zamieszczono wyniki identyfikacji tarcia dla suwnicy sterowanej falą prostokątną. Tarcie statyczne podano w jednostkach będących wartością współczynnika wypełnienia fali sterującej. Zidentyfikowany współczynnik tarcia lepkiego jest taki sam przy podnoszeniu i opuszczaniu obciążnika. Zidentyfikowane masy wynoszą: $m_w = 14$ kg, $m_s = m_c = 1$ kg.

Tabela 5. Wyniki identyfikacji tarcia wzdłuż osi x i y – suwnica (b)

Parametr	Wartość
T_{s1}	7 %
T_{s2}	7 %
k_1	350 N·s/m
k_2	375 N·s/m

Tabela 6. Wyniki identyfikacji tarcia występującego przy podnoszeniu i opuszczaniu obciążnika – suwnica (b)

Parametr	Wartość
T_{s3}	5 %
k_3	417 N·s/m

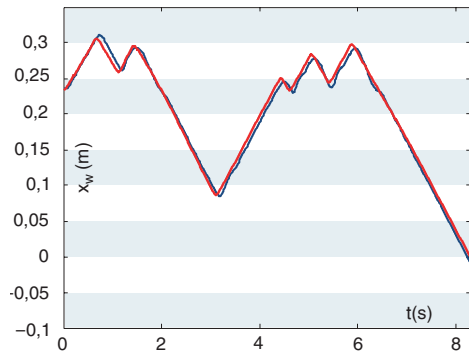
Eksperymenty

Poniżej zamieszczono wyniki eksperymentów, w których sterowano obydwoma modelami laboratoryjnymi w sposób optymalnoczasowy. Zadaniem algorytmu sterującego było przemieszczenie obciążnika z wybranego punktu początkowego do końcowego w jak najkrótszym czasie. Należy podkreślić, że eksperymenty odbywały się przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. Identyfikację przeprowadzono zgodnie z ideą omówioną w podrozdziale *Tarcie w układach sterowanych napięciowo*. W obydwu przypadkach problem sterowania był tak zdefiniowany, aby na końcu eksperymentu obciążnik zwiisał nieruchomo [4]. Rysunki 18–25 przedstawiają wybrane przebiegi z eksperymentów zestawione z wynikami symulacji, wyliczonymi na podstawie modelu matematycznego (4). Wartości parametrów przyjęto zgodnie z rezultatami identyfikacji: tabele 3–6.

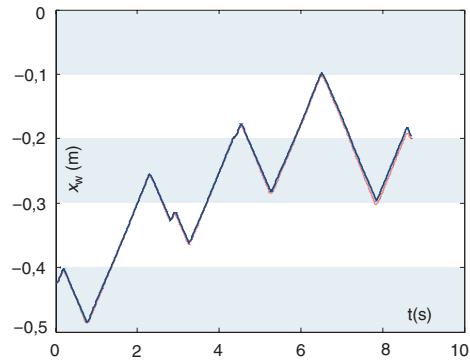
Suwnica (a)

Obiekt jest sterowany stałym napięciem. Gwałtowne zmiany kierunku przemieszczania się wózka (charakterystyczne dla sterowania optymalnoczasowego) przyczyniają się do powstawania oscylacji obciążnika.

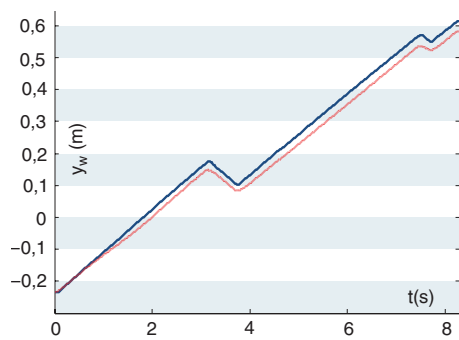
Eksperyment trwa 8,2 s. W końcowej jego fazie kąt x_5 zbliża się do 1,57 rad, a kąt x_7 do 0 rad. Odpowiada to pionowemu zwisowi obciążnika (zob. rys. 3).



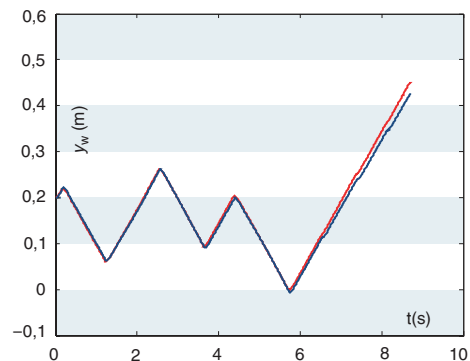
Rys. 18. Przesunięcie wózka x_w – suwnica (a), eksperyment – linia niebieska, symulacja – linia czerwona



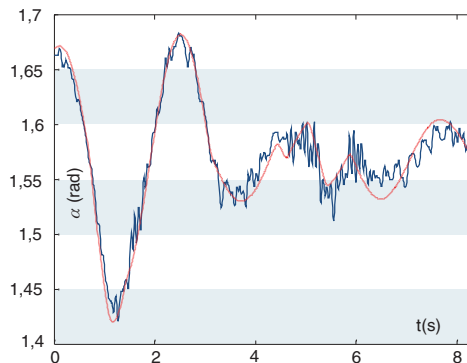
Rys. 22. Przesunięcie wózka x_w – suwnica (b), eksperyment – linia niebieska, symulacja – linia czerwona



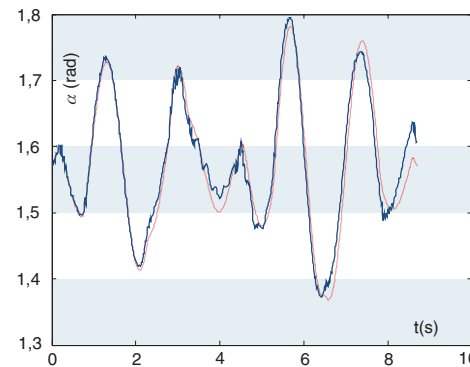
Rys. 19. Przesunięcie wózka y_w – suwnica (a), eksperyment – linia niebieska, symulacja – linia czerwona



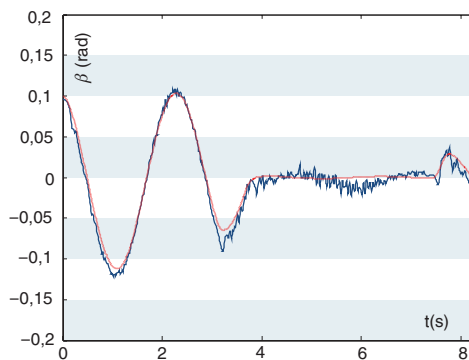
Rys. 23. Przesunięcie wózka y_w – suwnica (b), eksperyment – linia niebieska, symulacja – linia czerwona



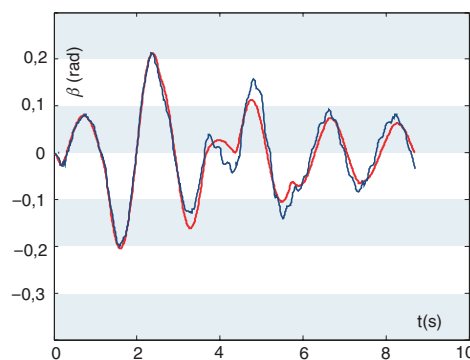
Rys. 20. Kąt x_5 (α) – suwnica (a), eksperyment – linia niebieska, symulacja – linia czerwona



Rys. 24. Kąt x_5 (α) – suwnica (b), eksperyment – linia niebieska, symulacja – linia czerwona



Rys. 21. Kąt x_7 (β) – suwnica (b), eksperyment – linia niebieska, symulacja – linia czerwona



Rys. 25. Kąt x_7 (β) – suwnica (b), eksperyment – linia niebieska, symulacja – linia czerwona

Wyniki symulacji są zgodne z dużą dokładnością z rezultatami eksperymentalnymi zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym. Najgorzej zidentyfikowano tarcie wzdłuż osi y (rys. 19).

Suwnica (b)

Model laboratoryjny (b) jest sterowany także napięciowo, ale za pomocą fali prostokątnej o różnym współczynniku wypełnienia proporcjonalnym do wartości sterowania. W tym wypadku sterowanie jest także optymalnociasowe, ale dla innego punktu początkowego i końcowego. Tak samo jak w poprzednim eksperymencie, zmiany sterowania przyczyniają się do oscylacji obciążnika.

W eksperymentach z tym obiektem i z tym rodzajem sterowania również zauważono bardzo dobrą zbieżność wyliczeń numerycznych z wynikami eksperymentalnymi. Na końcu eksperymentu obciążnik jest nieco odchylony od pionu (rys. 24 i 25).

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych, jak również wykonanych eksperymentów można wysunąć wniosek, że spośród omówionych sposobów sterowania, sterowanie prądowe jest najtrudniejsze w praktycznej realizacji. Związane jest to przede wszystkim z trudnością poprawnego zamodelowania zjawiska tarcia, a tym samym dużymi rozbieżnościami pomiędzy przewidywaniami symulacyjnymi a rzeczywistym zachowaniem obiektu. Jednocześnie sterowanie prądowe, ze względu na charakter i bezpośredniość przełożenia na siły działające w układzie, jest szczególnie atrakcyjne. Jak pokazały eksperymenty, sterowanie to można efektywnie wykorzystać jedynie w układach, gdzie siły tarcia (szczególnie tarcie statyczne) są pomijalnie małe w stosunku do pozostałych sił działających w sterowanym obiekcie. Wówczas rozważania teoretyczne są w dużym stopniu zgodne z wynikami eksperymentalnymi.

W przypadku małych modeli mechatronicznych, gdzie niestacjonarne siły tarcia nie mogą być pominięte, sterowanie prądowe jest mało przydatne. W takiej sytuacji satysfakcjonującą zgodność dynamiki modelu laboratoryjnego z modelem matematycznym można uzyskać przez zastosowanie sterowania napięciowego. Podobne rezultaty uzyskano zarówno przy sterowaniu napięciowym ciągłym, jak i napięciowym typem PWM.

Bibliografia

1. A. Benhidjeb, G.L. Gissinger, *Fuzzy control of an overhead crane performance comparison with classic control*, Control Eng. Practice, Vol. 3, No. 12, pp. 1687–1696, Pergamon 1995.



Zapraszamy
na naszą
stronę
internetową:
www.turck.pl

Wesołych świąt oraz 365 udanych
dni w roku 2006 życzy
Turck Sp. z o.o.

S.L.



Wasza satysfakcja to nasz sukces!



REKLAMA ▲

2. L. Derek, G.G. Parker, B. Driessen, R.D. Robinett, *Command Shaping Control of an Operator in the Loop Boom Crane*, Proceedings of the American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania 1998.
3. M. Pauluk, *Model matematyczny trójwymiarowej suwnicy*, Automatyka, półrocznik tom 6, zeszyt 1, s. 69 – 102, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2002.
4. M. Pauluk, A. Korytowski, A. Turnau, M. Szymkat, *Time optimal control of 3D crane, proceedings of the 7th Inter. Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, Międzyzdroje 2001, pp. 927 – 936.
5. K. Rintanen, *Modelling Instrumentation and Control of a Trolley Crane*, Helsinki University of Technology, Report of the Control Engineering Laboratory, Espoo 1991, Finland.
6. *RT-CON Professional: Reference Guide*, INTECO 1998, Poland.
7. R. Salminen, A. Marttinen, K. Rintanen, J. Hämäläinen, L. Baharova, J. Virkkunen, *Computer Aided Robust Control Design of a Pilot Crane* – preprint.
8. www.inteco.com.pl
9. www.mathworks.com – Real Time Windows Target