

Pomiary i sterowanie w dydaktycznym modelu lewitacji magnetycznej

Robert Bączyk, Dawid Lewandowski, Piotr Pluciński

Instytut Automatyki i Inżynierii Informatycznej, Politechnika Poznańska

Streszczenie: Przedmiotem referatu jest konstrukcja oraz analiza systemu magnetycznej lewitacji. Na całość pracy składa się wykonane urządzenie umożliwiające stabilizację unoszonego przedmiotu oraz model symulacyjny. Zaprojektowane i wykonane urządzenie zapewnia sterowanie prądem elektromagnesu w wewnętrznej pętli regulacji oraz położeniem unoszonego przedmiotu – w pętli zewnętrznej. Ponadto sterownik komunikuje się z aplikacją uruchamianą na komputerze PC, która nadzoruje pracę sterownika. Na urządzeniu zamontowano i przebadano trzy różne sensory położenia lewitującego obiektu.

Słowa kluczowe: lewitacja magnetyczna, sensory położenia, stanowisko dydaktyczne

1. Wstęp

Lewitacja, czyli unoszenie się obiektu bez kontaktu z podłożem, zawsze fascynowała ludzkość. Wyrazem tego jest treść mitów i legend, w których ludzie latają, a magowie przenoszą przedmioty siłą woli. Okazuje się, że te fantastyczne wyobrażenia można urzeczywistnić i wykorzystać na dużą skalę, lub zbudować niewielkie urządzenie, które postawione na biurku będzie intrygować wszystkich, którzy się z nim zetkną.

Na ferromagnetyk umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym działa siła grawitacji oraz siła pochodząca od pola magnetycznego. Jeżeli te dwie siły się równoważą – obiekt lewituje w przestrzeni. Dzięki zjawisku magnetycznej lewitacji możliwe było skonstruowanie kolei magnetycznej. Do tej pory wybudowano kolej magnetyczną w Niemczech (Transrapid – rys. 1), Japonii oraz Chinach. Maksymalna prędkość, jaką może rozwinąć taki pociąg to 600 km/h. Zasada działania kolei magnetycznej jest podobna do działania silnika linowego [1]. Torowisko (stojan) wytwarza ruchome pole magnetyczne, za którym podąża pociąg (wirnik). Niezbędne są także elektromagnesy boczne kierujące. Ich zadaniem jest utrzymywanie odpowiedniej odległości bocznej od torowiska, jest to szczególnie istotne przy pokonywaniu zakrętów.

Innym przykładem zastosowania zjawiska magnetycznej lewitacji są łożyska magnetyczne. Niwelują one tarcie oraz nie wymagają smarowania, dlatego stosuje się je w maszynach wysokoobrotowych, generatorach dużych mocy (turbiny elektrowni) oraz wszędzie tam, gdzie występują ekstremalne warunki środowiska [2]. Łożysko magnetyczne wymaga jednak skomplikowanego układu sterowania, co znacząco wpływa na koszt urządzenia, w którym je zastosowano.



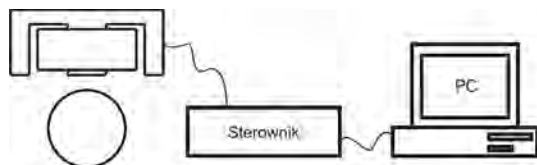
Rys. 1. Kolej magnetyczna Transrapid
Fig. 1. Maglev Transrapid

Trudność sterowania w systemie magnetycznej lewitacji wynika z niestabilności unoszonego przedmiotu, zarówno w przypadku braku zasilania cewki elektromagnesu (układ swobodny), jak i wówczas, gdy cewka jest zasilana napięciem stałym. Kolejną niedogodnością jest nieliniowość modelu matematycznego układu [3]: siła unoszenia przedmiotu przez elektromagnes jest proporcjonalna do kwadratu prądu i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości przedmiotu od cewki. Nieliniowe wyrażenie występuje również w równaniu różniczkowym wyprowadzonym dla części elektrycznej: w cewce powstaje siła elektromotoryczna proporcjonalna do iloczynu prądu i prędkości unoszonego ferromagnetycznego przedmiotu.

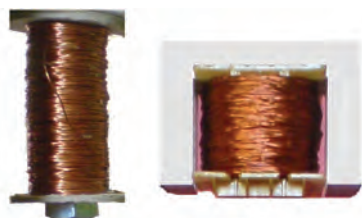
Niniejsza praca pokazuje, że mimo tych niedogodności można niewielkim nakładem środków zbudować stanowisko dydaktyczne z powodzeniem realizujące lewitację magnetyczną i umożliwiające badanie tego zjawiska. Stanowisko realizuje następujące funkcje:

- stabilna lewitacja przedmiotu w polu magnetycznym,
- regulacja położenia lewitującego przedmiotu,
- połączenie sterownika z komputerem PC, które umożliwia m.in. rejestrację przebiegu położenia unoszonego przedmiotu i prądu elektromagnesu.

Ponadto w ramach referowanej pracy zbudowano model układu regulacji, zidentyfikowano jego parametry oraz porównano przebiegi czasowe otrzymane z modelu i z rzeczywistego obiektu.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 2. Schematic of set of research



Rys. 3. Elektromagnes: prototyp i konstrukcja finalna
Fig. 3. Electromagnet: the prototype and final construction

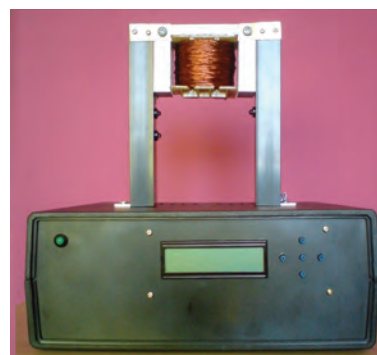
2. Opis stanowiska

Stanowisko składa się z elektromagnesu, lewitującego przedmiotu, sterownika oraz komputera PC (rys. 2). Regulator prądu elektromagnesu i położenia unoszonego przedmiotu zrealizowany jest w sterowniku. Sterownik komunikuje się z komputerem poprzez łącze szeregowe RS-232. Na komputerze zainstalowana jest aplikacja okienkowa, która pełni rolę interfejsu, dzięki któremu użytkownik może obserwować zmienne stanu oraz zmieniać parametry i algorytm regulacji.

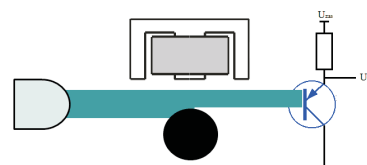
Urządzenie wykonawcze umożliwiające lewitację to elektromagnes (rys. 3) o odpowiedniej sile przyciągania [4] (wcześniej wykonano i zbadano jeden prototyp). Ostatecznie do budowy elektromagnesu wykorzystano rdzeń transformatorowy w kształcie litery E. Na rdzeń nawinięto 600 zwojów drutu nawojowego o średnicy 0,6 mm. Kolumnę z elektromagnesem na stałe złączono z obudową sterownika (rys. 4).

Jako jednostka zarządzająca sterownikiem wykorzystany został moduł STM32Discovery [5], [6]. Pozostałe istotne elementy sterownika to: zasilacz elektroniki i elektromagnesu, wyświetlacz LCD, przyciski do obsługi podstawowych funkcji sterownika oraz sensor do pomiaru prądu cewki elektromagnesu. Ponadto dla zamknięcia pętli regulacji położenia unoszonego przedmiotu konieczny jest sygnał pomiarowy z sensora położenia. Dla celów badawczych w urządzeniu zamontowano trzy różne, alternatywne sensory: barierę optyczną, hallotron oraz optyczny sensor odległości. Poniżej zostaną opisane trzy koncepcje pomiaru położenia.

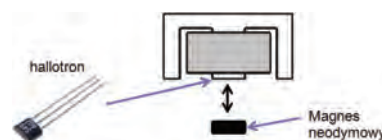
Bariera optyczna. W rozwiązaniu tym naprzeciw siebie umieszczone są: dioda LED oraz fototranzystor, który w zależności od natężenia padającego na niego światła mniej lub bardziej się otwiera. Na rys. 5 przedstawiono prosty schemat, na którego wyjściu otrzymuje się napięcie zależne od stopnia przesłonięcia przez lewitujący przedmiot soczewki fototranzystora.



Rys. 4. Wygląd stanowiska
Fig. 4. The appearance of complete device



Rys. 5. Schemat działania bariery optycznej
Fig. 5. Functional diagram of the optical barrier



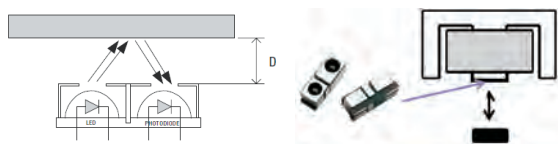
Rys. 6. Czujnik hallotronowy CS3500 oraz miejsce montażu
Fig. 6. Hall-effect sensor CS3500 and location of installation

Działanie takiego czujnika położenia zakłócają wszelkie zewnętrzne źródła światła. Aby zmniejszyć ten niekorzystny wpływ oświetlenia zewnętrznego, jako nadajnik zastosowana została dioda LED emitująca światło podczerwone. Ponadto aby kompensować wpływ zmian oświetlenia zewnętrznego, dodatkowo zastosowano drugi fototranzystor zamontowany w innym miejscu obudowy i rejestrujący natężenie światła pochodzącego jedynie od źródeł zewnętrznych.

Czujnik natężenia pola magnetycznego – Hallotron jest kolejnym czujnikiem odległości unoszonego przedmiotu od elektromagnesu. W czujniku tym wykorzystuje się efekt Halla, który polega na wystąpieniu różnicy potencjałów w przewodniku, w którym płynie prąd elektryczny, gdy przewodnik znajduje się w polu magnetycznym, skierowanym poprzecznie do kierunku płynącego prądu [7].

Hallotron CS3500 [8] jest elementem półprzewodnikowym. Najczęściej wykorzystywany jest do pomiaru pola magnetycznego. Używa się go również do pomiaru indukcji magnetycznej oraz natężenia prądu.

Aby możliwe było wykorzystanie hallotyonu do pomiaru odległości, konieczne jest, aby unoszony przedmiot wytwarzał pole magnetyczne, czyli był magnesem (rys. 6). W takim układzie położenie lewitującego magnesu obli-



Rys. 7. Czujnik odbiciowy HSDL-9100: zasada działania oraz miejsce montażu

Fig. 7. Proximity Sensor HSDL-9100: principle of operation and location of installation

czane jest na podstawie wypadkowego pola magnetycznego, którego składowe stanowią pole magnetyczne pochodzące od unoszonego magnesu oraz pole elektromagnesu.

Optyczny czujnik zbliżeniowy HSDL-9100 to trzeci zastosowany sensor położenia lewitującego obiektu. Jest to analogowy czujnik odbiciowy w małej obudowie SMD, a jego podstawowe cechy to [9]:

- bardzo dobra optyczna izolacja fotoelementów,
- wysoka wydajność emitera oraz czułość fotodiody zapewniające wysoki stosunek sygnału do szumu,
- niski koszt oraz miniaturowa obudowa SMD (2,7 x 2,75 x 7,1 mm),
- wykrywanie obiektów w zakresie od zera do 60 mm.

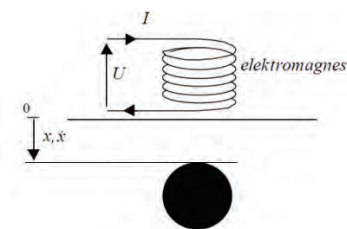
Cechy te sprawiły, że sensor ten został wykorzystany w konstruowanym stanowisku. W czujniku HSDL-9100 dioda LED oraz fotodioda są usytuowane obok siebie, a do fotodiody trafia światło odbite od obiektu znajdującego się przed czujnikiem (rys. 7). Zatem ważny jest rodzaj i kształt powierzchni odbijającej sygnał pomiarowy. Najdokładniejszy wynik pomiaru uzyskuje się wówczas, gdy unoszony przedmiot będzie miał płaską powierzchnię odbijającą światło w kierunku odbiornika zamontowanego w sensorze.

Według noty katalogowej czujnika HSDL-9100 [9], dioda nadawcza powinna być sterowana sygnałem PWM o wypełnieniu 5 %, dlatego czujnik został podłączony do dedykowanego układu APDS-9700 [10], z którego otrzymuje się napięcie wyjściowe proporcjonalne do odległości obiektu od czujnika położenia. Czujnik HSDL-9100 został zamontowany na środku rdzenia elektromagnesu (rys. 7).

Czujnik prądu. Do pomiaru prądu elektromagnesu wykorzystany został czujnik ACS712 firmy Allegro. Pomiar prądu oparty jest również na efekcie Halla. Najważniejsze cechy czujnika ACS712 to [11]:

- liniowa zależność napięcia wyjściowego od mierzonego prądu,
- czas reakcji czujnika na zmiany prądu równy 5 μ s,
- maksymalny błąd wyjścia wynosi 1,5 %,
- czułość 185 mV/A,
- obudowa SMD SOIC8,
- bliska zeru histereza magnetyczna,
- zasilanie napięciem 5 V,
- zakres pomiaru prądu [−5, 5] A.

Końcówka mocy umożliwia sterowanie prądem elektromagnesu. Końcówkę mocy stanowi tranzystor N-MOSFET IRL3714 o maksymalnym prądzie drenu 36 A [12].



Rys. 8. Uproszczony model systemu

Fig. 8. Simplified model of the system

Sterownik daje możliwość badania dwóch rodzajów sterowania tranzystorem: sterowania sygnałem PWM oraz analogowego sterowania ciągłego. Sterowanie PWM zrealizowano poprzez kluczkowanie tranzystora sygnałem logicznym z mikrokontrolera, sterowanie ciągłe polega na podaniu odpowiedniego napięcia z przetwornika C/A mikrokontrolera.

3. Modelowanie i symulacja układu magnetycznej lewitacji

Przystępując do budowy modelu matematycznego, czyli napisania równań matematycznych opisujących zjawisko magnetycznej lewitacji, należy sprecyzować założenia upraszczające, określić zakresy zmian poszczególnych parametrów oraz dokonać wyboru zmiennych charakteryzujących stan układu. Następnie, korzystając z odpowiednich praw fizyki (podstawowe prawa mechaniki, prawa obwodów elektrycznych, równania bilansu masy i energii), wyprowadza się równania opisujące zmiany w czasie, zachodzące pod wpływem zewnętrznych oddziaływań lub nagromadzonej w układzie energii [13].

Jedną z metod opisu układów elektromechanicznych jest metoda równań Lagrange'a. Metoda ta opiera się na bilansie energii. Uzyskuje się w ten sposób równania różniczkowe w zwartej formie, co daje możliwość łatwego wyprowadzania modeli w programach symulacyjnych i przyspiesza analizę problemu.

Równania zostaną wyprowadzone na podstawie uproszczonego schematu rozważanego układu, przedstawionego na rysunku 8. W badanym układzie znajduje się kilka magazynów energii. Poniżej zostaną wyznaczone poszczególne rodzaje energii oraz końcowe równania Lagrange'a.

Energia kinetyczna w układzie związana jest z ruchem ($\dot{x}$) unoszonego przedmiotu o masie m oraz z ruchem łańdunków elektrycznych ($\dot{q} = i$) w cewce elektromagnesu:

$$E_K = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}L(x)\dot{q}^2 \quad (1)$$

Indukcyjność cewki elektromagnesu zmienia się wraz ze zmianą odległości obiektu, dlatego zostało to uwzględnione w równaniach poprzez zapis $L(x)$.

Energia potencjalna magazynowana jest w unoszonym przedmiocie:

$$E_P = mgx \quad (2)$$

Moc dostarczana do układu wyraża się wzorem:

$$F_d = u\dot{q} \quad (3)$$

Funkcja strat w badanym układzie związana jest z rezystancją uzwojeń cewki. Na rezystancji tej powstają straty mocy, które wyraża funkcja strat Rayleigha:

$$F_r = \frac{1}{2} R \dot{q}^2 \tag{4}$$

Równania układu

Na podstawie powyższych obliczeń wyznaczamy funkcję Lagrange’a: $T = E_K - E_P$, a następnie obliczamy równania Lagrange’a ze wzorów:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial F_r}{\partial \dot{x}} = \frac{\partial F_d}{\partial \dot{x}} \tag{5}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial F_r}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial F_d}{\partial \dot{q}} \tag{6}$$

Po obliczeniu równań (5) i (6) otrzymujemy równania różniczkowe opisujące badany system:

$$\ddot{x} = \frac{1}{2m} \frac{\partial L}{\partial x} i^2 + g \tag{7}$$

$$\dot{i} = \frac{1}{L} \left(-\frac{dL}{dx} \dot{x} i - Ri + u \right) \tag{8}$$

Zależność indukcyjności cewki od odległości unoszonego obiektu jest funkcją malejącą. Funkcję tę można przybliżyć wykorzystując wzory z literatury [14]:

$$L(x) = L_0 + L_1 e^{-ax}, \quad a > 0 \tag{9}$$

W układzie rzeczywistym sterowanie elektromagnesem odbywa się poprzez końcówkę mocy z regulatorem prądu. Położenie unoszonego obiektu jest stałe, więc można przyjąć $v = 0$. Zatem równanie (8) można zapisać:

$$\dot{i} = -\frac{1}{T} i + \frac{k}{T} (u + u_c) \tag{10}$$

Na podstawie równań (7), (8), (10) oraz przyjmując za zmienne stanu położenie x i prędkość v obiektu oraz prąd cewki i elektromagnesu można zapisać układ równań stanu opisujący model systemu magnetycznej lewitacji:

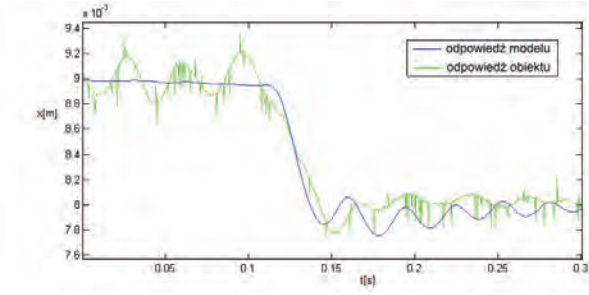
$$\dot{x} = v \tag{11}$$

$$\dot{v} = \frac{1}{2m} \frac{dL(x)}{dx} i^2 + g + z_1 \tag{12}$$

$$\dot{i} = -\frac{1}{T} i + \frac{k}{T} (u + u_c + z_2) \tag{13}$$

gdzie:

- x – położenie obiektu [m],
- v – prędkość obiektu [m/s],
- i – prąd w cewce elektromagnesu [A],
- u – napięcie sterujące [V],
- u_c – niewielkie stałe napięcie [V],
- k – współczynnik $k = 1/R$ [A/V],
- T – stała czasowa elektromagnesu $T = L/R$ [s],
- m – masa obiektu [kg],
- $dL(x)/dx$ – pochodna indukcyjności względem położenia [H/m],
- $g = 9,81$ – przyspieszenie ziemskie [m/s²],
- z_1, z_2 – zakłócenia.



Rys. 9. Porównanie odpowiedzi modelu i obiektu
Fig. 9. Comparison of the model and the object response

Wyjściem układu jest sygnał z wybranego czujnika położenia. W urządzeniu wykorzystane zostały trzy niezależne czujniki położenia, z których każdy zwraca sygnał napięciowy. Równanie wyjścia ogólnie można zapisać: $y = f(x)$

Parametry równań różniczkowych opisujących system zostały uzyskane w wyniku pomiarów oraz identyfikacji obiektów rzeczywistych [15]. Parametry, które zostały wykorzystywane w obliczeniach i symulacjach zostały zestawione w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry modelu układu lewitacji magnetycznej
Tab. 1. Parameters of the model of magnetic levitation system

parametr	wartość	jednostka
m	0,025	[kg]
u_c	1,12	[V]
k	0,15	[A/V]
T	11	[ms]
$L(x_1)$	$0,115 + 0,025e^{-600x_1}$	[H]
$L'(x_1)$	$-15e^{-600x_1}$	[H/m]

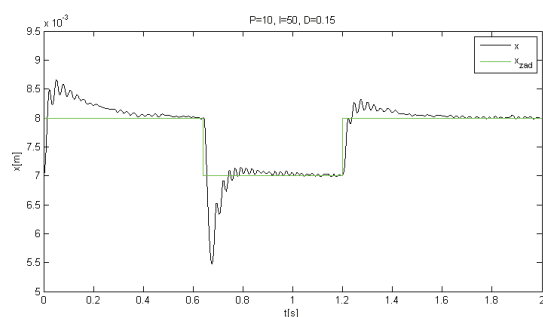
Na podstawie równań stanu opisujących zjawisko magnetycznej lewitacji oraz zidentyfikowanych parametrów układu został utworzony model symulacyjny obiektu i układu regulacji z regulatorem PID.

Weryfikację modelu magnetycznej lewitacji przeprowadzono, wykonując podstawowy eksperyment, który polegał na rejestracji odpowiedzi układu regulacji na skokową zmianę wartości zadanej położenia unoszonego obiektu. Następnie odpowiedzi modelu oraz rzeczywistego układu zostały przedstawione na jednym wykresie w celu porównania (rys. 9). Odpowiedź modelu oraz obiektu są do siebie zbliżone. Wynika z tego, że model matematyczny poprawnie odwzorowuje obiekt rzeczywisty.

4. Badanie stanowiska

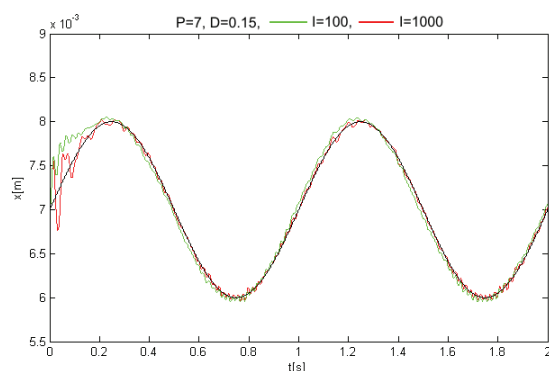
Po ukończeniu prac związanych z budową urządzenia oraz aplikacją sterującą wykonano szereg badań mających na celu sprawdzenia działania urządzenia oraz porównanie wyników teoretycznych z rzeczywistym urządzeniem.

Badanie modelu układu regulacji. Na początek, w celu znalezienia przybliżonych nastaw oraz sprawdzenia, jak nastawy regulatora będą wpływać na jakość regulacji, wykonano kilka symulacji takich jak na rys. 10.



Rys. 10. Badanie modelu układu regulacji dla prostokątnego przebiegu wartości zadanej

Fig. 10. The investigation of the model of control system with square-wave reference signal



Rys. 11. Badanie modelu układu regulacji dla sinusoidalnego przebiegu wartości zadanej

Fig. 11. The investigation of the model of control system with sinusoidal reference signal

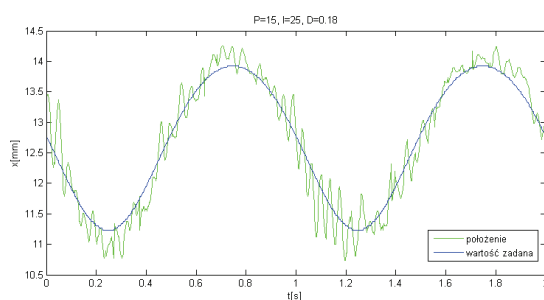
Wpływ nastaw regulatora PID na jakość regulacji zbadano na podstawie odpowiedzi na skokową zmianę wartości zadanej położenia.

Zmiana wzmocnienia P regulatora wpływa przede wszystkim na oscylacje położenia. Im większe wzmocnienie P, tym zakłócenia w torze pomiarowym mają większy wpływ na położenie. Wzmocnienie członu całkującego regulatora PID wpływa na czas regulacji oraz na przeregulowanie. Zbyt duże wzmocnienie uniemożliwia stabilizację obiektu. Natomiast zbyt małe wzmocnienie członu całkującego powoduje wzrost czasu regulacji oraz pojawienie się uchybu ustalonego.

Zauważono również, że dla sinusoidalnej zmiany położenia zadanego, zmiany nastaw regulatora PID nie mają tak znaczącego wpływu na jakość regulacji jak dla sygnału skokowego. Zwiększenie wzmocnienia członu całkującego wpływa jedynie na lepsze nadążanie za sygnałem zadanym (rys. 11).

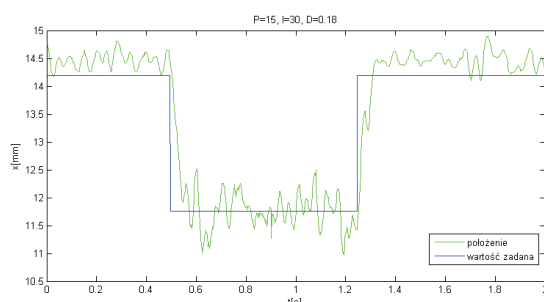
Wiedza zdobyta dzięki symulacjom posłużyła do odpowiedniego doboru nastaw regulatora PID rzeczywistego obiektu. Jako pierwszy przebadano układ z barierą optyczną.

Sprzężenie od bariery optycznej. W celu zbadania jakości regulacji zarejestrowano odpowiedzi układu na wy-



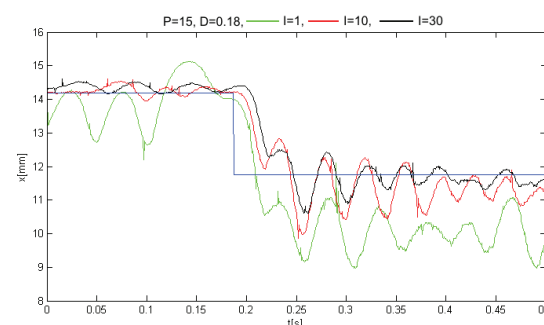
Rys. 12. Układ regulacji z barierą optyczną w pętli sprzężenia zwrotnego: odpowiedź układu na sinusoidalne wymuszenie

Fig. 12. Control system with feedback from optical barrier: system response to sinusoidal reference signal



Rys. 13. Układ regulacji z barierą optyczną w pętli sprzężenia zwrotnego: odpowiedź na wymuszenie skokowe

Fig. 13. Control system with feedback from optical barrier: system response to step input



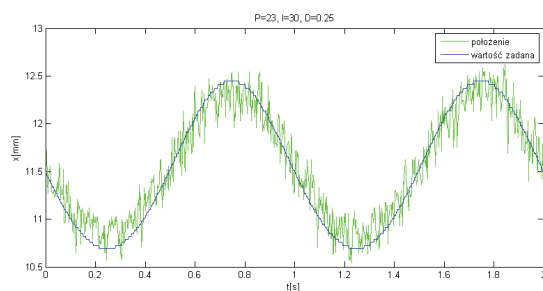
Rys. 14. Układ regulacji z barierą optyczną w pętli sprzężenia zwrotnego: badanie wpływu wzmocnienia członu całkującego na uchyb ustalony

Fig. 14. Control system with feedback from optical barrier: investigation of integral term influence

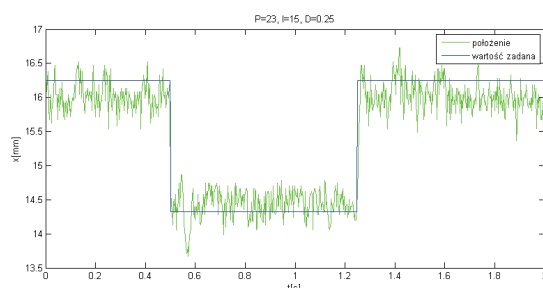
muszenie sinusoidalne (rys. 12) oraz skokowe (rys. 13). Regulator PID pozwala dobrze odwzorować sygnał sinusoidalny. Kwadratowy wskaźnik jakości regulacji dla sygnału sinusoidalnego wynosi $J_{sin} = 27,2$. Natomiast dla wymuszenia skokowego wskaźnik ten wynosi $J_{sq} = 71,6$. Większa wartość wskaźnika spowodowania jest występowaniem uchybu ustalonego. W celu zniwelowania uchybu zwiększono wzmocnienie członu całkującego. Jednak nie udało się uzyskać zerowego uchybu. Wpływ wzmocnienia członu całkującego na uchyb ustalony przedstawia rys. 14.

Przekroczenie wartości 30 wzmocnienia toru całkującego znacząco pogorszyło jakość regulacji, a dla wartości większych od 60 ustabilizowanie obiektu było niemożliwe.

Sprężenie od hallotronu. Również dla hallotronu jako czujnika położenia zarejestrowano odpowiedzi na sygnał sinusoidalny (rys. 15) i skokowy (rys. 16). Dzięki temu możliwe było porównanie obu rozwiązań i określenie, które z nich zapewnia lepszą jakość regulacji. Układ zachowywał się podobnie jak w przypadku bariery optycznej. Obliczone wskaźniki jakości regulacji wynoszą: $J_{sin} = 55,7$, $J_{sq} = 153$.



Rys. 15. Układ regulacji z hallotronem w pętli sprzężenia zwrotnego: odpowiedź na sinusoidalne wymuszenie
Fig. 15. Control system with feedback from Hall-effect sensor: system response to sinusoidal reference signal



Rys. 16. Układ regulacji z hallotronem w pętli sprzężenia zwrotnego: odpowiedź skokowa
Fig. 16. Control system with feedback from Hall-effect sensor: step response

Sprężenie od czujnika optycznego HSDL-9100.

Po przeprowadzeniu testów okazało się, że zastosowany czujnik optyczny nie umożliwia stabilizacji obiektu. Główne przyczyny tej sytuacji to:

- impulsowe zakłócenia pojawiające się na wyjściu układu APDS-9700,
- wchodzenie unoszonego obiektu w zakres odległości, w którym charakterystyka czujnika HSDL-9100 jest nieliniowa lub wręcz niemonotoniczna,
- zmiany orientacji unoszonego przedmiotu, powodujące fluktuacje kierunku normalnej do płaszczyzny odbijającej światło.

5. Podsumowanie

Głównym celem pracy była konstrukcja systemu umożliwiającego badanie zjawiska magnetycznej lewitacji. Zbu-

dowano urządzenie umożliwiające utrzymywanie lewitującego obiektu w położeniu równowagi. W szczególności stanowisko umożliwia:

- rejestrację cyfrową analogowych sygnałów trafiających do przetwornika A/C mikrokontrolera,
- badanie różnych koncepcji pomiaru położenia unoszonego przedmiotu (pomiar ten jest wykorzystywany jako sygnał sprzężenia zwrotnego),
- analogowe i dyskretne sterowanie prądem cewki elektromagnesu,
- badanie wpływu nastaw regulatora PID na jakość regulacji.

Ponadto w zbudowanym sterowniku zrealizowano wewnętrzną pętlę regulacji prądu. Zaprojektowany układ elektroniczny dobrze spełnił swoje zadanie.

Porównując przebiegi dla układu rzeczywistego i modelu, zauważono, że w układzie rzeczywistym występują większe przeregulowania wynikające ze zwiększania wzmocnienia członu całkującego i w konsekwencji może to prowadzić do destabilizacji lewitującego przedmiotu. Przyczyną tej wrażliwości mogą być zakłócenia występujące w wewnętrznej pętli regulacji prądu, generowane przez tranzystor kluczujący i rejestrowane przez przetwornik A/C.

Po przeprowadzeniu eksperymentów okazało się, że dwa spośród trzech przebadanych sensorów położenia umożliwiają stabilizację unoszonego przedmiotu. Porównując otrzymane wyniki można stwierdzić, że najlepsze efekty daje regulacja z barierą optyczną w torze sprzężenia zwrotnego. Istotne dla osiągnięcia dobrej jakości regulacji z barierą optyczną okazało się wprowadzenie dodatkowego fototranzystora, kompensującego zakłócenia pochodzące od zewnętrznych źródeł światła. Wadą bariery optycznej jest ograniczony – do kilku milimetrów – zakres sterowania położeniem przedmiotu. Wady tej pozbawione są dwa pozostałe zaproponowane czujniki. Dobrą jakość regulacji uzyskano również z wykorzystaniem hallotronu, a zaproponowany czujnik optyczny jednak nie sprawdził się w tego typu aplikacji.

Zbudowane stanowisko można wykorzystać do celów dydaktycznych w ramach laboratorium teorii sterowania.

Bibliografia

1. [<http://pl.wikipedia.org/wiki/Silnik liniowy>] – Zasada działania silnika liniowego.
2. Tomczuk B., Zimon J.: *Łożysko magnetyczne jako ekologiczny element napędu, analiza pola i weryfikacja pomiarowa*, "Chemia, Dydaktyka, Ekologia, Metrologia", r. 10, nr 1–2/2005, [<http://tchie.uni.opole.pl/SECE/>], [<http://tchie.uni.opole.pl/CDEMfree/>].
3. Kaczorek T.: *Teoria sterowania*, t. 1, PWN, Warszawa 1977.
4. Elbaum J.: *Elektromagnesy przemysłowe*, WNT, Warszawa 1965.
5. [http://www.st.com/internet/com/technical_resources/technical_literature/user_manual/CD00267113.pdf] – STM32Discovery User Manual.
6. Paprocki K.: *Mikrokontrolery STM32 w praktyce*, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2009.

7. [[http://http://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt_Halla_\(klasyczny\)](http://http://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt_Halla_(klasyczny))] – Efekt Halla.
8. [http://www.testequipmentdatasheets.com/index_cards/F/FW_Bell/3500.pdf] – Podstawowe właściwości czujnika Halla z serii CS3500.
9. [<http://www.avagotech.com/docs/AV02-2259EN>] – Nota katalogowa optycznego czujnika odległości HSDL-9100.
10. [<http://www.avagotech.com/docs/AV02-0893EN>] – Nota katalogowa układu APDS-9700.
11. [http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/0712/0712.pdf] – Dokumentacja sensora prądu ACS712.
12. [<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irl3714.pdf>] – Nota aplikacyjna tranzystora MOSFET IRL3714.
13. Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopata R.: *Podstawy teorii sterowania*, WNT, Warszawa 2005.
14. Purcell E. M.: *Elektryczność i magnetyzm*, PWN, Warszawa 1975.
15. Kasprzyk J. (red.): *Identyfikacja Procesów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002. ■

Sensing and control in didactic unit of magnetic levitation

Abstract: The subject of this paper is the design and analysis of magnetic levitation system. The whole work consists of the simulation model and constructed device enabling stabilization of the levitating object. Designed and built device provides a current control of the electromagnet in the inner loop and the position control of the object lifted – in the outer control loop. In addition, the controller communicates with the application that runs on a PC, which supervise the work of the driver. On the device are mounted and tested three different position sensors.

Keywords: magnetic levitation, distance sensors, didactic unit

dr inż. Robert Bączyk

Jest adiunktem w Politechnice Poznańskiej. Jest również absolwentem tej Uczelni. Jego zainteresowania naukowe dotyczą m.in. teorii sterowania, systemów wizyjnych, systemów nawigacji robotów mobilnych. Jest również zainteresowany poszerzaniem bazy dydaktycznej o stanowiska wyposażone w fizyczne obiekty sterowania.

e-mail: robert.baczynk@put.poznan.pl



mgr inż. Dawid Lewandowski

W roku 2011 został absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, kierunku Automatyka i Robotyka. Na studiach pierwszego stopnia obronił pracę dyplomową pt. "Konstrukcja i sterowanie wahadła odwróconego z wizyjnym sprzężeniem zwrotnym", natomiast praca magisterska dotyczyła konstrukcji stanowiska i badania zjawiska magnetycznej lewitacji.

Interesuje się elektroniką, nowymi technologiami w automatyce i robotyce oraz sportem. Wykonywane przez niego projekty często polegały na praktycznym wykorzystaniu zdobytej na studiach wiedzy. Członek koła naukowego CybAiR oraz uczestnik zawodów robotów klasy sumo.



mgr inż. Piotr Pluciński

W roku 2011 został absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej, kierunku Automatyka i Robotyka. Na studiach pierwszego stopnia obronił pracę dyplomową pt. "Konstrukcja i sterowanie wahadła odwróconego z wizyjnym sprzężeniem zwrotnym", natomiast praca magisterska dotyczyła konstrukcji stanowiska i badania zjawiska magnetycznej lewitacji.

Entuzjasta robotyki amatorskiej oraz konstruktor robotów mobilnych klasy sumo. Obecnie pracuje jako inżynier serwisu.

