Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Laboratorium problemowe II

Magnetyczna lewitacja

Autorzy:
Piotr Pałucki
Filip Kubicz

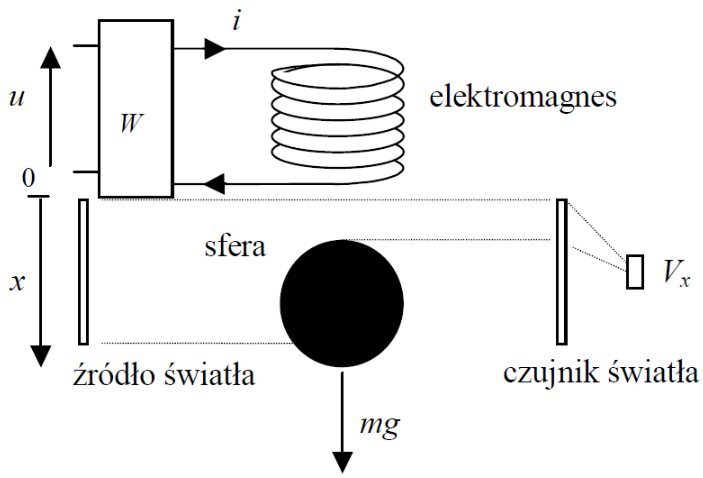
Plan działania na 9 zajęć laboratoryjnych (10 X 2016 - 12 XII 2016):

1. Identyfikacja - scenariusze badań i sygnałów sterujących
2. Optymalizacja parametryczna modelu
3. Model zlinearyzowany + LQR (model + eksperyment -¿ dyskusja)
4. Dyskretny regulator (porównanie z ciągłym)
5. Dyskretny regulator - eksperymenty
6. Obserwator
7. Obserwator - eksperymenty i jakość regulacji
8. Eksperymenty
9. Prezentacja końcowa wyników pracy

1 Model matematyczny stanowiska MagLev

Lewitacja magnetyczna to zjawisko występujące, kiedy ferromagnetyczny obiekt znajdzie się w polu magnetycznym skierowanym pionowo w górę, na tyle silnym, że wytworzona siła zrównoważy działającą na przedmiot grawitację. Zjawisko to stosuje się obecnie w łożyskach magnetycznych w pociągach, rozwijanych głównie w Japonii (MLX01) i w Niemczech (TR-08).

W laboratorium Katedry Automatyki EAIiIB AGH znajduje się stanowisko przeznaczone do badania magnetycznej lewitacji. Obiektem unoszącym się jest metalowa sfera. Pole magnetyczne jest wytwarzane przez cewkę umieszczoną ponad sferą. Dzięki pracom [1], [?] i [?] wiemy w jaki sposób modelować zachowanie układu, a także identyfikować jego parametry fizyczne.



Rysunek 1: Schemat stanowiska służący do wyznaczania równań, źródło [?]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \dfrac{1}{2m}\dfrac{dL(x_1)}{dx_1}x_3^2(t) + 10^{-3}g \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{T}x_3(t) + \frac{k}{T}(u(t)+u_c) \end{cases} \tag{1}$$

Gdzie:

x_1 - położenie sfery $[m]$

x_2 - prędkość sfery $[m/s]$

x_3 - prąd w cewce $[A]$

Zmienne stanu i sterowanie spełniają warunki:

$$\begin{cases} x_1(t) \in [0, x_{max}] \\ x_2(t) \in R x_3(t) \in [ku_c, k(u_c + u_{max})] \\ u(t) \in [0, u_{max}] \end{cases} \tag{2}$$

2 Identyfikacja

2.1 Identyfikacja charakterystyki czujnika położenia

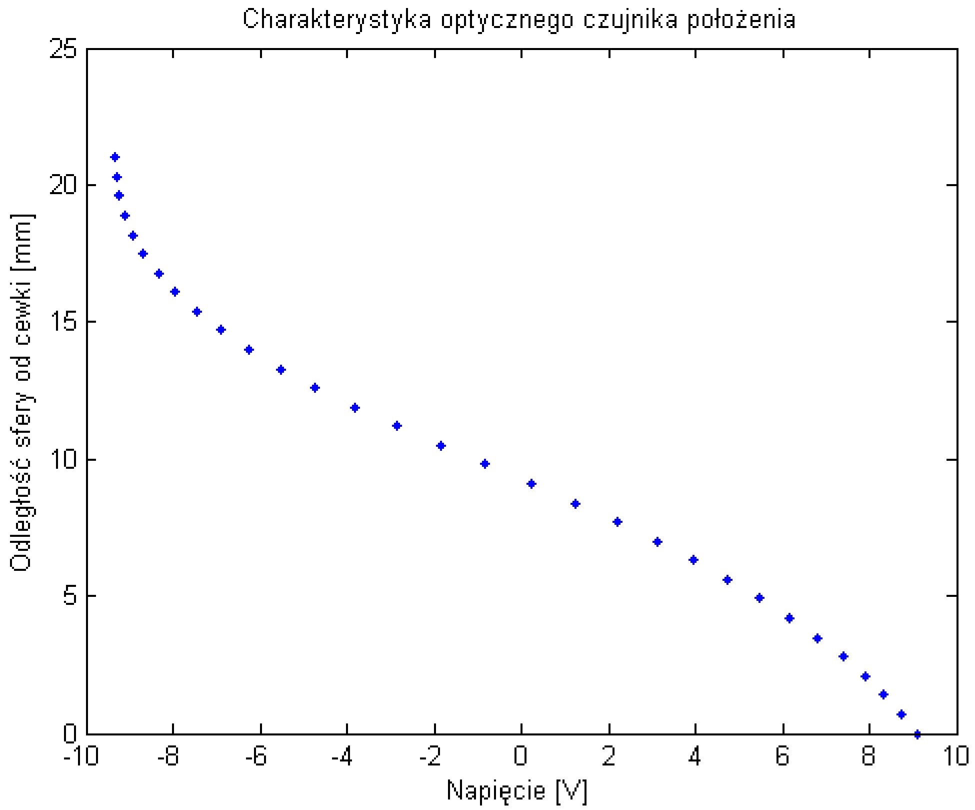
Pomiar położenia sfery w układzie magnetycznej lewitacji jest dokonywany optycznie. Z jednej strony znajduje się źródło światła, a po przeciwnej stronie fotodioda z przetwornikiem A/C, która podaje pewne napięcie u_x. Podczas identyfikacji poszukujemy zależności tego napięcia od położenia sfery:

$$u_x = g(x_1) \tag{3}$$

Poszukujemy charakterystyki statycznej $g(x_1)$, którą otrzymamy przykręcając sferę do śruby i podnosząc ją co ustalony skok 0,7 mm. Za każdym razem dokonujemy pomiaru napięcia podanego przez detektor światła.

Do pracy z modelem potrzebna jest znajomość położenia sfery, dlatego na rysunku 2 charakterystyka odwrotną do zależności 3.

[trzeba przeskalować napięcie jeszcze, można zrobić wykres od -ux]



Rysunek 2: Charakterystyka statyczna optycznego czujnika położenia

W pracy [1] autor dokonał aproksymacji otrzymanej charakterystyki odwrotnej sumą funkcji wykładniczych metodą prób i błędów. Nie będziemy dokonywać takiej aproksymacji, ponieważ podczas pracy z modelem w laboratorium użyjemy bloku *LUT z interpolacją* oferowanego przez Simulink.

2.2 Identyfikacja parametrów cewki k, T, u_c

Aby wiedzieć, jak zmienia się prąd cewki w zależności od użytego sterowania, czyli przyłożonego napięcia u, należy wyznaczyć parametry k, T oraz u_c.

2.2.1 Pomiary w stanie ustalonym cewki

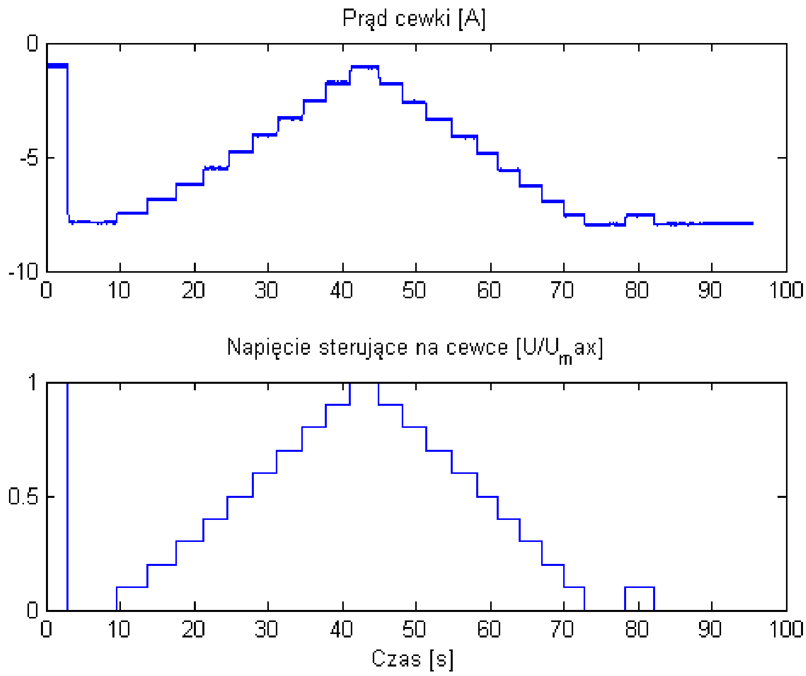
Zależność prądu od napięcia jest liniowa

$$i = k(u + u_c) \tag{4}$$

Parametry k i u_c (wzmocnienie oraz stałe napięcie na cewce) wyznaczymy mierząc prąd w stanie ustalonym dla różnych wartości napięcia sterującego.

- prąd w zależności od napięcia sterującego pomierzony, jakie jest przeskalowanie? Czy lepiej użyć oscyloskopu / czy jest rezystor?

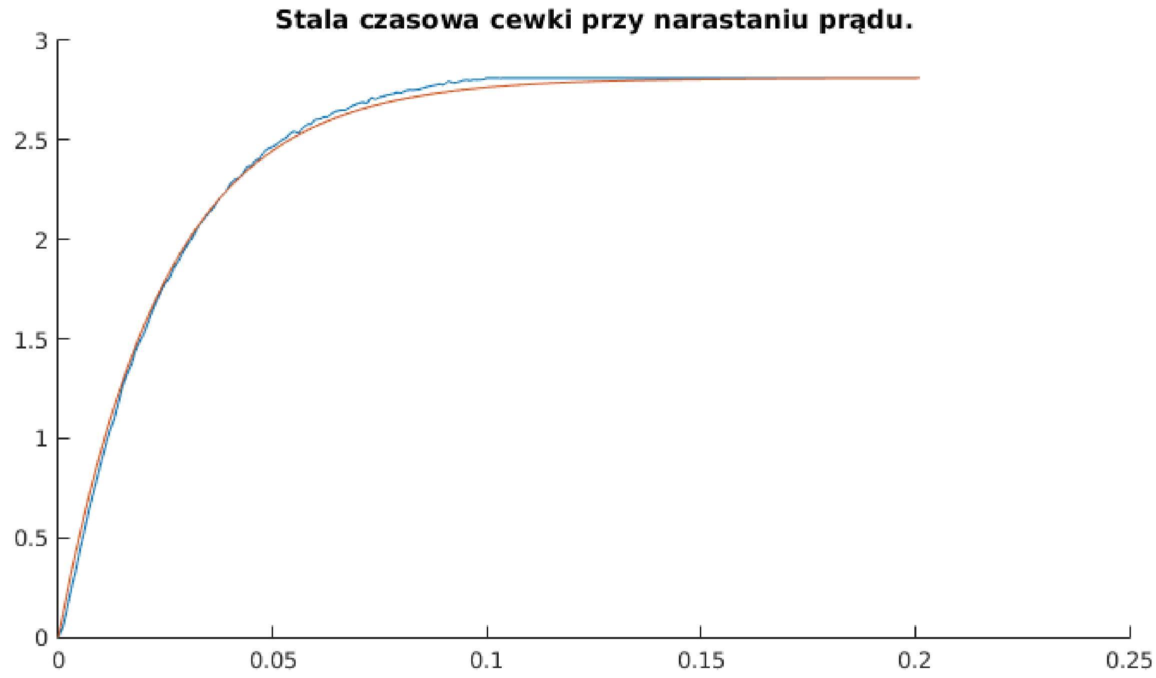
[można też mierzyć spadek napięcia na rezystorze pomiarowym bo są duże błędy prądu]



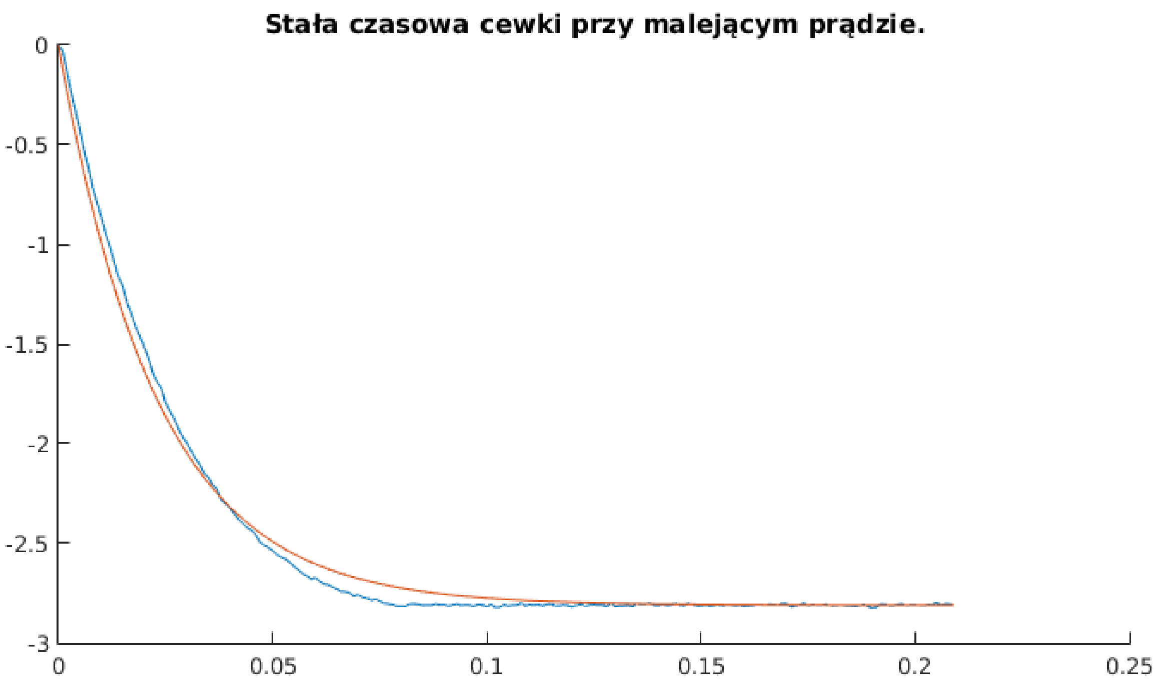
Rysunek 3: Identyfikacja parametrów statycznych cewki

2.2.2 Pomiary stanów przejściowych cewki

Stałą czasową cewki T można wyznaczyć obserwując odpowiedź skokową prądu. Zwalniamy PWM, zapinamy sterowanie (wypelnienie) na 50 procent i dzięki temu mamy skoki typowo napięciowe. Preskaler 4096.



Rysunek 4: Identyfikacja parametrów statycznych cewki



Rysunek 5: Identyfikacja parametrów statycznych cewki

Korzystając z metody najmniejszych kwadratów wyznaczono parametry, których wartości umieszczono w tabeli 2.

2.3 Identyfikacja indukcyjności cewki $L(x_1)$

W celu identyfikacji zależności indukcyjności cewki od położenia w układzie otwartym należy wykonać serię pomiarów napięcia i prądu dla różnych położeń sfery. Zmierzona rezystancja cewki wynosi $R = 4,7\Omega$. Indukcyjność obliczymy ze wzoru

$$L = \frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R^2} \tag{5}$$

gdzie ω - częstość napięcia zasilającego ($\omega = 314$ rad/s)
U - napięcie skuteczne na cewce [V]
I - prąd płynący przez cewkę [A]
R - rezystancja cewki
[wykres doświadczenia]
Poszukujemy funkcji postaci

$$L(x_1) = L_0 + 2 \cdot 10^{-3} \frac{mg}{a^2x + ab} \tag{6}$$

Ze względu na bardzo małe zmiany indukcyjności podczas pomiarów w pętli otwartej, postanowiliśmy użyć regulatora stabilizującego i znaleźć pochodną indukcyjności korzystając z równania drugiego modelu 1. Z pomocą prowadzącego dobrane zostały nastawy pozwalające uzyskać efekt stabilizacji z wystarczającą dokładnością. Przedstawia je tabela 1.

człon	wartość
P	50
I	5
D	2.5
Offset	0.52

Tablica 1: Parametry użytego regulatora PID

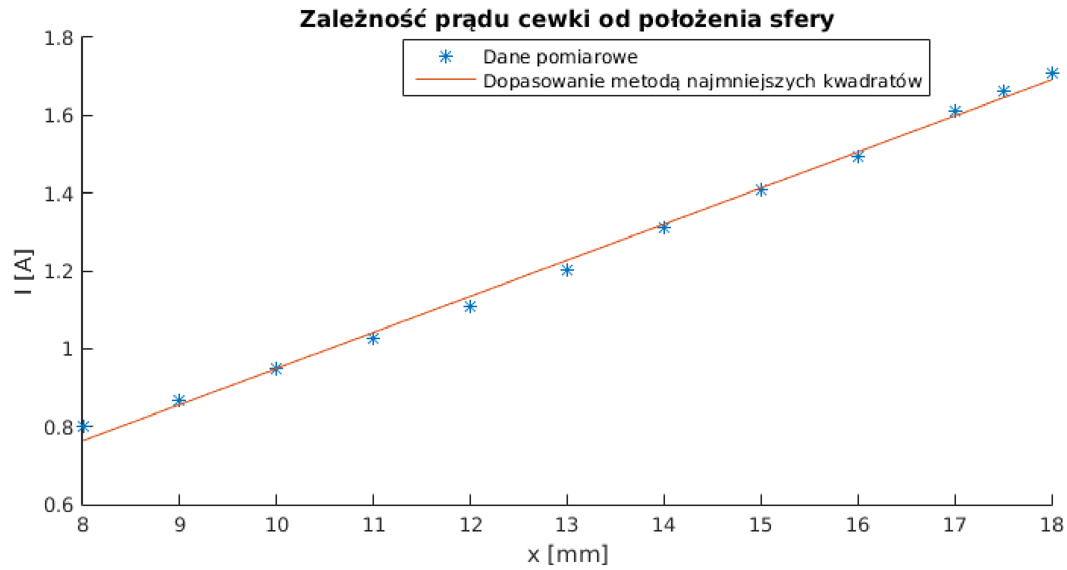
Dysponując możliwością ustawiania pozycji sfery mogliśmy przejść do próby wyznaczenia pochodnej indukcyjności. Poszukiwana postać pochodnej funkcji L:

$$L'(x) = -2 \cdot 10^{-3} \frac{mg}{(ax + b)^2} \tag{7}$$

W stanie ustalonym zachodzi liniowa zależność prądu w stanie ustalonym od położenia:

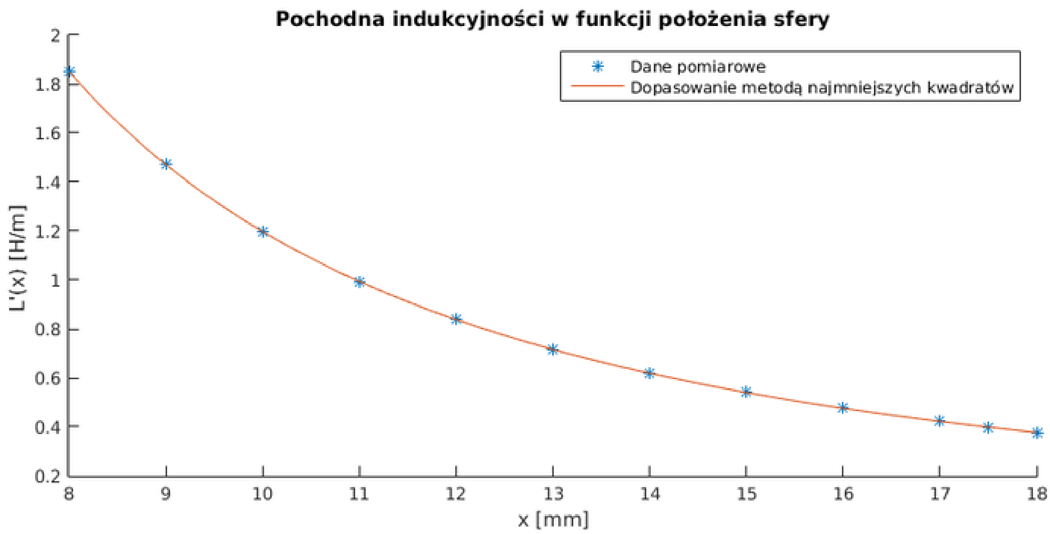
$$I(x) = ax + b = k(u + u_c) \tag{8}$$

Przypuszczenia te potwierdza rysunek 6, przedstawiający dane zebrane podczas identyfikacji obiektu.



Rysunek 6: Identyfikacja prądu cewki w funkcji położenia

Dzięki identyfikacji możliwe było wyznaczenie parametrów prostej wspominanej we wzorze 8, które niezbędne są do wyznaczenia wzoru na pochodną indukcyjności (wzór 7).



Rysunek 7: Identyfikacja pochodnej indukcyjności cewki w funkcji położenia

Wszystkie wyznaczone parametry przedstawia tabela 2.

parametr	wartość
k	...
T_{up}	$0.0245s$
T_{down}	$0.023s$
u_c	..
a	0.0928
b	0.0214
kolejny parametr	2.5
kolejny parametr	0.52

Tablica 2: Parametry wyznaczone w identyfikacji obiektu

2.4 Weryfikacja modelu

Porównanie obiektu i modelu

3 Regulator liniowo-kwadratowy

Po weryfikacji modelu, równania zostały zlinearyzowane. Przyjęto kilka punktów równowagi: 12mm, 14mm, 16mm i 18mm, aby móc przełączać otrzymany później regulator podczas pracy układu i stabilizować go w różnych punktach pracy.

3.1 Linearyzacja

Linearyzacji modelu nieliniowego dokonuje się w otoczeniu punktu równowagi, zastępując nieliniowe równania stanu

$$\dot{x} = f(x) \tag{9}$$

liniowymi równaniami, które można przedstawić w postaci macierzowej

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{10}$$

Aby otrzymać macierz stanu A, należy wyznaczyć macierz Jacobiego pierwszych pochodnych

$$J = \frac{\partial f}{\partial x}(x) \tag{11}$$

a następnie obliczyć jej wartości dla poszczególnych punktów stacjonarnych $x*$

$$A = J(x*) = \frac{\partial f}{\partial x}(x*) \tag{12}$$

Dla równań magnetycznej lewitacji (1) zlinearyzowana macierz ma postać

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \dfrac{2 \cdot 10^{-3} a g x_3^2}{(a x_1 + b)^3} & 0 & \dfrac{-2 \cdot 10^{-3} g x_3}{(a x_1 + b)^2} \\ 0 & 0 & -\dfrac{1}{T} \end{bmatrix}$$

W punkcie równowagi $x_{0_14} = 0,014m$

Literatura

[1] Piotr Bania. Model i sterowanie magnetyczną lewitacją. praca magisterska, 1999.