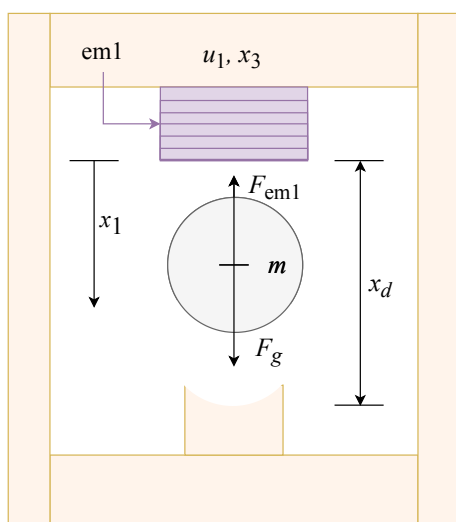


Układ regulacji w oparciu o wektor stanu – projekt

1 Cel ćwiczenia

Projekt ma na celu kompleksowe zapoznanie się z własnościami obiektu i metodami projektowania sterowania z użyciem regulatorów konwencjonalnych oraz wykorzystując cały wektor stanu. W wyniku ćwiczenia powinien powstać układ umożliwiający sterowanie obiektem za pomocą samodzielnie zaimplementowanych algorytmów. Raport końcowy zawierać powinien dokumentację projektu oraz najważniejsze analizy porównawcze i wnioski.

2 Model obiektu sterowania



Przedmiotem projektu jest system lewitacji magnetycznej składający się z elektromagnesu em1 oraz ferromagnetycznej kuli o masie m . Wymuszenie stanowi współczynnik wypełnienia PWM napięcia $u = u_1$ elektromagnesu. Zmiennymi stanu są odpowiednio położenie kuli liczone $x_1 = y$ liczone od magnesu (dla górnej pozycji kuli $y = 0$), prędkość $x_2 = \dot{y}$ oraz prąd $x_3 = i$ płynący przez cewkę. Nieliniowe równania ruchu mają postać:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_3^2 \frac{1}{2m} \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}} \exp\left(\frac{-x_1}{F_{emP2}}\right) + g \\ \dot{x}_3 = \frac{f_2}{f_1} \exp\left(\frac{x_1}{f_2}\right) (k_i u + c_i - x_3) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

Do celów projektowania sterowania potrzebny jest model w postaci liniowej, opisany równaniami macierzowymi. Można go otrzymać w wyniku linearyzacji statycznej równań (1) w pewnym punkcie pracy $\underline{x}_0 = [x_{10}, x_{20}, x_{30}]^T$:

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = \underline{A}\underline{x} + \underline{B}u = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \underline{x} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & g \\ b_{31} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ 1 \end{bmatrix} \\ y = \underline{C}\underline{x} = [1 \ 0 \ 0] \underline{x} \end{cases} \quad (2)$$

$$a_{21} = \frac{1}{2m} x_{30}^2 \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}^2} \exp\left(\frac{-x_{10}}{F_{emP2}}\right), \quad a_{33} = -\frac{f_2}{f_1} \exp\left(\frac{x_{10}}{f_2}\right),$$

$$a_{23} = -\frac{1}{m} x_{30} \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}} \exp\left(\frac{-x_{10}}{F_{emP2}}\right), \quad b_{31} = k_i \frac{f_2}{f_1} \exp\left(\frac{x_{10}}{f_2}\right).$$

$$a_{31} = \frac{1}{f_1} \exp\left(\frac{x_{10}}{f_2}\right) (k_i u_{10} + c_i - x_{30}),$$

Celem sterowania będzie wygenerowanie takiego wypełnienia $u(t)$ napięcia, który pozwoli stabilizować położenie kuli na zadanej wysokości.

Uwaga: położenie $y = 0$ jest dla kuli przyciągniętej maksymalnie do górnego magnesu, a dodatnie położenie liczone jest w dół.

- Oblicz parametry modelu liniowego (2) na podstawie poniższej tabeli.

Przyjmij, że [1][2][3][4][5][6] oznaczają kolejne cyfry numeru albumu reprezentanta grupy projektowej. Jeśli któryś z parametrów wyjdzie zerowy, wybierz jego wartość sprzed pomnożenia przez nr albumu.

Tabela 1: Parametry układu lewitacji

Parametr	Wartość	Jednostka	Opis
m	$0.023/(1 + [5] + [6])$	kg	masa kuli
g	9.81	m/s ²	przyspieszenie ziemskie
F_1	function of \underline{x}	N	siła elektromagnetyczna
F_{emP1}	$1.7521 \cdot 10^{-2}$	H	indukcyjność em1
F_{emP2}	$5.8231 \cdot 10^{-3}$	m	stała konstrukcyjna
f_1	$1.4142 \cdot 10^{-4}$	ms	stała konstrukcyjna
f_2	$4.5626 \cdot 10^{-3}$	m	stała konstrukcyjna
k_i	2.5165	A	stała konstrukcyjna
c_i	$0.0243 \cdot \text{Sign}([2] - [6])$	A	stała konstrukcyjna
d	$0.066 \cdot (1 + 0.1[6])$	m	dystans pomiędzy elektromagnesami
b_d	0.06	m	średnica kuli
x_d	0.015	m	$d - b_d$
Punkt pracy			
x_{10}	0.008	m	położenie kuli
x_{20}	0.00	m/s	prędkość kuli
x_{30}	0.75	A	prąd cewki
u_{10}	$\frac{1}{k_i}(x_{30} - c_i)$	[—]	sterowanie punktu pracy

- Zaimplementuj model (2) w postaci schematu blokowego, ograniczając sygnał sterujący położenia i sygnał sterujący za pomocą bloku **Saturation**. Ograniczenie wynika z budowy obiektu, jak na rysunku. Początkowa wartość położenia powinna wynosić x_d .

Zakłada się ograniczenia: $0 \leq x_1 \leq x_d$, $0 \leq u \leq 1$. **Można pominąć realizację ograniczeń, co skutkować będzie -2 pkt. od uzyskanego wyniku.**

- Sprawdź, korzystając z gotowych funkcji, podstawowe własności: stabilność, sterowalność, obserwowalność.
- Sprawdź, jakie wartości wymuszeń spowodują przyciągnięcie kuli. Zbadaj odpowiedź skokową w układzie otwartym. W razie potrzeby dostosuj okres próbkowania w programie.

3 Regulator PID

- Wyznacz transmitancję obiektu, korzystając z komendy `tf(sys)`.
- Zaprojektuj regulator PID działający z obiektem (podłączenie położenia jako sygnału wyjściowego). Podpowiedź: ze względu na ujemne wzmocnienie transmitancji, można spróbować też zmienić znaki sumatora w sprzężeniu zwrotnym.
- Wybierz nastawy zapewniające stabilną pracę układu. Sprawdź regulację stałowartościową oraz śledzenie sygnału sinusoidalnego (w zakresie ograniczeń położenia).

4 Regulacja ze sprzężeniem od stanu

- Wyznacz, korzystając z funkcji `place` lub `acker`, wzmocnienia sprzężenia od stanu zapewniające stabilizację układu dla wybranych przez Ciebie wartości własnych.
Podpowiedź: oddziaływać możemy tylko na jeden sygnał sterujący z wektora \underline{u} .
- Zaprojektuj regulację stałowartościową na wybranej pozycji (mieszczącej się w zakresie ograniczeń). Wyznacz punkt pracy z modelu (2) dla wybranego położenia x_1 .
- Zbadaj wpływ położenia biegunów układu zamkniętego (szybkość, tłumienie oscylacji dla różnych przypadków) na odpowiedź czasową.
- Zaprojektuj sprzężenie wyprzedzające (na równaniach stanu (2)) i zrealizuj śledzenie trajektorii sinusoidalnej o wybranej amplitudzie i częstotliwości. Zbadaj możliwości śledzenia w zależności od położenia zadanych biegunów.

5 Obserwator stanu

- Powrót do schematu z układem otwartym. Zamknij obiekt do jednego bloku, zaznaczając obszar pomiędzy wejściem a wyjściem, klikając PPM **Create Subsystem**. Uwaga: na wyjściu podsystemu powinna znaleźć się tylko zmienna x_1 jako jedyny sygnał mierzony.
Od tej pory zakłada się, że dostępny jest pomiar położenia, a do reszty zmiennych stanu nie ma bezpośredniego dostępu.
- Zaprojektuj obserwator stanu Luenbergera, korzystając z wymuszenia u oraz tylko pomiaru położenia y . Dobierz za pomocą funkcji `place` / `acker` wzmocnienia obserwatora, sprawdź śledzenie poszczególnych zmiennych stanu w układzie otwartym.
- Zrealizuj regulację stałowartościową z poprzedniego punktu, używając do sprzężenia od stanu wektora estymowanego przez obserwator.

Sprawdź wpływ wybranych zakłóceń pomiarowych i wewnętrznych (szum Gaussa, zmiana części modelu w stosunku do obiektu, różnice wartości początkowych) na jakość regulacji i estymacji.

- Dokonaj dyskretyzacji równań obserwatora metodą ekstrapolacyjną Eulera:

$$\hat{x}^{(k)} = (\mathbf{I} + \mathbf{A}T_p)\hat{x}^{(k-1)} + \mathbf{B}T_p u^{(k-1)} + \mathbf{L}T_p(y^{(k-1)} - \mathbf{C}\hat{x}^{(k-1)}) \quad (3)$$

Sprawdź wpływ okresu próbkowania T_p obserwatora na jakość działania układu na kilku przypadkach. (Podpowiedź: Instrukcja do ćw. 4, *Dyskretny obserwator stanu*).

- Oceń jakość regulacji na podstawie wskaźników jakości I_1 - I_4 (Instrukcja do ćw. 4).

6 Filtr Kalmana

- Dokonaj dyskretyzacji modelu (2) metodą Eulera w przód.
- Zamień obserwator stanu na filtr Kalmana zaimplementowany w bloku **Matlab Fcn** lub **Interpreted Matlab Fcn**, działającym równolegle z obiektem. Wykorzystaj zdyskretyzowany wcześniej model.
- Porównaj wpływ zaszumienia wewnętrznego i pomiarowego na regulację stałowartościową. Zaszumienie pomiarowe powinno mieć charakter szumu białego (blok **Random Number**), dla zakłócenia wewnętrznego można wybrać różne możliwości (jak w p. 5).
Oceń jakość estymacji w układzie zamkniętym za pomocą wskaźników jakości RMSE oraz J (jak w *Badanie własności filtru Kalmana – sprawozdanie*).

7 Liniowe przekształcenie

- Przekształć równania obiektu (2) do postaci kanonicznej sterowalnej, używając gotowych funkcji.
- Przekształć równania obiektu (2) do postaci diagonalnej, używając gotowych funkcji.

8 Zawartość sprawozdania

W raporcie należy zamieścić tylko elementy, o których mowa poniżej. Pozostałe polecenia z p. 2-7 mogą zostać przeze mnie sprawdzone indywidualnie lub przedstawione w trakcie oddania projektu. Prezentując wynik, należy opisać jakie parametry zostały wykorzystane w układzie (zadane bieguny, wartości nastaw, itp.).

Raport końcowy powinien zawierać:

- skład osobowy grupy, przyjęte parametry obiektu
- CZĘŚĆ I – obiekt regulacji
 - macierzowe równania stanu (2) w postaci liczbowej (po podstawieniu stałych według tab. 1)
 - schemat blokowy Simulink realizujący równania obiektu z ograniczeniami (zrzut ekranu)
 - odpowiedź układu na skok jednostkowy oraz krótką interpretację fizyczną uzyskanego wyniku (przebiegu położenia)
 - wyniki sprawdzenia stabilności, sterowalności i obserwowalności
- CZĘŚĆ II – regulator PID
 - wyznaczoną transmitancję $G(s)$ obiektu regulacji
 - schemat układu regulacji (zrzut ekranu), wybrane nastawy regulatora
 - wynik symulacji – sygnał sterujący oraz sygnał wyjściowy dla regulacji stałowartościowej i śledzenia sygnału sinusoidalnego
- CZĘŚĆ III – sprzężenie od stanu
 - wyznaczenie macierzy stanu dla układu zamkniętego oraz sposób obliczenia wzmocnień sprzężenia (może być listing kodu) wraz z ich wartościami liczbowymi
 - wyznaczenie wszystkich składowych prawa sterowania dla regulacji (wzmocnienia, model odwrotny, punkt pracy regulacji stałowartościowej); prawa sterowania podaj na symbolach, nie na liczbach
 - schemat układu (lub schematy / listingi funkcji) w programie SIMULINK
 - analizę porównawczą przebiegów dla wybranej postaci zadanej dynamiki układu zamkniętego, dla wybranej konfiguracji biegunów z p. 4. – sygnał wyjściowy i sterujący
 - krótkie porównanie możliwości regulacji ze sprzężeniem od stanu oraz PID
- CZĘŚĆ IV – obserwator stanu
 - sposób wyznaczenia wzmocnień obserwatora (niezbędne wzory, listing kodu)
 - schemat układu zamkniętego z obserwatorem, z obiektem regulacji zamkniętym w podsystem
 - przebiegi porównawcze zmiennych stanu „prawdziwych” oraz estymowanych w układzie otwartym i zamkniętym, dla wybranej konfiguracji wartości własnych
 - dla powyższej konfiguracji wartości wskaźników jakości I_1 - I_4 zamieszczone w tabeli, krótki komentarz do wyników
 - listing kodu realizujący funkcję dyskretnego obserwatora stanu

- CZEŚĆ V – filtr Kalmana
 - dyskretyzację obiektu oraz listing kodu realizujący KF
 - wyniki i analizę porównawczą (przebiegi zmiennych stanu z obiektu i estymowanych) dla wybranej konfiguracji parametrów jak w p. 6.
 - dla powyższej konfiguracji wartości wskaźników jakości RMSE, J zamieszczone w tabeli, krótki komentarz do wyników
- CZEŚĆ VI – liniowe przekształcenie
 - przekształcenie do postaci kanonicznej oraz diagonalnej – listing kodu, otrzymane wyniki liczbowe
 - interpretację, czym *fizycznie* są otrzymane zmienne

Proszę NIE UMIESZCZAĆ w raporcie wstępu teoretycznego.

Podczas obrony projektu mogę prosić o wykonanie przy mnie symulacji dla zadanej struktury lub drobne zmiany parametrów układu – proszę mieć przy sobie działające pliki z układem regulacji.

Proszę załączyć pliki projektów do każdego ćwiczenia tak, bym mógł je u siebie otworzyć. W przypadku korzystania z nowszej wersji programu MATLAB, proszę dokonać konwersji schematu Simulinka na 2022a. Proszę, aby do każdego z punktów 2-7 został załączony schemat o nazwie `zad_nr_sch` i/lub skrypt `zad_nr`. Przykładowo: `zad_2_sch` i/lub skrypt `zad_2`.

Pliki i raport zamieszcza jeden reprezentant grupy.

9 Punktacja

- 1 pkt. – realizacja obiektu w formie schematu i interpretacja wyniku
- 2 pkt. – implementacja działającego regulatora PID
- 4 pkt. – regulacja ze sprzężeniem od stanu
- 4 pkt. – obserwator stanu
- 4 pkt. – filtr Kalmana
- 2 pkt. – liniowe przekształcenie
- 3 pkt. – sprawozdanie: ogólna forma i poprawność wniosków

Brak wykonania danego podpunktu skutkował będzie nieprzyznaniem punktów ze tę część. W przypadku wykonania niepełnej zawartości polecenia przyznana zostanie tylko część punktów.

UWAGA:

Za wersję podstawową projektu można przyjąć realizację p. 2-4 oraz obserwator z p. 5 tylko w układzie otwartym. Pozwoli ona na uzyskanie 12 punktów i można przyjąć, że taka wersja **wystarczy** do zaliczenia przedmiotu w przypadku sumarycznej liczby punktów przekraczającej 50%.