



**KATEDRA MECHANIKI I PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN
POLITECHNIKA OPOLSKA**

MECHATRONIKA

Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych

Symulacja pracy silnika prądu stałego

Opracował: Dr inż. Roland Pawliczek

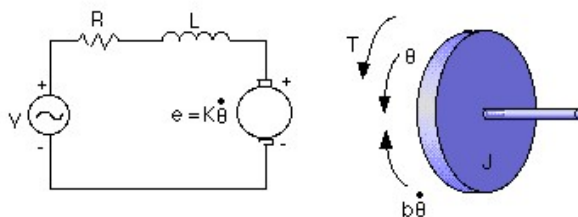
Opole 2016

1. Cel ćwiczenia.

Celem ćwiczenia jest przeprowadzenie symulacji pracy silnika prądu stałego z wykorzystaniem pakietu oprogramowania LabVIEW Simulation Module. Symulacja obejmuje formułowanie modelu matematycznego oraz budowę odpowiadającej mu struktury graficznej w programie LabVIEW. Badane jest zachowanie się silnika przy sterowaniu w pętli otwartej.

2. Model fizyczny silnika prądu stałego i równania układu.

Rysunek 1 przedstawia obwód elektryczny twornika oraz model wirnika.



Rys. 1. Obwód elektryczny twornika oraz model wirnika

Do przeprowadzenia symulacji przyjęto następujące parametry:

- moment bezwładności wirnika $J = 0.01 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
- współczynnik tłumienia układu mechanicznego $b = 0.1 \text{ Nms}$
- stała silnika $K = 0.01 \text{ Nm/A}$
- opór elektryczny $R = 1 \Omega$
- indukcyjność $L = 0.5 \text{ H}$
- V : napięcie źródła (wejście)
- θ : kat obrotu wałka silnika (wyjście)
- założono, że stojan i wirnik są ciałami sztywnymi

Moment obrotowy T jest związany z natężeniem prądu i w obwodzie za pomocą współczynnika proporcjonalności K , zaś indukowane napięcie e jest zależne od prędkości kątowej wirnika według następujących równań

$$\begin{aligned} T &= Ki \\ e &= K\omega = K \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

Wykorzystując prawo Kirchhoffa dla obwodu elektrycznego oraz równanie dynamiki ruchu obrotowego wirnika można zapisać

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} + Ri &= V - K \frac{d\theta}{dt} \\ J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} &= Ki \end{aligned} \quad (2)$$

Przyjmując, że napięcie V jest sygnałem wejściowym a kąt obrotu θ sygnałem wyjściowym, transmitancję operatorową układu można zapisać w postaci:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \quad (3)$$

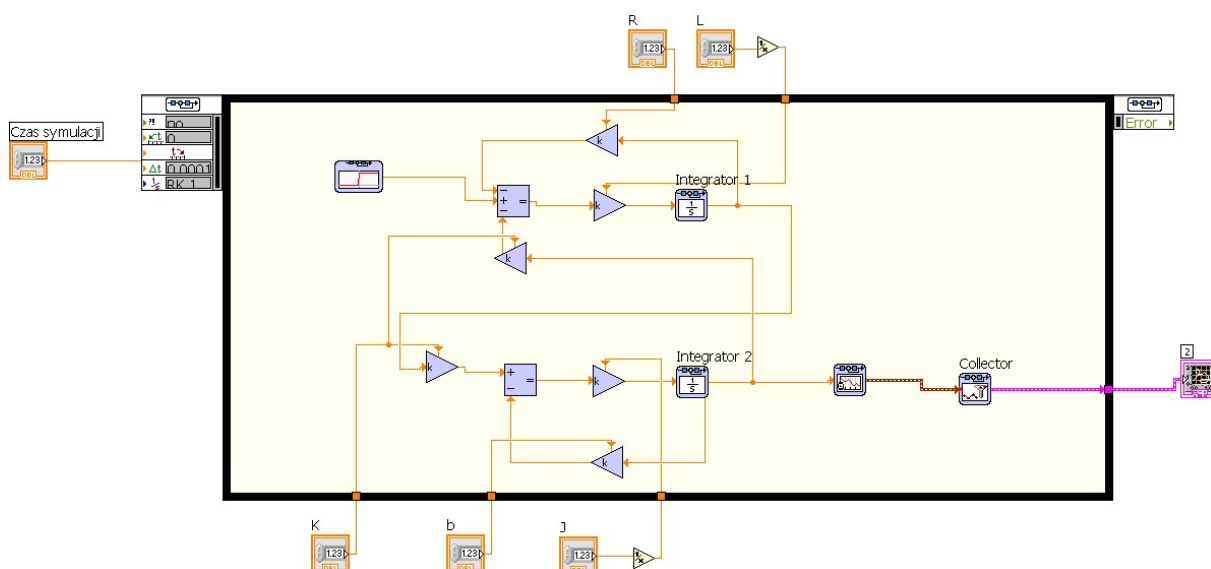
Układ równań (2) można przekształcić do następującej postaci

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L} \left(-Ri + V - K \frac{d\theta}{dt} \right) \\ \text{b)} \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} &= \frac{1}{J} \left(Ki - b \frac{d\theta}{dt} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

w którym przyspieszenie kątowe jest sumą dwóch składników (jeden „dodatni” i jeden „ujemny”) pomnożonych przez odwrotność momentu bezwładności wirnika zaś pochodna prądu jest sumą trzech składników (jeden „dodatni” i dwa „ujemne”) pomnożonych przez odwrotność indukcyjności obwodu.

Przykładowy kod programu graficznego pokazano na Rys. 2.

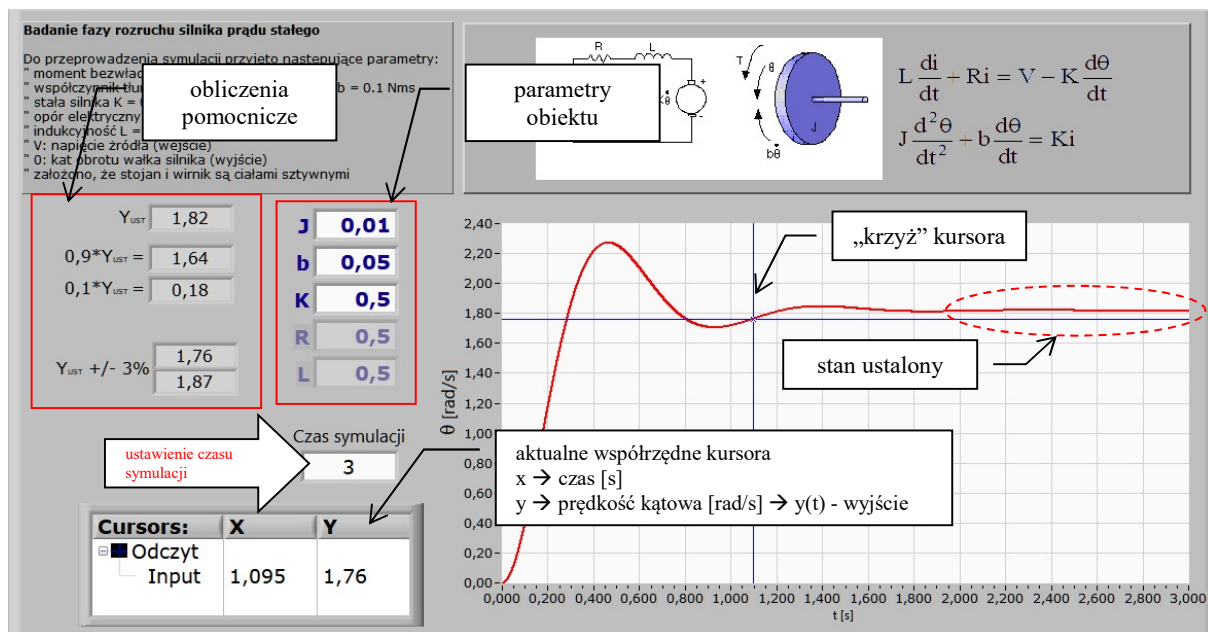
Element *Integrator 1* jest odpowiedzialny za operację całkowania równania 4a (prąd) zaś element *Integrator 2* jest odpowiedzialny za operację całkowania równania 4b (przyspieszenie kątowe). Z punktu widzenia pracy silnika istotna jest analiza prędkości obrotowej, która jest proporcjonalna do prędkości kątowej – z tego powodu kod programu przewiduje tylko jednokrotne całkowanie przyspieszenia. Tak więc rezultat jest obrazem zmian prędkości kątowej wirnika.



Rys. 2. Kod graficzny programu symulacyjnego

3. Symulacja pracy silnika z wykorzystaniem pakietu LabVIEW.

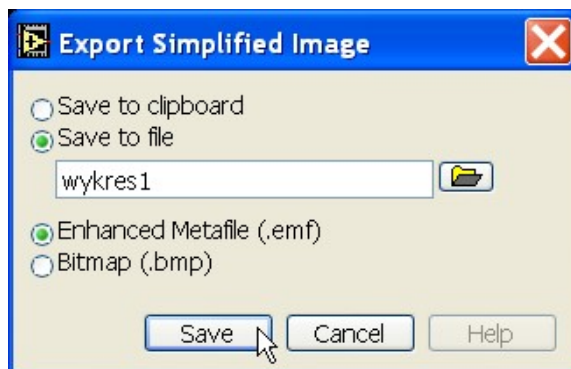
W celu przeprowadzenia symulacji pracy silnika w LabVIEW należy otworzyć plik **silnik_DC.vi** lub uruchomić stosowny program symulacyjny według zaleceń prowadzącego. Na ekranie pojawi się interfejs użytkownika (Rys.3).



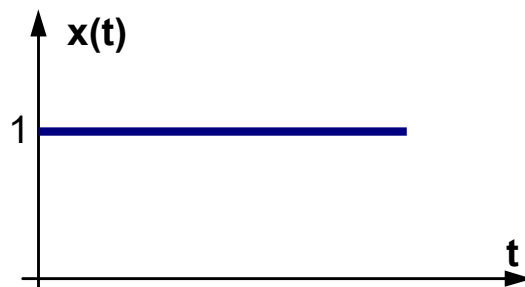
Rys. 3. Interfejs użytkownika programu symulacyjnego

- Przed uruchomieniem programu należy wprowadzić zadane **parametry obiektu** w odpowiednich polach do wprowadzania danych.
- Program jest uruchamiany za pomocą strzałki  w lewym górnym rogu okna programu pod belką Menu głównego. **Po uruchomieniu programu należy poczekać na wykonanie obliczeń !**
- Na wykresie powinien być widoczny wyraźnie **stan ustalony** (poziomy odcinek po prawej tronie wykresu). Jeżeli nie jest on widoczny należy zwiększyć **czas symulacji** i powtórzyć obliczenia.
- W obszarze **obliczenia pomocnicze** zostaną wyświetlone wartości odpowiedzi $y(t)$, które są pomocne przy odczytach.
- Aktualne wartości współrzędnych kursora (X, Y) odpowiadają odpowiednio czasowi i wartości sygnału wyjściowego $y(t)$. Kursor można przesuwając wzdłuż wykresu za pomocą myszki.

Wykresy mogą być zapisane na dysku za pomocą menu kontekstowego, wywołanego **Prawym Klawiszem Myszy (PKM)** z kursorem umieszczonym w obszarze wykresu. Zapis na dysk odbywa się za pomocą opcji **Export/Export Simplified Image...** i podaniu nazwy oraz lokalizacji dla zapisywanego obrazu.

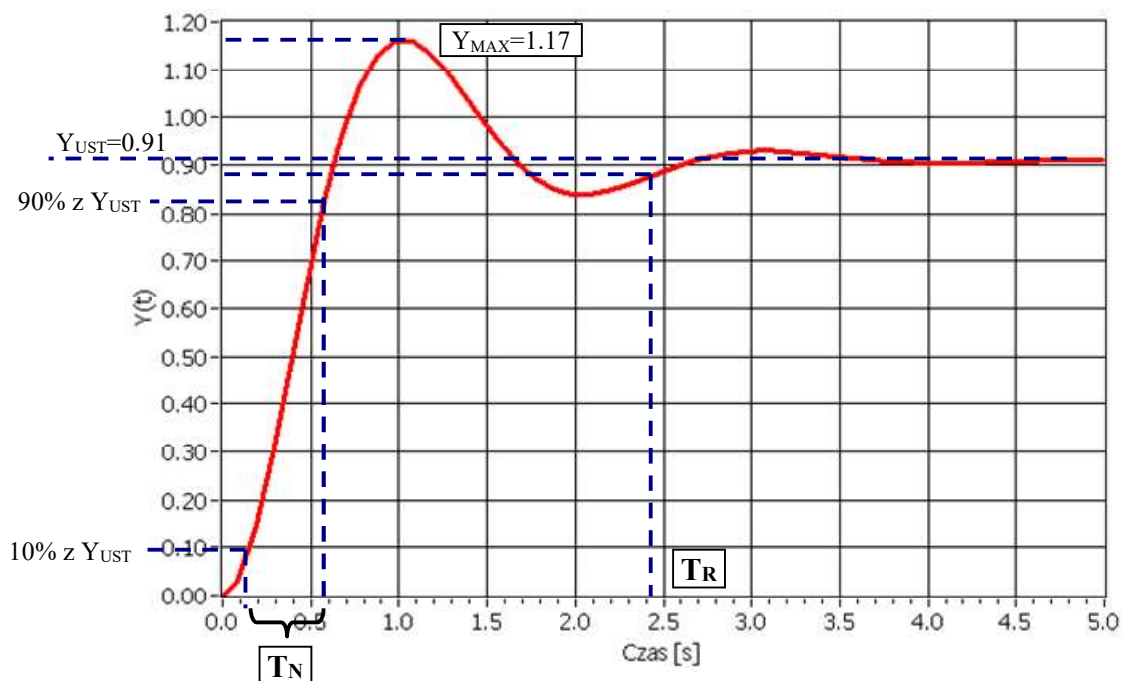


Rezultatem symulacji jest wykres reprezentujący zmianę prędkości obrotowej silnika w jego fazie rozruchowej. W celu łatwiejszej analizy i możliwości porównawczych jako sygnał wejściowy zastosowano skok jednostkowy (Rys. 5). Polega on na podaniu na wejście obiektu w pewnej chwili czasu $t=0$ impulsu o stałej wartości (najczęściej 1). Za pomocą takiego sygnału możliwe jest określenie sposobu reakcji obiektu na pojawiające się zmiany sygnału wejściowego. Reakcja obiektu na wymuszenie skokowe nazywana jest *odpowiedzią skokową*.



Rys. 5. Wymuszenie skokowe jednostkowe

Poniżej przedstawiono przykładowy wykres odpowiedzi skokowej układu.



Rys. 6. Odpowiedź skokowa układu z oznaczonymi parametrami

Wykorzystując wykres można określić:

- poziom sygnału wyjściowego w stanie ustalonym Y_{UST} ,
- **czas regulacji** (czas ustalania) T_R – czas, po którym wartość sygnału wyjściowego układu nie będzie odbiegać od wartości tego sygnału w stanie ustalonym o więcej niż 3%,
- **czas narastania** T_N – czas potrzebny do wzrostu odpowiedzi skokowej układu od 10% do 90% wartości ustalonej,
- **przeregulowania** $S=(Y_{MAX} - Y_{UST})/Y_{UST}$ – stosunek wartości maksymalnej uchybu sygnału do wartości sygnału w stanie ustalonym.

4. Przebieg ćwiczenia

1. Wykonać wykresy odpowiedzi skokowej dla zadanych parametrów J , b , K , R i L .
2. Wykonać wykresy dla wartości parametrów:
 - $J_1=0,5 \cdot J$, $J_2=J$, $J_3=1,5 \cdot J$, pozostałe bez zmian: b , K , R i L ,
 - $b_1=0,5 \cdot b$, $b_2=b$, $b_3=1,5 \cdot b$, pozostałe bez zmian: J , K , R i L ,
 - $K_1=0,5 \cdot K$, $K_2=K$, $K_3=1,5 \cdot K$, pozostałe bez zmian: J , b , R i L .

UWAGA: w razie konieczności zmienić czas symulacji.

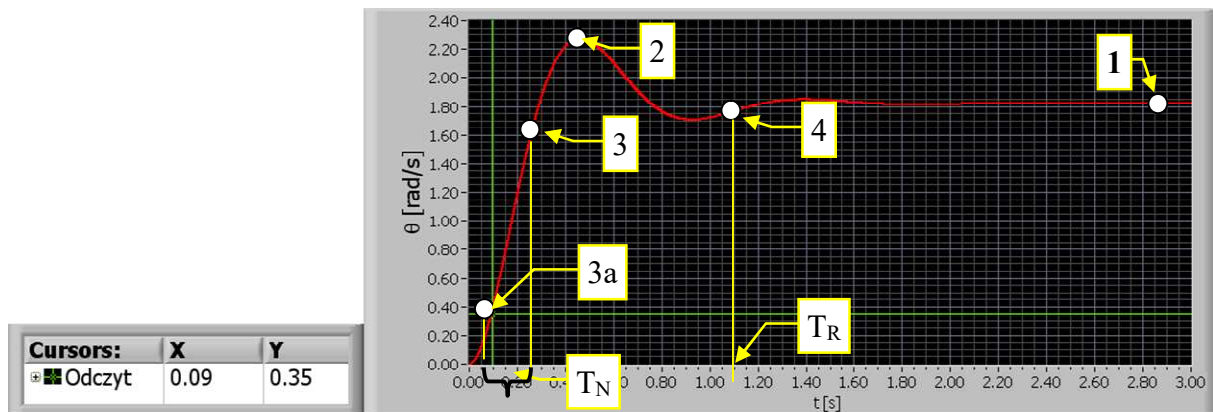
Zestaw danych:

a) J 0.5 b 0.5 K 1 R 1 L 0.5	b) J 0.3 b 0.1 K 0.2 R 1 L 0.5	c) J 0.05 b 0.1 K 0.5 R 1 L 0.5	d) J 1 b 0.25 K 0.6 R 1 L 0.5	e) J 1 b 0.25 K 0.6 R 0.5 L 0.5
f) J 0.01 b 0.8 K 0.8 R 0.5 L 0.5	g) J 0.25 b 0.1 K 1 R 0.75 L 0.5	h) J 0.05 b 0.1 K 0.1 R 2 L 0.5	i) J 0.1 b 0.05 K 0.2 R 1 L 0.5	k) J 0.4 b 0.2 K 0.5 R 0.1 L 0.5

Tabela wyliczonych parametrów do symulacji:

$R=$	$R=$	$R=$
$L=$	$L=$	$L=$
$K=$	$K=$	$J=$
$b=$	$J=$	$b=$
$J_1=$	$b_1=$	$K_1=$
$J_2=$	$b_2=$	$K_2=$
$J_3=$	$b_3=$	$K_3=$

5. Przykład analizy wykresu



Rys. 7. Przykładowa analiza wykresu

W celu określenia parametrów układu należy przeprowadzić analizę wykresu według następujących kroków:

1. Ustawić kursor w skrajnym prawym położeniu na wykresie w tej jego części, gdzie następuje stabilizacja poziomu sygnału (*np. punkt 1 na rys. 7*). Z tabelki współrzędnych kursora odczytać wartość Y i zapisać jako Y_{UST} .
2. Ustawić kursor na maksymalnym wychyleniu wykresu (*np. punkt 2 na rys. 7*). Z tabelki współrzędnych kursora odczytać wartość Y i zapisać jako Y_{MAX} . Jeżeli nie występuje przeregulowanie $Y_{MAX} = Y_{UST}$.
3. Obliczyć przeregulowanie: $S = [(Y_{MAX} - Y_{UST}) / Y_{UST}] \cdot 100\%$.
4. Odczytać z obliczeń pomocniczych wartość sygnału $Y(3) = 0,9 \cdot Y_{UST}$ oraz $Y(3a) = 0,1 \cdot Y_{UST}$ a następnie przesunąć kursor od początku wykresu do chwili, kiedy współrzędna Y kursora osiągnie wartość zbliżoną do wyliczonej $Y(3)$ (*np. punkt 3 na rys. 7*) oraz $Y(3a)$ (*np. punkt 3a na rys. 7*), odczytać współrzędne X(3) oraz X(3a) kursora i obliczyć czas narastania $T_N = X(3) - X(3a)$.
5. Odczytać przedział 3% wartości Y_{UST} dla określenia czasu regulacji:

$$Y_G = 1,03 \cdot Y_{UST}, Y_D = 0,97 \cdot Y_{UST}.$$

Przesunąć kursor od prawej strony wykresu do chwili, kiedy współrzędna Y kursora przyjmie pierwszą z wartości Y_D lub Y_G (*np. punkt 4 na rys. 7*). Zanotować współrzędną X kursora jako czas regulacji T_R .

Tabela pomiarów:

Nr Rys.	Nastawy:	Y_{UST} [rad/s]	Y_{MAX} [rad/s]	S [%]	T_N [s]	T_R [s]
1	$J_1 =$ $b =$ $K =$					
2	$J_2 =$ $b =$ K					
3	$J_3 =$ $b =$ $K =$					
4	$J =$ $b_1 =$ $K =$					
5	$J =$ $b_2 =$ $K =$					
6	$J =$ $b_3 =$ $K =$					
7	$J =$ $b =$ $K_1 =$					
8	$J =$ $b =$ $K_2 =$					
9	$J =$ $b =$ $K_3 =$					

6. Sprawozdanie

1. Wykonać analizę wykresów i określić parametry odpowiedzi skokowej: poziom sygnału w stanie ustalonym, czas narastania, czas regulacji, przeregulowania.
2. Zamieścić tabelę pomiarów oraz odpowiadające im wykresy.
3. Opisać wpływ parametrów układu na zmiany parametrów odpowiedzi skokowej układu.

W sprawozdaniu należy zamieścić rezultaty pomiarów, obserwacje i wnioski.

LITERATURA

- [1] M.Gawrysiak: Mechatronika i projektowanie mechatroniczne, Rozprawy Naukowe Nr 44, Polit. Białostocka, Białystok, 1997
- [2] B.Heiman, W.Gerth, K.Popp: Mechatronika: komponenty, metody, przykłady, tł. M. Gawrysiak, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001
- [3] J.Giergiel, T.Uhl: Identyfikacja układów mechanicznych, PWN, Warszawa, 1990
- [4] K. Mańczak: Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania, WNT, Warszawa, 1971
- [5] Afonin A., Szymczak P., Mechatronika, Skrypt Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2001