

Szybkie prototypowanie algorytmów sterowania

Andrzej Turnau

Katedra Automatyki Akademii Górniczo-Hutniczej

w Krakowie





Rozwój techniki komputerowej umożliwia odmienne niż dawniej podejście do projektowania układów regulacji.

	Metoda	Regulator	Obiekt
1	Regulator rzeczywisty strojony bezpośrednio na obiekcie	rzeczywisty	rzeczywisty
2	Wirtualny obiekt sterowania i wirtualny regulator	symulowany	symulowany
3	Regulator rzeczywisty w sprzężeniu zwrotnym symulowanego modelu – <i>hardware-in-the-loop</i>	rzeczywisty	symulowany
4	Regulator symulowany sprzężony zwrotnie z rzeczywistym obiektem sterowania – <i>szybkie prototypowanie</i>	symulowany	rzeczywisty

W tym samym środowisku programowym MATLAB/Simulink i na tej samej platformie sprzętowej (przenośny laptop) zostaje wykorzystany gotowy algorytm sterowania.

Metodę polegającą na symulowaniu modelu regulatora sprzęgniętego zwrotnie z rzeczywistym obiektem sterowania nazwano *szybkim prototypowaniem*. Symulowany regulator podlega strojeniu na rzeczywistym obiekcie. A więc, nie model lecz sam obiekt weryfikuje działanie algorytmu sterowania.

Procedura prototypowania jest stosunkowo szybka. Głębsze zmiany struktury regulatora wymuszają rekompilację (ale trwa ona tylko dziesiątki sekund). Zmiany parametrów regulacji na ogół nie wymagają już kompilacji.

Prototypowanie sterowników

Integracja środowisk programowych – automatyczne przejście od języka symulacji Simulink (przez tworzenie kodu C) do kodu wynikowego procesora sterującego.

Strojenie parametrów regulatora z poziomu Simulinka, bez konieczności rekompilacji i łączenia.

Szybki (kilka minut) proces kompilacji i łączenia, przy modyfikacji struktury sterownika.

Zabezpieczenie warunków pracy w czasie rzeczywistym, przy częstotliwości przetwarzania w granicach od 100 Hz do 10 kHz.

Elektromagnes

Źródło światła

Fototranzystor

**Lewitująca kula
ferromagnetyk**

**Ruchoma podpórka
kalibracyjna**

**Taśma
sygnałowa do
karty USB**



Do prezentacji szybkiego prototypowania najlepiej wybrać obiekt niewielki (poręczny dla przenośnej demonstracji) lecz o nie trywialnej dynamice.

System lewitującej kuli w polu magnetycznym sterowany z laptopa przy pomocy zewnętrznej karty pomiarowo-sterującej spełnia z nadmiarem nasze oczekiwania. Charakteryzuje go nieliniowa dynamika trzech zmiennych stanu: wertykalnego położenia kuli, jej prędkości i prądu cewki elektromagnesu.

Kula wykonana z materiału ferromagnetycznego jest unoszona w otoczeniu niestabilnego punktu równowagi na skutek zmian natężenia pola elektromagnetycznego.



Odnosi się wrażenie, że kula jest nieruchoma. Naprawdę, wykonuje niewielkie drgania wynikające z opóźnień czasowych mechanicznych ruchu kuli w górę i w dół oraz z opóźnień obwodu elektrycznego L/R .

Kula opada na skutek grawitacji. Już minimalny ruch w dół powoduje, że zmniejsza się powierzchnia cienia rzucanego przez kulę na fototranzystor. To prowadzi do wzrost prądu fototranzystora.

Prąd, który zasila cewkę elektromagnesu to ten sam sygnał co prąd fototranzystora tylko proporcjonalnie wzmocniony.

Jeśli rośnie, to rośnie także natężenie pola elektromagnesu, co powoduje, że kula zaczyna unosić się w górę. Czyli zwiększa się obszar cienia fototranzystora, maleje jego prąd, ... i tak dalej.



Magnetyczna Lewitacja



HARDWARE (wyposażenie techniczne)

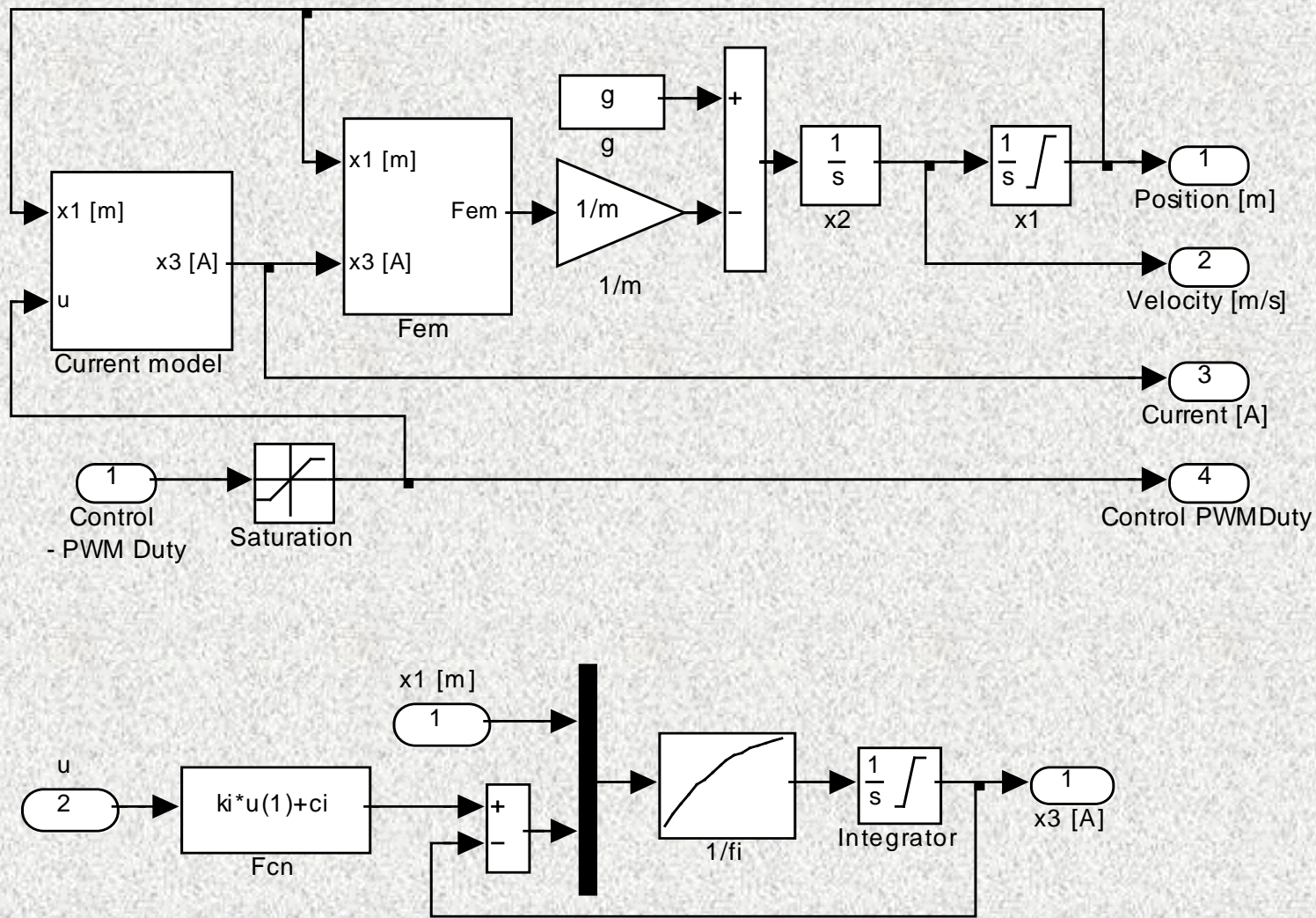
- elektromagnes i kulka ferromagnetyczna
- czujnik położenia kulki
- czujnik prądu elektromagnesu
- interface mocy
- RT-DAC/USB karta I/O pomiarowo-sterująca
- laptop.

SOFTWARE (oprogramowanie)

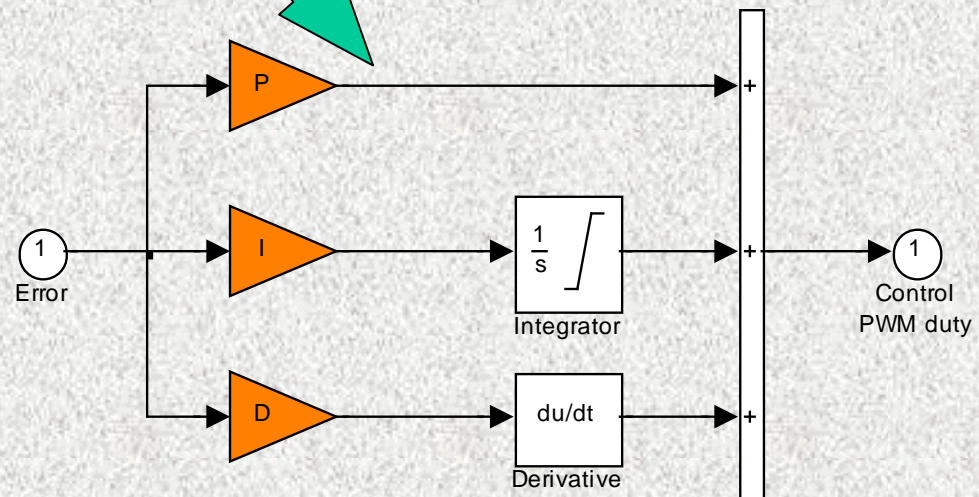
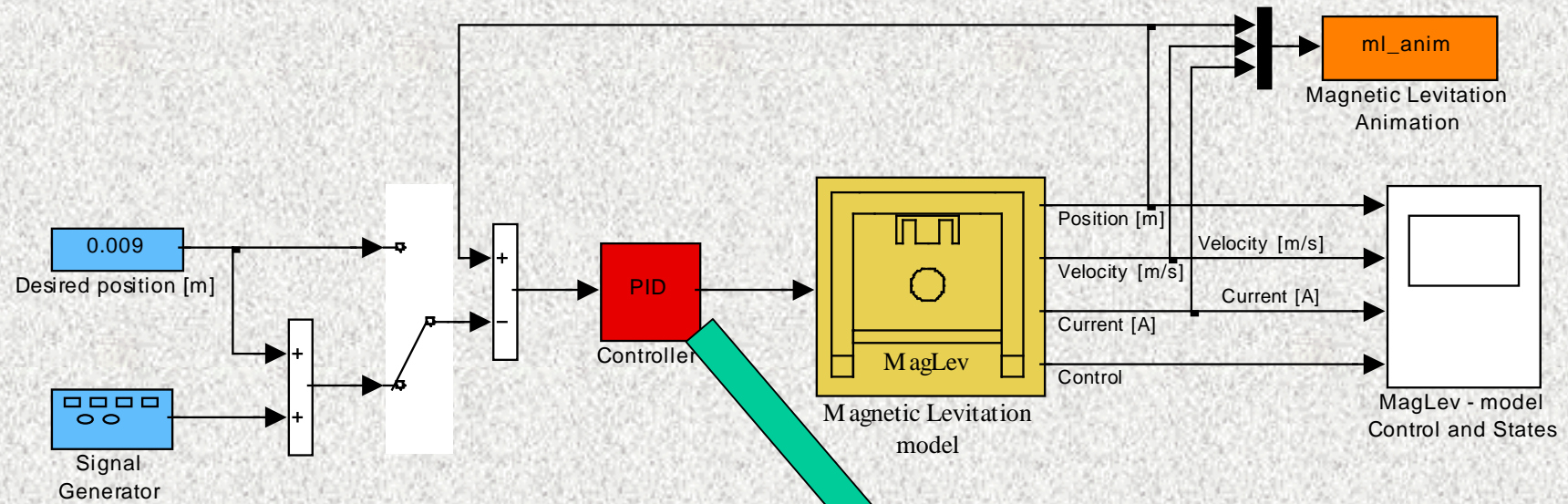
W laptopie instaluje się:

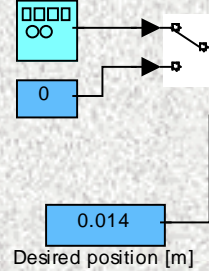
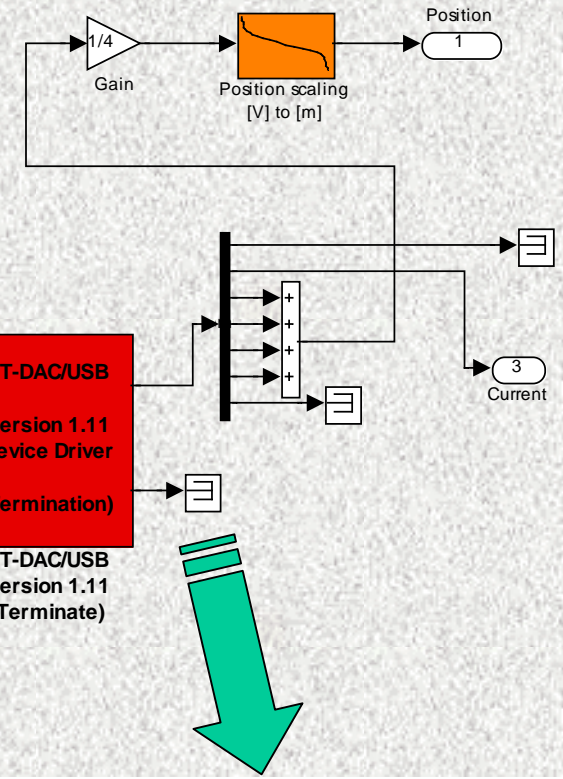
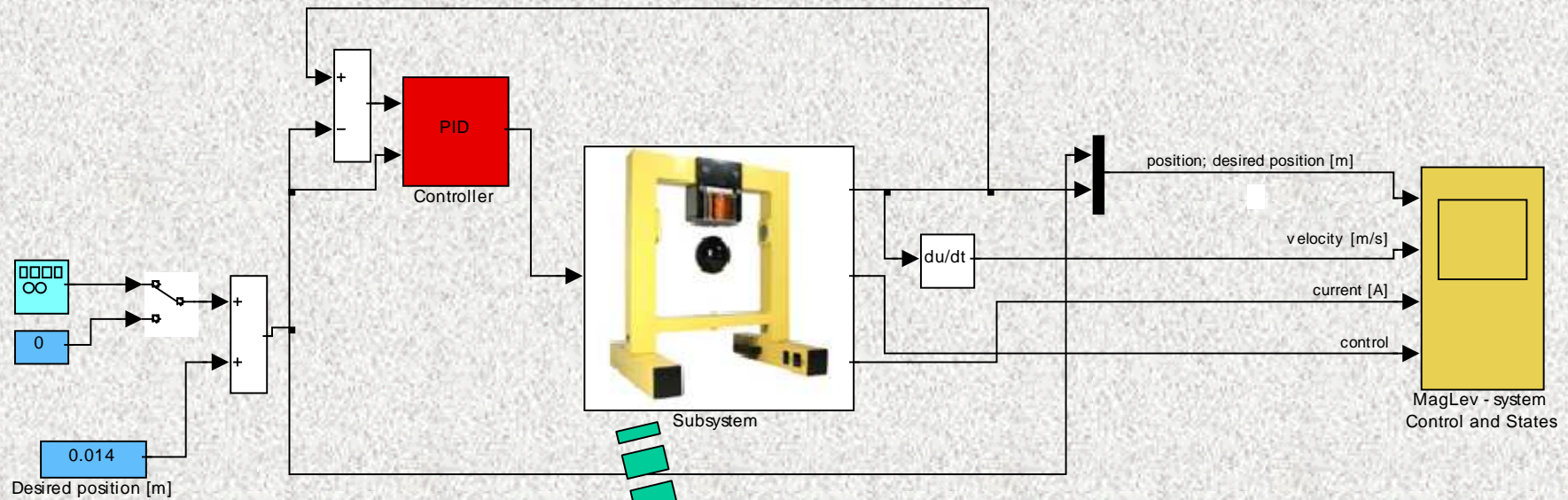
- MS Windows XP.
- MATLAB wersja. 6.5; Simulink 5 lub wyższe wersje
- przybornik Signal Processing do budowy projektu
- przybornik Control do budowy projektu
- przybornik Real Time Workshop do generacji kodu
- RTWT – rozszerzenie MS Windows do pracy w czasie rzeczywistym
- przybornik ML wyposażony w sterowniki do komunikacji z kartą USB
- kompilator MS Visual C++ do generowania kodu

Model dynamiczny magnetycznej lewitacji

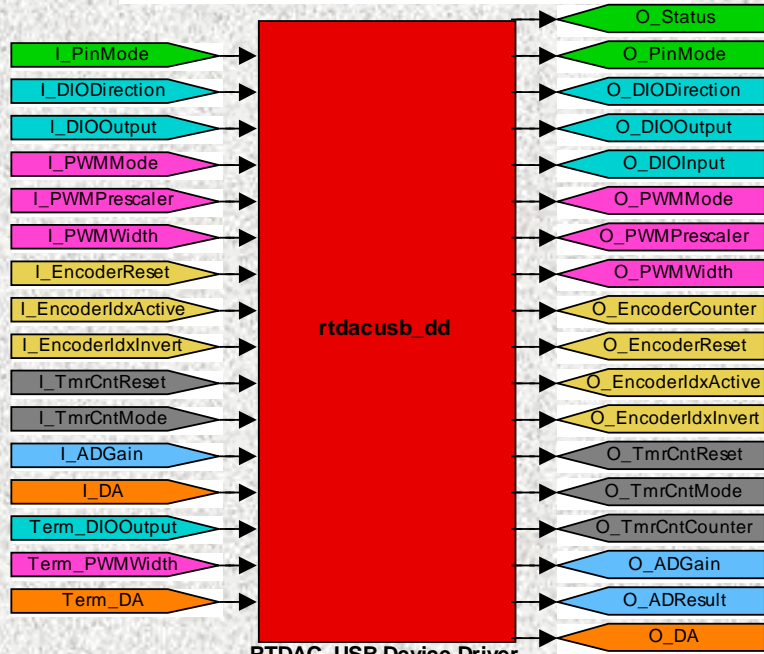


Model regulacji PID

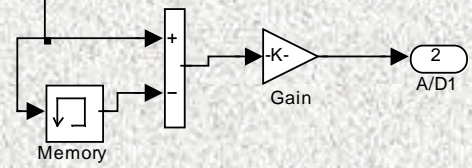
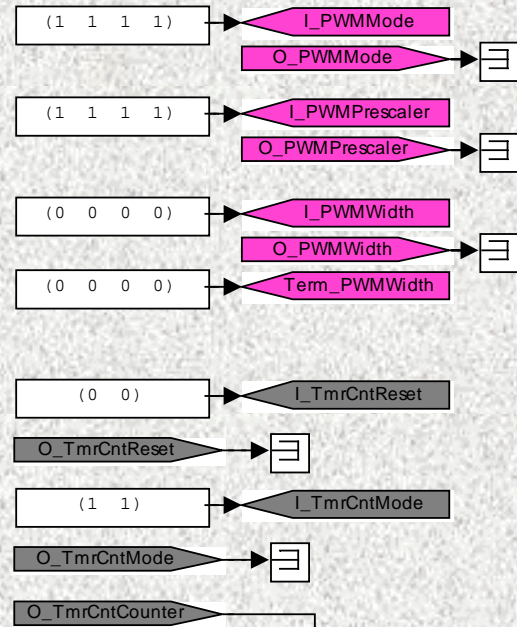
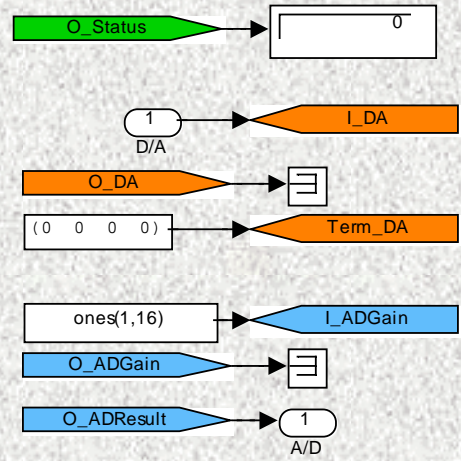
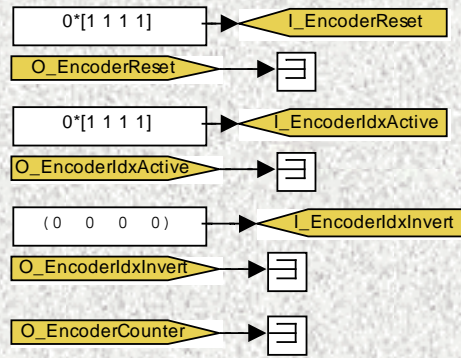
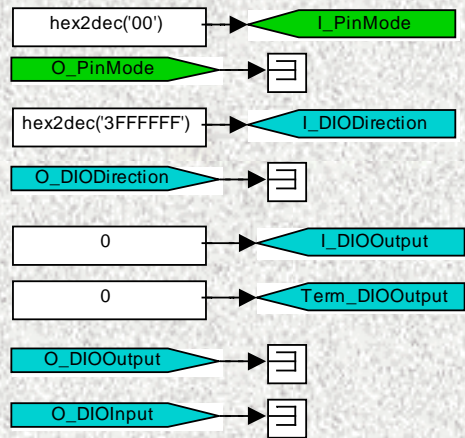




RT-CON/RTDAC-USB Device Driver Version 1.11



RTDAC_USB Device Driver
Version 1.11
(Termination)

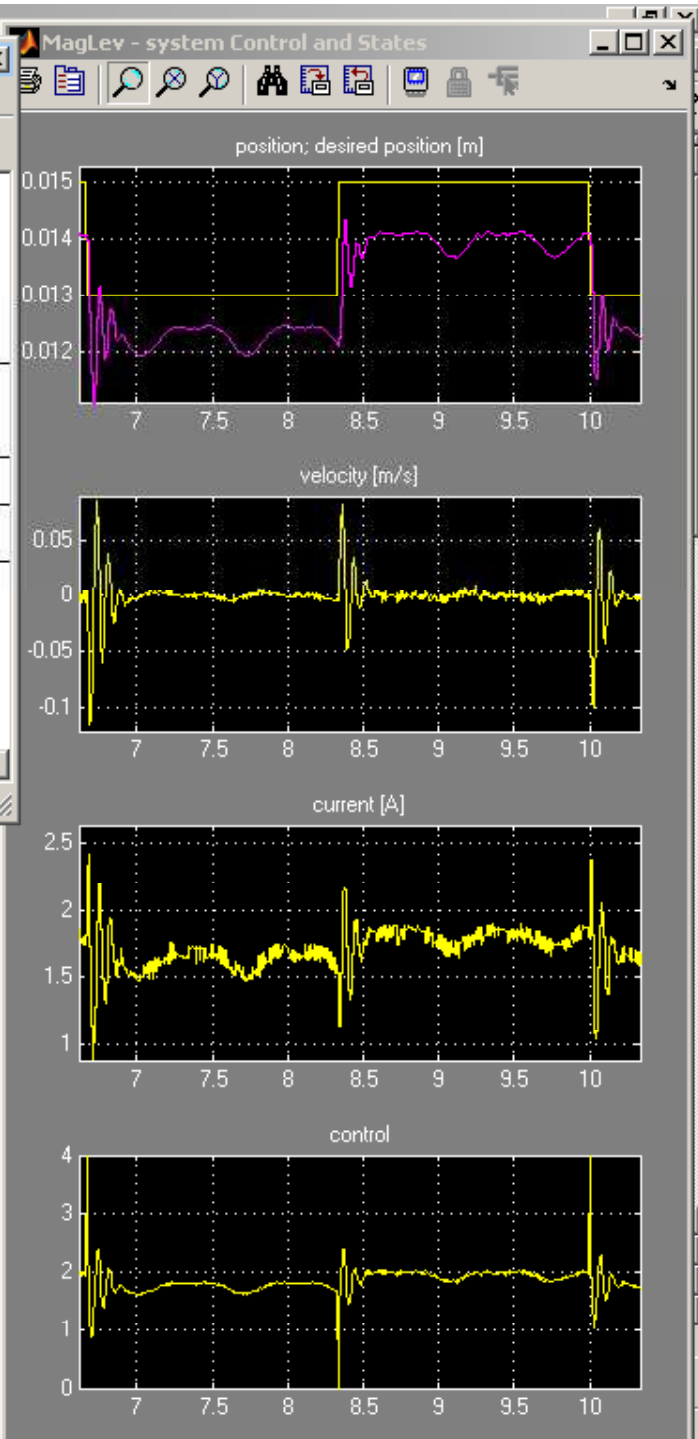
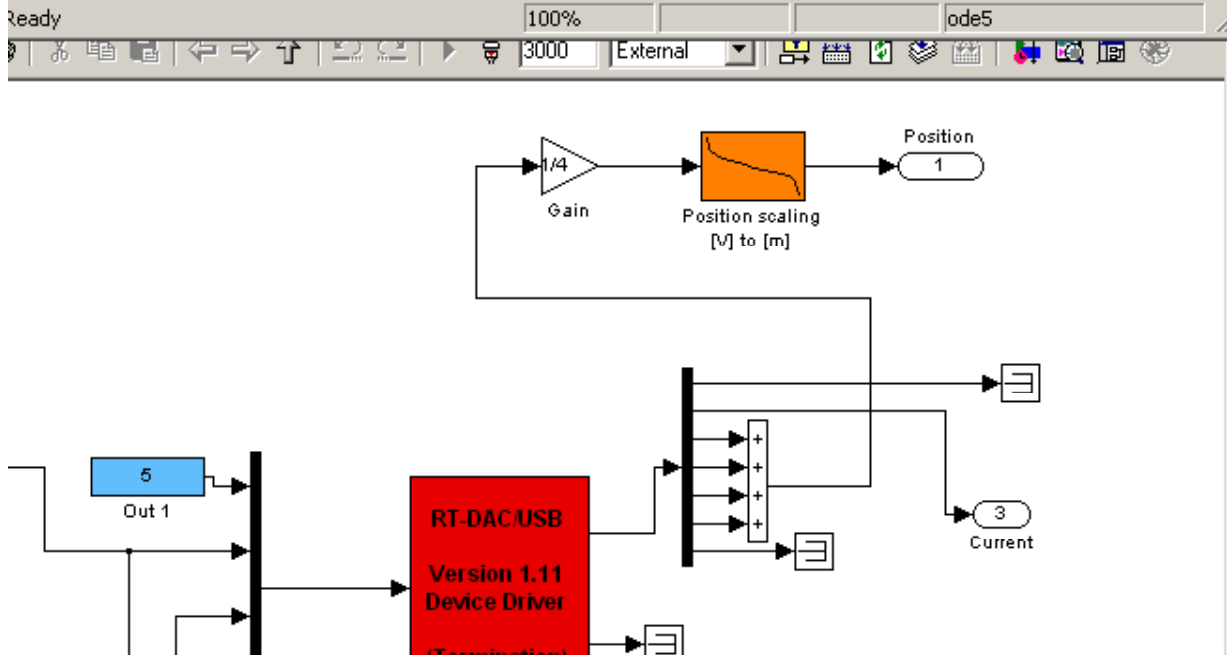
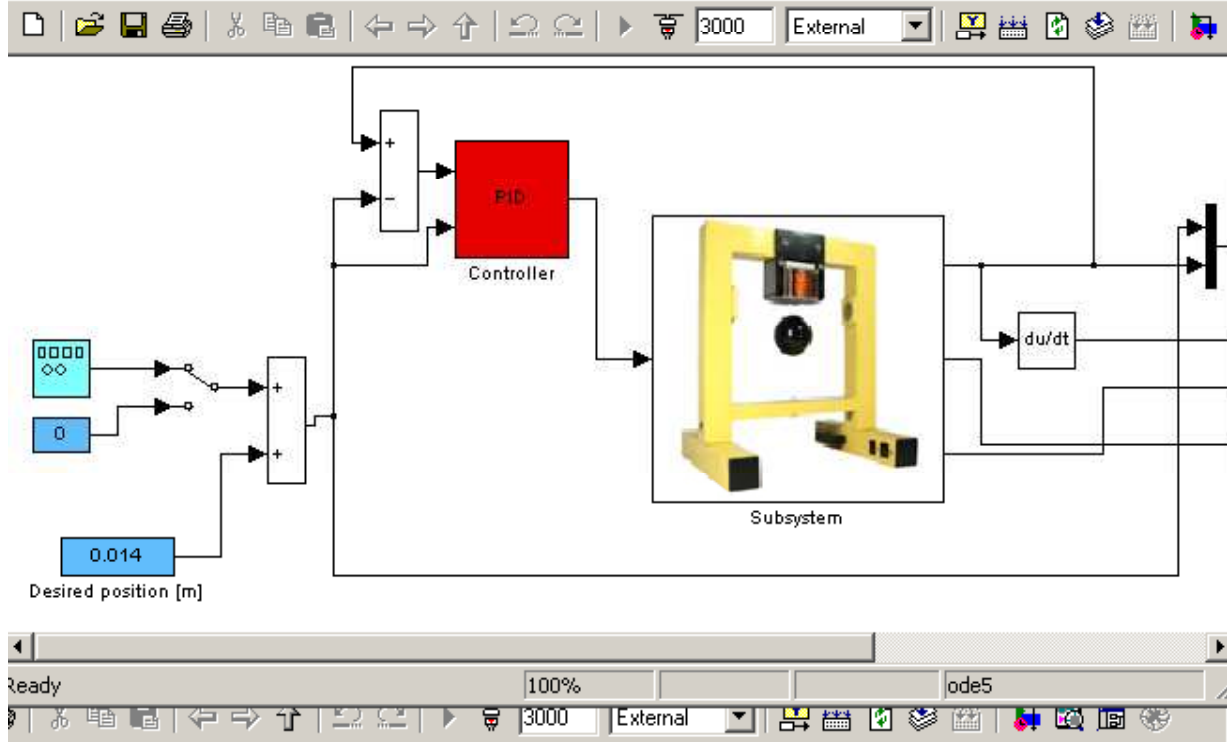


Korzystając z metody projektuje się regulatory: PID, w logice rozmytej, neuronowe, optymalne, używające reguł i adaptacyjne. Kula porusza się w takt i śledzi różne sygnały wartości zadanej.



Najciekawsze jednak w przypadku lewitacji jest konieczność zapewnienia punktualnych i szybkich pomiarów i generacji sterowań. Algorytm powstały na drodze czysto symulacyjnej nie będzie skuteczny w układzie czasu rzeczywistego, jeśli nie zagwarantuje się czasu próbkowania rzędu 1ms i minimalnej nierównomierności okresów próbkowania (jitter).

Ograniczenia czasowe wymiany informacji przy korzystaniu z protokołu USB niekorzystnie oddziałują na fluktuacje okresów próbkowania. Winowajcą jest też system operacyjny MS Windows, który zawłaszcza przerwania. Wspomagamy się RTWT czy RT-CON tzw. rozszerzeniami by przymusić MS Windows do pracy w czasie rzeczywistym.



Model matematyczny lewitacji

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{F_{em}}{m} + g \quad F_{em} = c_1 x_3^2 e^{-c_2 x_1}$$

$$\dot{x}_3 = c_3 e^{c_4 x_1} (ku + b - x_3)$$

$$x_1 \in [0, 0.016] \text{ m}$$

$$x_2 \text{ m/s} \quad \text{prędkość kuli}$$

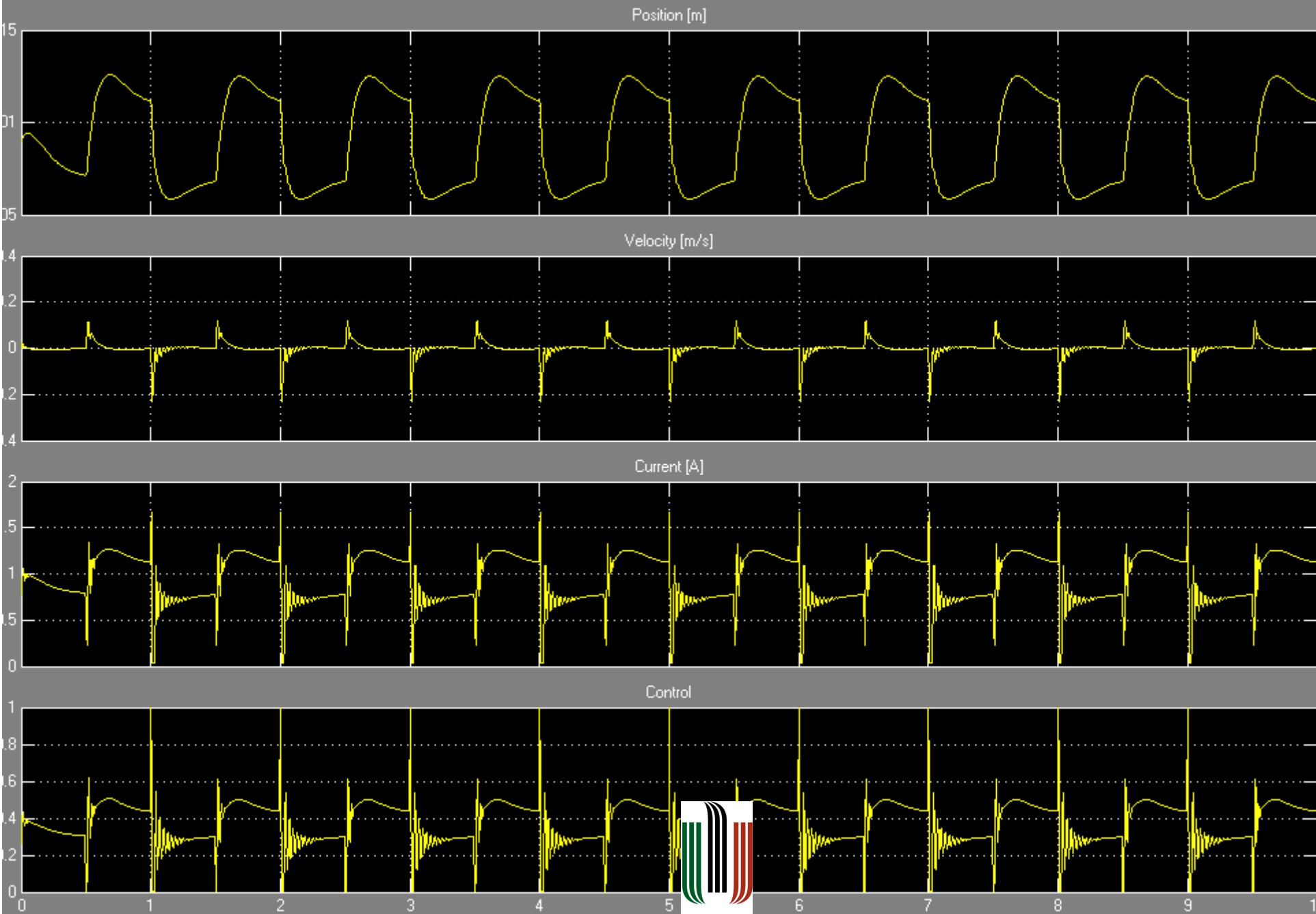
$$x_3 \in [0.039 \ 2.38] \text{ A} \quad \text{prąd w cewce}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2 \quad \text{przyspieszenie ziemskie}$$

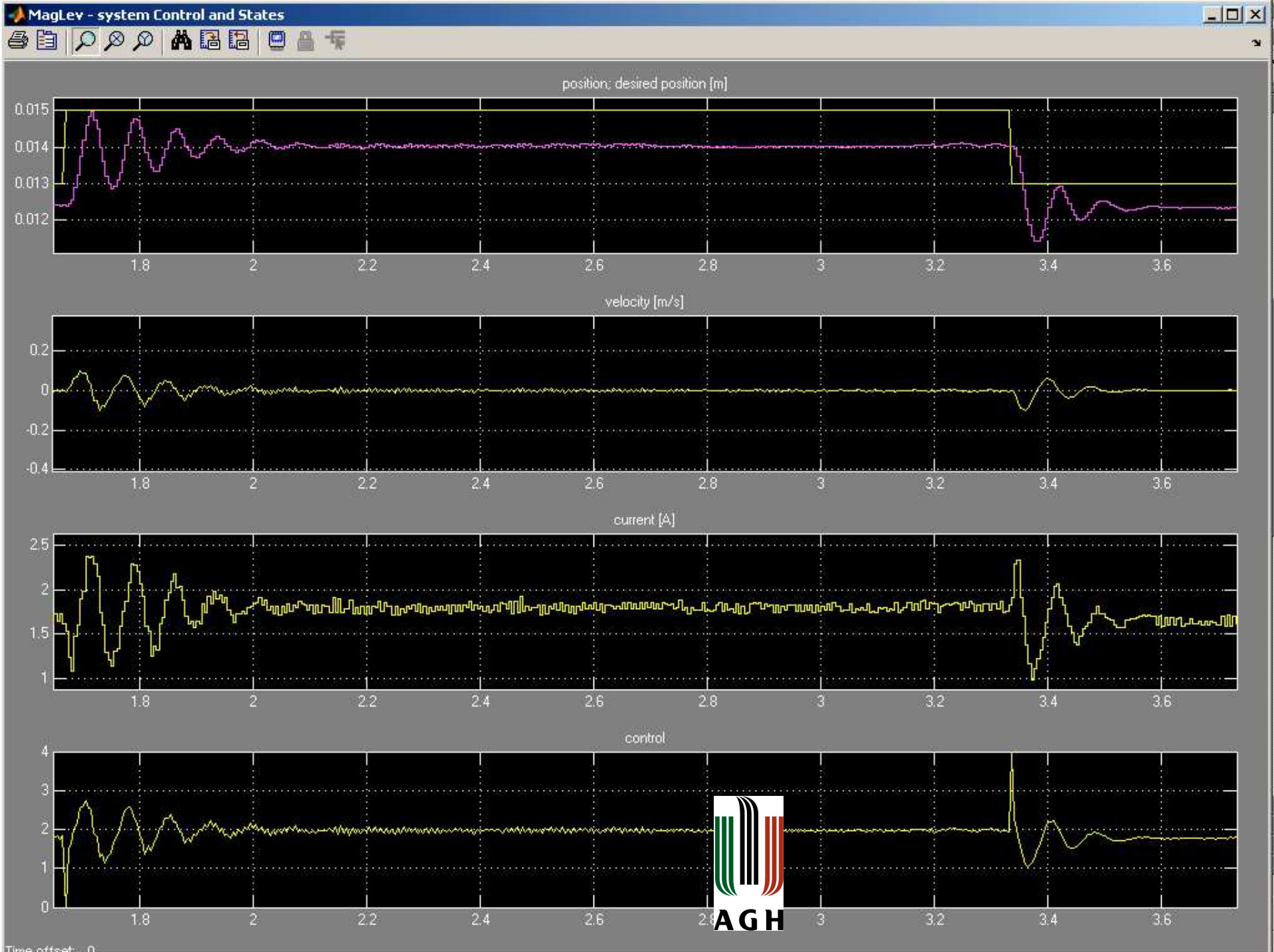
$$m = 0.057 \text{ kg} \quad \text{masa kuli}$$

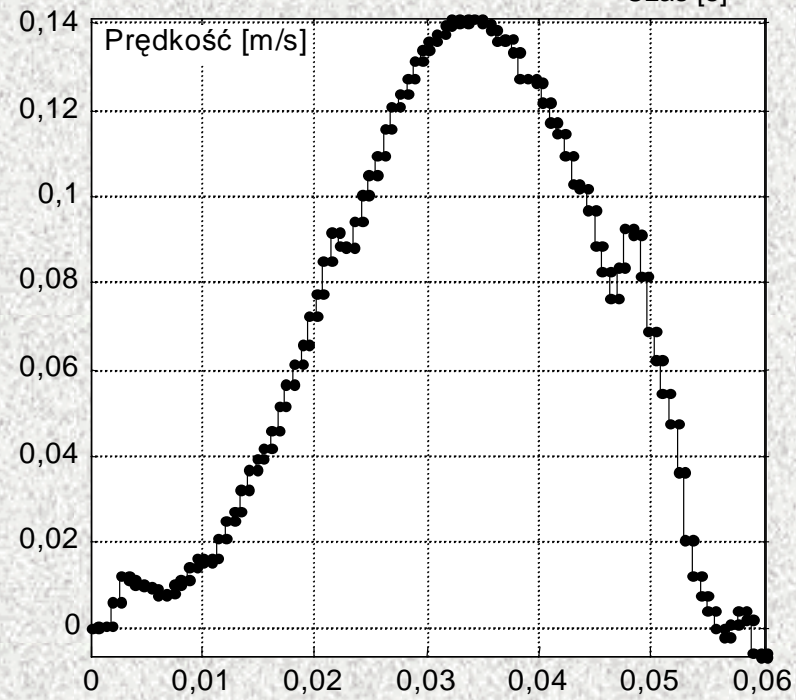
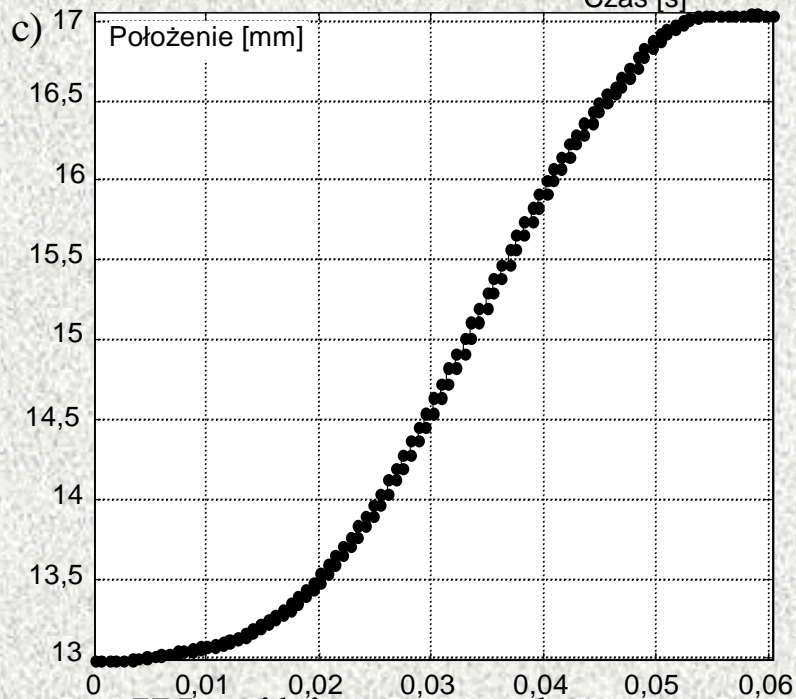
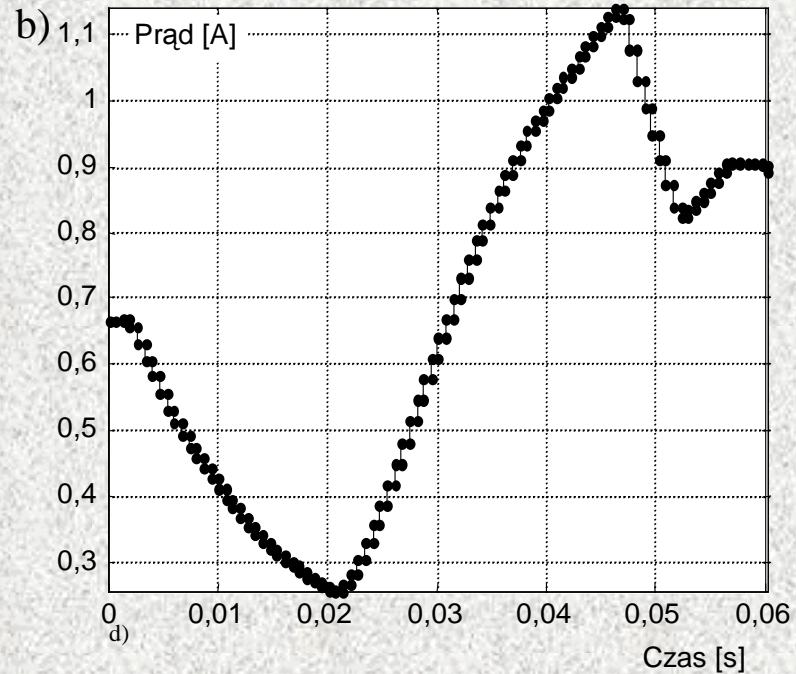
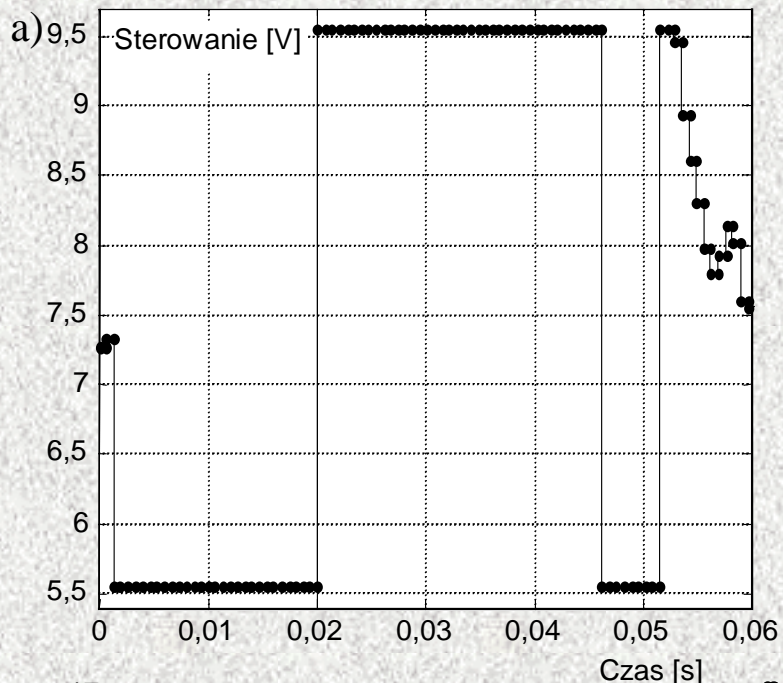
$$u \in [0.005 \ 1] \quad \text{sterowanie PWM}$$

$$F_{em} \text{ N} \quad \text{siła elektromagnetyczna}$$

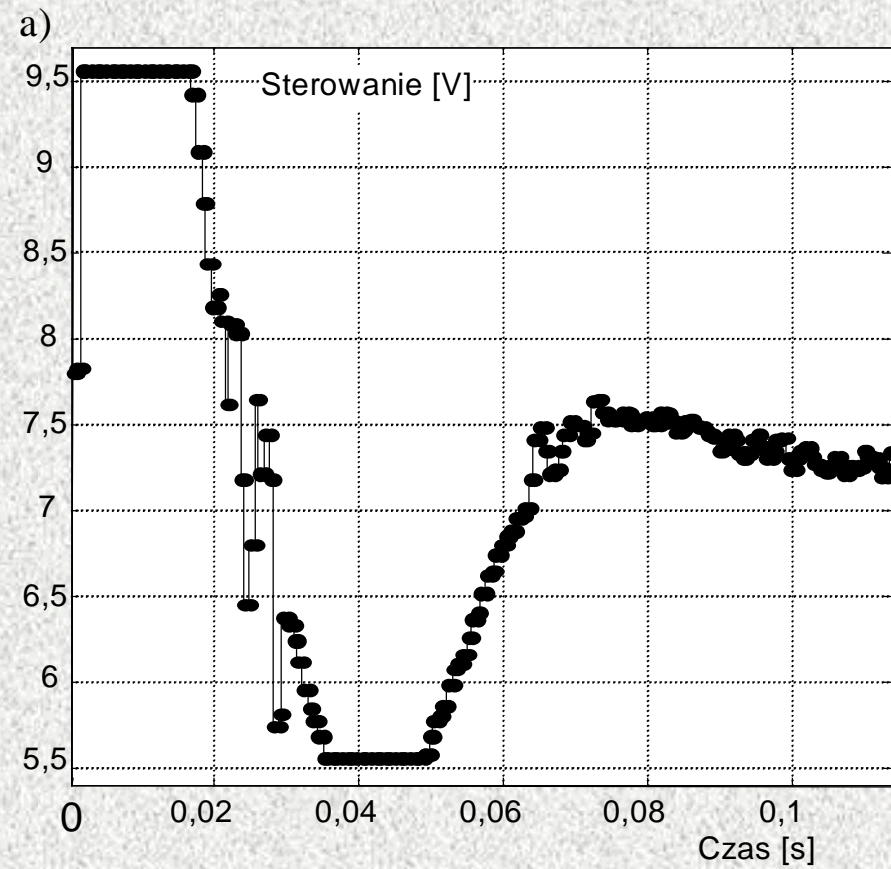
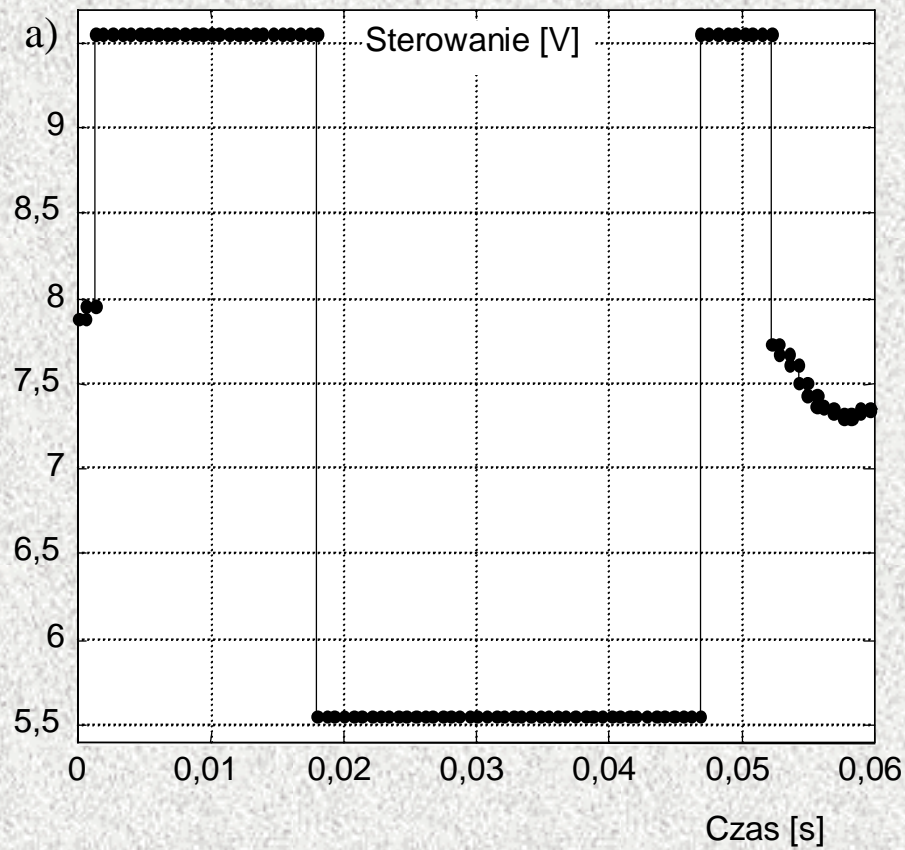


AGH

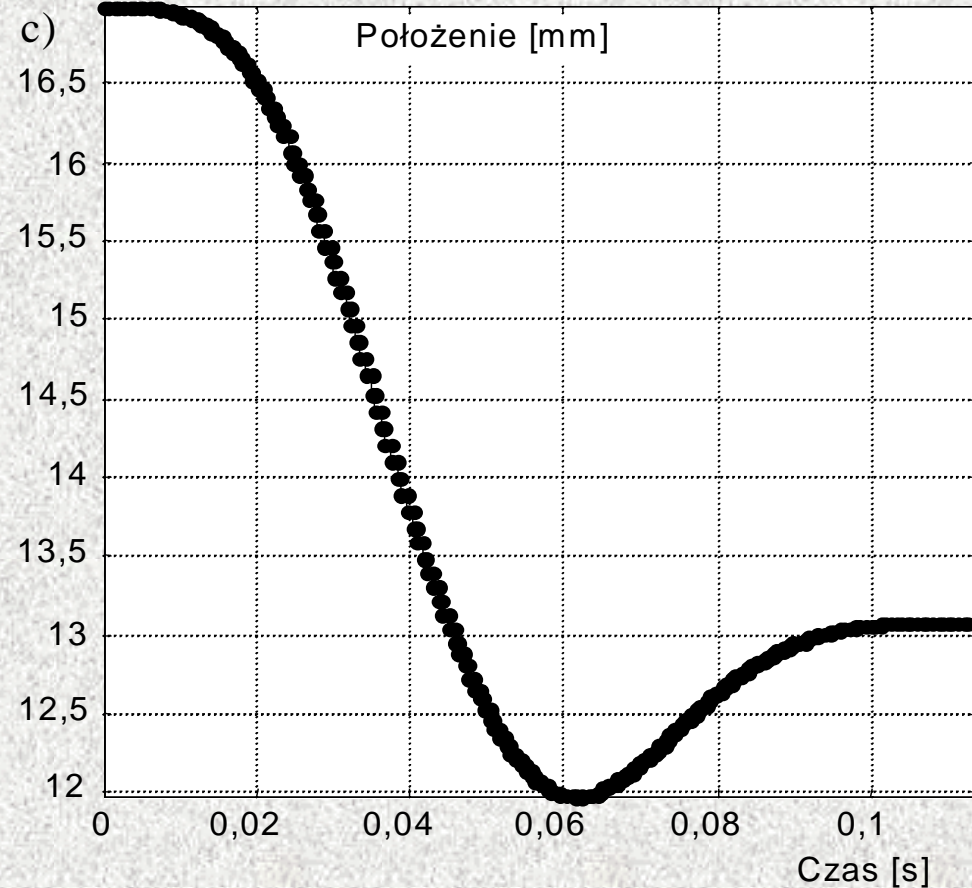
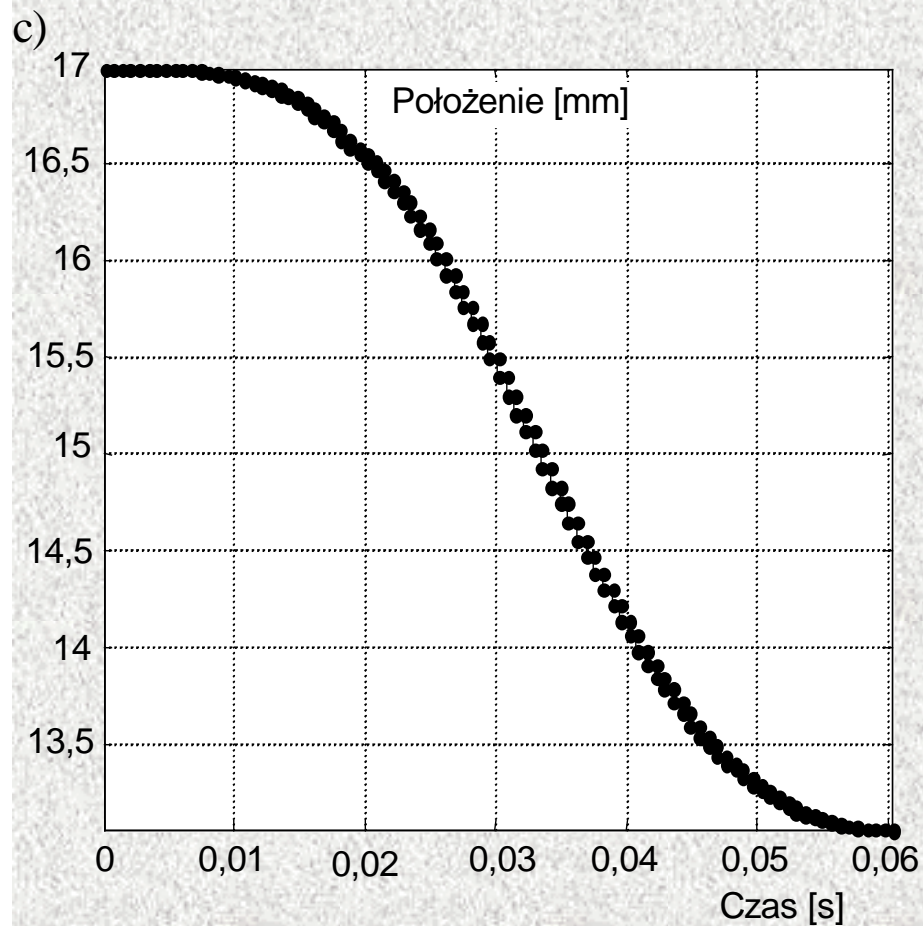




Wyniki optymalnego czasowego przemieszczenia kulki w dół:



Wyniki optymalnoczasowego i liniowo-kwadratowego przemieszczenia kulki w górę



Wyniki optymalnoczasowego i liniowo-kwadratowego przemieszczenia kulki w górę