



**Wydział Mechaniczny**  
Politechniki Białostockiej  
Katedra Automatykacji Procesów Przemysłowych

Instrukcja do zajęć projektowych z przedmiotu:

## **SYSTEMY AUTONOMICZNE**

Temat zadania projektowego:

### **Projektowanie układu sterowania i nawigacji śmigłowca wielowirnikowego jako systemu autonomicznego**

Kod przedmiotu: MYAR2S22007M

Instrukcję opracował: Dr inż. Leszek Ambroziak

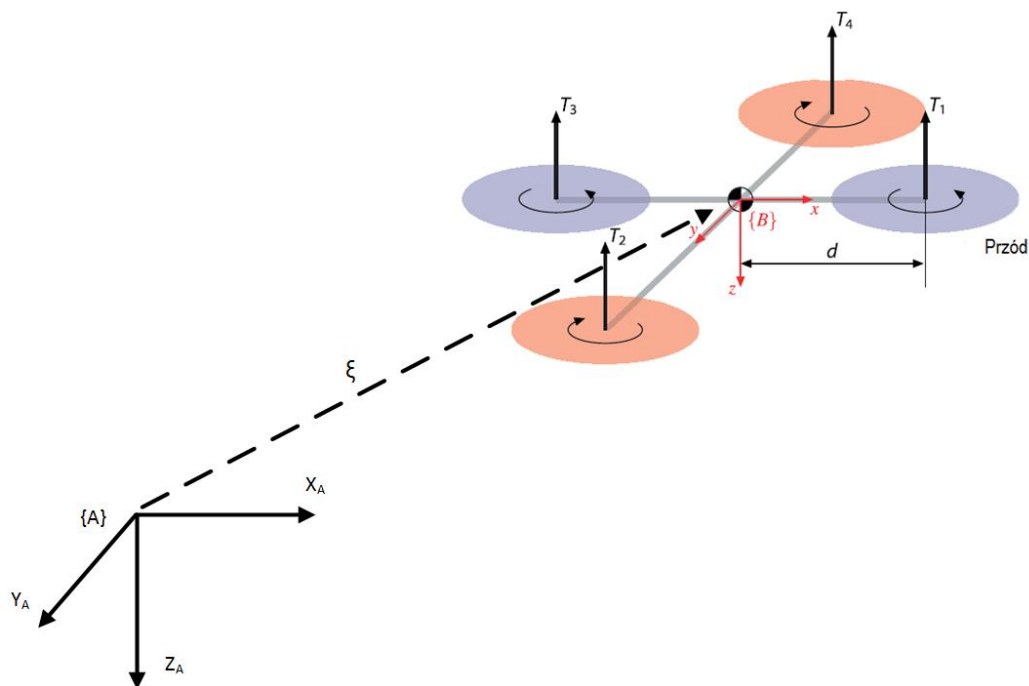
Białystok 2024

## 1. Cel zadania projektowego

Celem zadania jest zapoznanie studentów z systemami autonomicznymi na przykładzie śmigłowca wielowirnikowego, zapoznanie ich z autonomią lotu oraz przedstawienie niezbędnych funkcji i algorytmów związanych z planowaniem nakazanej linii drogi, generowaniem drogi i sposobami jej aktywnej korekcji.

## 2. Wprowadzenie

Śmigłowiec czterowirnikowy, często nazywany quadrotorem lub quadrokopterem, jest bezzałogowym aparatem latającym pionowego startu i lądowania (ang. VTOL, vertical take off and landing). Posiada on cztery śmigła generujące siłę nośną (ang. lift force) osadzone na czterech silnikach, które obracają się parami w przeciwnych kierunkach (dwa obracają się zgodnie z ruchem wskazówek zegara, pozostałe dwa przeciwnie). Ogólny schemat śmigłowca czterowirnikowego pokazany został na rys. 1. Sterowanie tego typu pionowzłotem jest możliwe poprzez zmianę prędkości obrotowej śmigieł. Ruch pionowy śmigłowca wzdłuż osi  $z$  jest realizowany poprzez zmianę prędkości obrotowej wszystkich czterech śmigieł. Ruch do przodu wzdłuż osi  $x$  realizowany jest poprzez zmianę prędkości wirników 1 oraz 3 oraz utrzymanie stałej prędkości wirników 2 oraz 4. Ruch względem osi  $y$  może zostać zrealizowany poprzez zmianę prędkości wirników 2 i 4 oraz utrzymanie takiej samej prędkości wirników 1 oraz 3.



Rys. 1. Schemat śmigłowca czterowirnikowego [1]

Na rys. 1 przedstawiony został schemat śmigłowca czterowirnikowego z zaznaczonymi ważniejszymi parametrami i elementami modelu. Literą  $\{B\}$  oznaczony został układ współrzędnych śmigłowca, który jest związany z poruszającym się quadrotorem, jego początek ustalony jest w środku masy samolotu. Oś  $z$  zgodnie ze stosowaną konwencją skierowana jest w dół. Prędkości obrotowe każdego z wirników zostały oznaczone jako  $\omega_i$ .

Siła ciągu generowana przez każdy element napędowy (układ silnik – piasta – śmigło) może zostać zapisany jako [1, 2]:

$$T_i = b\omega_i^2, \text{ gdzie } i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

gdzie  $b$  to współczynnik siły nośnej zależny od gęstości powietrza, skoku śmigieł, średnicy oraz liczby łopat. W układzie globalnym  $\{A\}$  (związanym z Ziemią, Rys. 1) stosując drugą zasadę dynamiki Newtona możemy zapisać następujące równanie dla ruchu translacyjnego śmigłowca [1, 2, 3]:

$$m\dot{v} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{pmatrix} - {}^A R_B \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\dot{\xi} = v, \quad (3)$$

Gdzie  $v$  jest to prędkość w układzie związanym z Ziemią,  $g$  to stała grawitacyjna,  $m$  jest masą śmigłowca, natomiast  $T$  jest sumarycznym ciągiem zdefiniowanym następująco [1, 2]:

$$T = \sum T_i. \quad (4)$$

Różnice w prędkości obrotowej śmigieł powodują powstawanie momentu co możemy zapisać dla obrotu wokół osi  $x$  [1, 2, 3]:

$$\tau_x = dT_4 - dT_2, \quad (5)$$

gdzie  $d$  jest długością ramienia śmigłowca (odległością pomiędzy środkiem masy a osią obrotu śmigła).

Uwzględniając zależność z równania (1) wartości momentów dla osi  $x$  i  $y$  możemy zapisać następująco [1]:

$$\begin{aligned} \tau_x &= db(\omega_4^2 - \omega_2^2) \\ \tau_y &= db(\omega_1^2 - \omega_3^2) \end{aligned} \quad (6)$$

Na każde śmigło działa siła oporu aerodynamicznego, która może być zdefiniowana jako [2]:

$$Q_i = k\omega_i^2 \quad (7)$$

gdzie  $k$  tak samo jak  $b$  zależy od czynników takich jak gęstości powietrza, skoku śmigieł, średnicy czy liczby łopat i jest współczynnikiem oporu aerodynamicznego.

Moment wokół osi z jest zdefiniowany jako [2]:

$$\tau_z = Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4 = k(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (8)$$

Ruch obrotowy śmigłowca może zostać opisany za pomocą następującego równania [1, 2]:

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\omega}} = -\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{J}\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\Gamma} \quad (9)$$

gdzie  $\mathbf{J}$  jest tensorem bezwładności o rozmiarze 3x3 oraz  $\boldsymbol{\Gamma}$  jest całkowitym momentem przyłożonym do śmigłowca zdefiniowanym jako [2]:

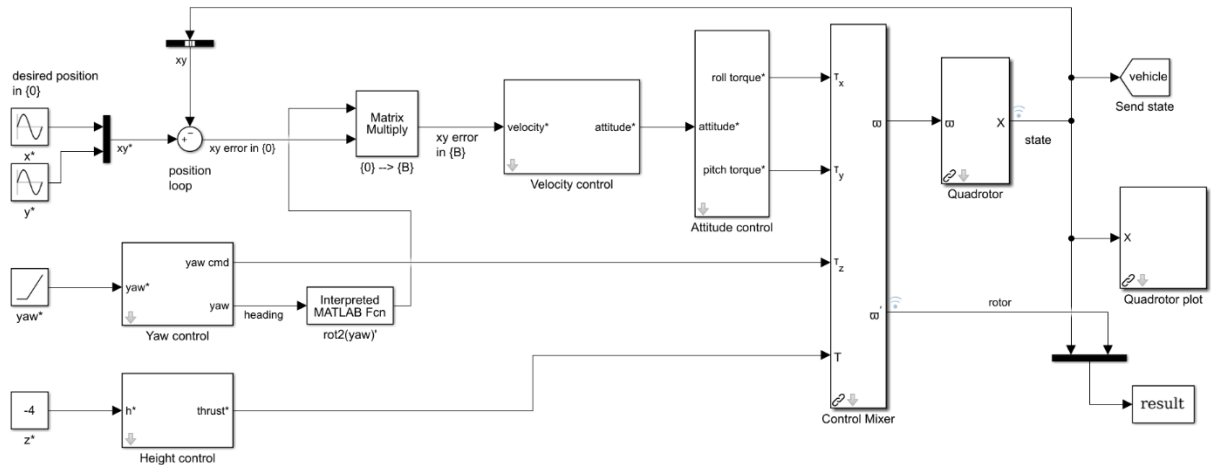
$$\boldsymbol{\Gamma} = \begin{pmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

Ruch śmigłowca opisują równania (2) oraz (9), w których siły i momenty działające na statek powietrzny są zdefiniowane następująco [1, 2]:

$$\begin{pmatrix} T \\ \boldsymbol{\Gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b & -b & -b & -b \\ 0 & -db & 0 & db \\ db & 0 & -db & 0 \\ k & -k & k & -k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

Siły i momenty zapisane w (10) są funkcjami prędkości obrotowych śmigieł.

Opisany powyżej model śmigłowca został zamodelowany w środowisku Matlab/Simulink co pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Model śmigłowca czterowirnikowego w programie Matlab/Simulink

Wektor stanu zaprezentowanego modelu wygląda następująco:

$$\mathbf{x} = (x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi})$$

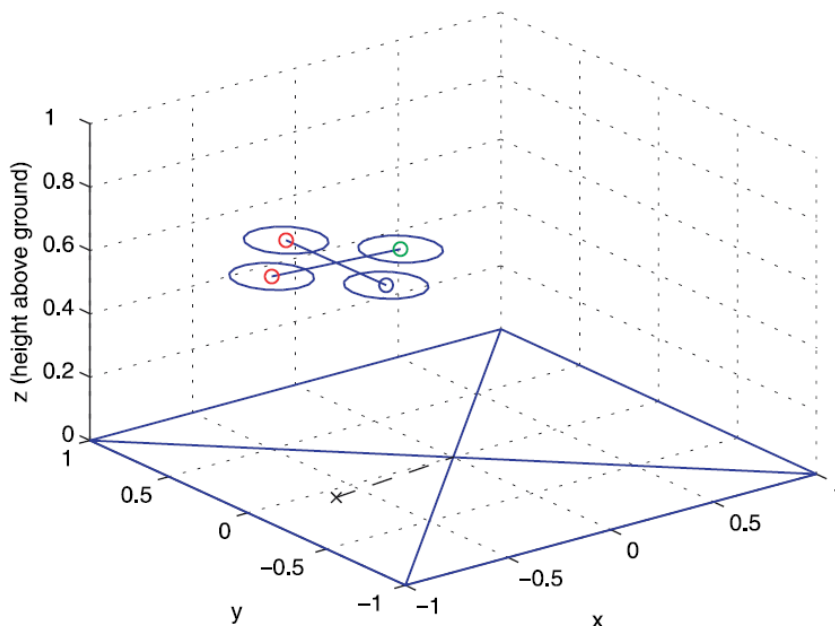
gdzie poszczególne parametry oznaczają kolejno:  $x$ ,  $y$ ,  $z$  - parametry określające położenie śmigłowca w przestrzeni trójwymiarowej,  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  oznaczają kolejno kąt przechylenia, pochylenia i odchylenia,  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\dot{z}$  to 3 prędkości liniowe oraz  $\dot{\phi}$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\dot{\psi}$  to 3 prędkości kątowe – przechylania, pochylenia oraz odchylenia.

Przedstawiony powyżej model śmigłowca (Rys. 2) jest dostępny w bibliotece Matlaba o nazwie Robotics and Machine Vision Toolbox.

Aby zainstalować wyżej wymienioną bibliotekę RMVT należy uruchomić plik `rvctools/startup_rvc.m`

Uruchomienie modelu śmigłowca następuje po wpisaniu w wiersz poleceń Matlaba polecenia `sl_quadrotor` natomiast parametry modelu możemy podglądać poleceniem `mdl_quadrotor`.

Uruchomienie modelu powoduje otwarcie okna z grafiką modelu śmigłowca jak na rys.3. Zakończenie symulacji powoduje zapisanie do przestrzeni roboczej Matlaba macierzy z danymi o nazwie *result* gdzie w pierwszej kolumnie podstruktury *result.signals.values* znajduje się czas symulacji, następnie kolejne 12 parametrów to wektor zmiennych stanu śmigłowca (kolumny od 1-12), następnie kolumny od 13 – 16 zawierają wartości prędkości obrotowych śmigieł (przed uruchomieniem śmigłowca należy zmienić format zapisu danych w bloku *to workspace* o nazwie *result* na *structure with time*.



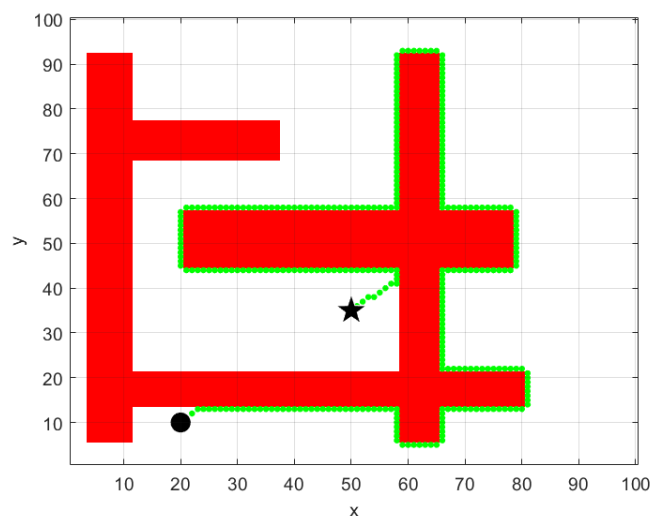
Rys. 3. Widok śmigłowca czterowirnikowego podczas symulacji

### 3. Ćwiczenia do wykonania

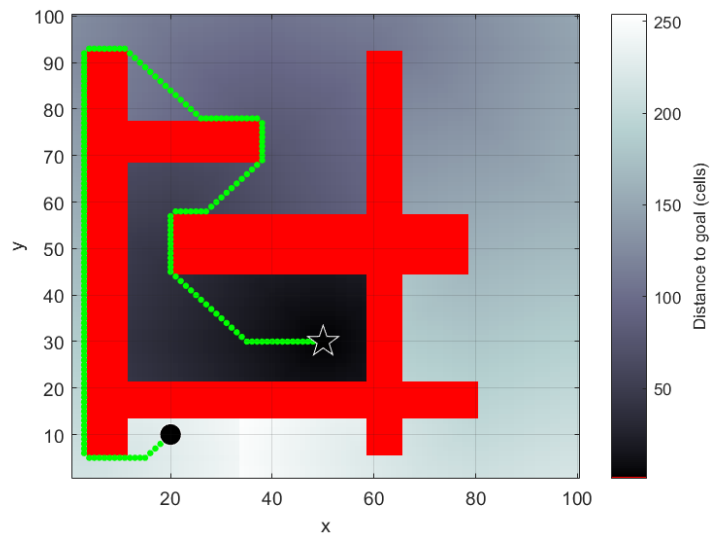
W oparciu o przedstawiony model śmigłowca wykonaj następujące zadania projektowe :

- Zapoznaj się z układem symulacyjnym śmigłowca czterowirnikowego dostępnym w bibliotece RMVT,

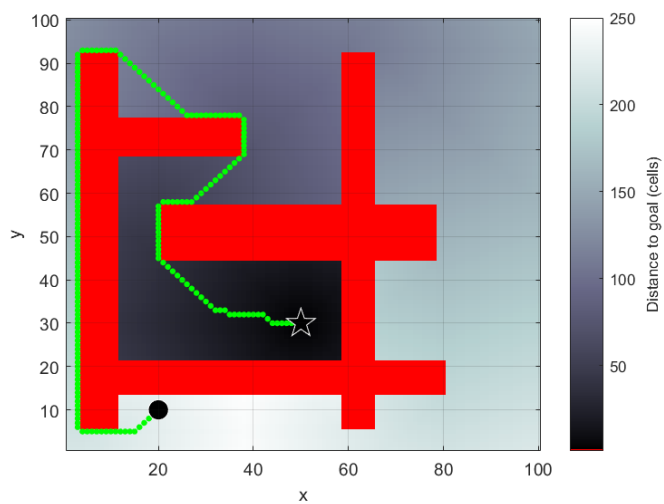
- Dodaj do układu symulacyjnego wyświetlanie parametrów lotu śmigłowca (porównaj wartości zadane parametrów nawigacyjnych z aktualnie mierzonymi),
- Zmodyfikuj model dynamiki śmigłowca zgodnie z parametrami zawartymi w tabeli 1 (indywidualnie przydzielone zestawy, opis parametrów w instrukcji do biblioteki na stronie 129),
- Sprawdź działanie układu sterowania dla zmodyfikowanych parametrów modelu (przedstaw to na przebiegach czasowych parametrów modelu obiektu), popraw nastawy pętli regulacyjnych i sposób stabilizacji śmigłowca,
- Poeksperymentuj z różnymi wzmocnieniami w układzie sterowania. Co się stanie, jeśli zmniejszysz tłumienie lub zupełnie je usuniesz?
- Usuń kompensator siły grawitacji i poeksperymentuj z dużą wartością wzmocnienia w układzie sterowania wysokością lub z innym typem regulatora,
- Opracuj funkcję realizującą ruch balistyczny śmigłowca. Niech quadrotor wystartuje pod kątem 45 stopni do poziomu następnie wyzeruj cały ciąg. Sprawdź uzyskaną trajektorię śmigłowca. Spróbuj opracować funkcję realizującą lot balistyczny do zadanego punktu na powierzchni,
- Opracuj funkcję realizującą automatyczne lądowania śmigłowca w oparciu o dostępne sygnały pomiarowe (lądowanie może być aktywowane w dowolnym momencie, ze wskazaniem miejsca lądowania, po aktywowaniu funkcji automatycznego lądowania śmigłowiec przerywa wcześniej realizowany scenariusz, podąża do punktu lądowania, przechodzi do zawisu po czym łagodnie ląduje),
- Zaimplementuj algorytmy planowania i śledzenia ścieżki robota latającego (Bug2, DX, D\*, PRM oraz algorytmu wykorzystującego dowolnie zdefiniowane pole potencjałowe). Mapa otoczenia dostarczana jest przez prowadzącego. Przykładowe wyniki działania algorytmów pokazano na rysunkach 4 – 7.



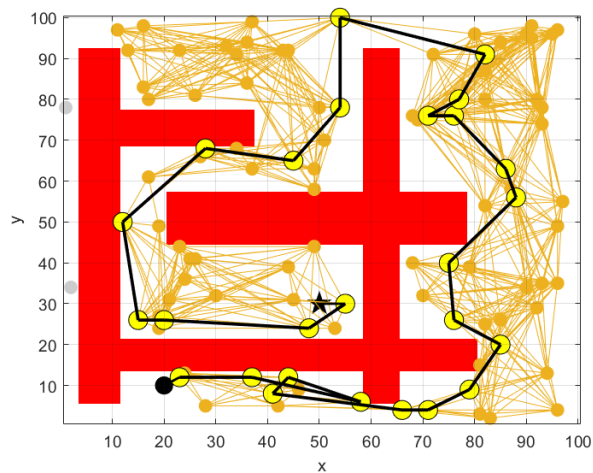
Rys. 4 Przykładowa ścieżka i działanie algorytmu Bug2



Rys. 5 Przykładowa i działanie algorytmu DX



Rys. 6 Przykładowa i działanie algorytmu D\*



Rys. 7 Przykładowa i działanie algorytmu PRM

- Opracuj algorytm realizujący lot śmigłowca czterowirnikowego po zadanych punktach drogi. Zadane punkty drogi powinny być definiowane przed rozpoczęciem lotu i przechowywane w macierzy. Dodatkowo powinny być zaznaczane na wizualizacji lotu śmigłowca. Zoptymalizuj nastawy regulatora śledzenia waypointów dowolną metodą.

Kolejne kroki realizacji poleceń (przydzielonych przez prowadzącego) należy zamieścić w sprawozdaniu (wersja papierowa). Ponadto otrzymane wyniki oraz całość trzeba opatrzyć odpowiednimi wnioskami, zwłaszcza należy pamiętać o tym, że:

- ważny jest opis (zrozumienie) działania danych operacji, funkcji, bloków,
- wymagany jest opis skryptów, funkcji i jej parametrów (działanie + wywołanie + symulacja rozwiązań),
- każdy rysunek (wykres, charakterystyka) musi zostać ponumerowany i podpisany, ponadto musi zostać opisany - scharakteryzowany (poddany analizie),
- w podsumowaniu należy dokładnie opisać realizację poszczególnych zadań, trudności przy realizacji, inne dodatkowe uwagi.

Ponadto projekt należy oddać w formie elektronicznej i dołączyć w zadaniu w zespole MS Teams opracowany m-plik/model Simulinka.

**Tab. 1 Parametry śmigłowca do zadań**

Zestaw	M	lxx	lyy	lzz	d
1	4,189	0,08329	0,08329	0,15029	0,3199
2	4,378	0,08518	0,08518	0,15158	0,3248
3	4,567	0,08707	0,08707	0,15287	0,3297
4	4,756	0,08896	0,08896	0,15416	0,3346
5	4,945	0,09085	0,09085	0,15545	0,3395
6	5,134	0,09274	0,09274	0,15674	0,3444
7	5,323	0,09463	0,09463	0,15803	0,3493
8	5,512	0,09652	0,09652	0,15932	0,3542
9	5,701	0,09841	0,09841	0,16061	0,3591
10	5,89	0,1003	0,1003	0,1619	0,364
11	6,079	0,08329	0,08329	0,16319	0,3689
12	6,268	0,08458	0,08458	0,16448	0,3738
13	6,457	0,08647	0,08647	0,16577	0,3787
14	6,646	0,08836	0,08836	0,16706	0,3836
15	6,835	0,09025	0,09025	0,16835	0,3885
16	4,082	0,09214	0,09214	0,16964	0,3934
17	4,271	0,09403	0,09403	0,17093	0,3983
18	4,46	0,09592	0,09592	0,17222	0,4032
19	4,649	0,09781	0,09781	0,17351	0,4081
20	4,838	0,0997	0,0997	0,1748	0,413
21	5,027	0,10159	0,10159	0,17609	0,4179
22	5,216	0,08355	0,08355	0,17738	0,4228
23	5,405	0,08484	0,08484	0,17867	0,4277
24	5,594	0,08673	0,08673	0,17996	0,4326
25	5,783	0,08862	0,08862	0,18125	0,4375



<b>26</b>	5,972	0,09051	0,09051	0,18254	0,4424
<b>27</b>	6,161	0,0924	0,0924	0,18383	0,4473
<b>28</b>	6,35	0,09429	0,09429	0,18512	0,4522
<b>29</b>	6,539	0,09618	0,09618	0,18641	0,4571
<b>30</b>	6,728	0,09807	0,09807	0,1877	0,462
<b>31</b>	6,917	0,09996	0,09996	0,18899	0,4669

#### 4. Literatura

1. R. Mahony, V. Kumar, P. Corke, Multirotor Aerial Vehicles, Modeling Estimation and Control of Quadrotor, IEEE Robotics&Automation magazine, 2012
2. T. Hamel, R. Mahony, R. Lozano, J. Ostrowski, Dynamic modeling and configuration stabilization for an X4-flyer, Proc. Int. Federation of Automatic Control Symposium, 202
3. S. Bouabdallah, P. Murrieri, R. Siegwart, Design and control of indoor micro quadrotor, Proc. IEEE Int. Conference Robotics and Automation, 2004