

## ROBOT TYPU QUADROCOPTER STEROWANY MIKROKONTROLERAMI O NIEWIELKIEJ MOCY OBLICZENIOWEJ

Stanisław SZCZESNY<sup>1</sup>, Anna GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK<sup>2</sup>, Leszek RAFIŃSKI<sup>3</sup>, Przemysław STRANC<sup>4</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58-347-29-45 e-mail: stanislaw.szczesny@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58-347-17-78 e-mail: anna.golijanek-jedrzejczyk@pg.gda.pl
3. Awis Sp. z o.o  
tel.: 58-322-95-42 e-mail: biuro@awis.pl
4. Intel Technology Poland  
tel.: +48-58-766-11-11 e-mail: przemyslaw.stranc@gmail.com

**Streszczenie:** Współczesna robotyka rozwija się bardzo dynamicznie. Coraz więcej osób prywatnych i inżynierów konstruuje różnego rodzaju pojazdy mobilne. Dlatego autorzy niniejszego referatu postawili sobie następującą tezę: możliwa jest budowa latającego robota mobilnego na bazie kontrolera o niskiej mocy obliczeniowej oraz prostego regulatora, i podjęli się jej udowodnienia.

**Słowa kluczowe:** robot mobilny, sterowanie, regulator.

### 1. WPROWADZENIE

Roboty mobilne typu quadcopter zwane również quadrotorami lub quadcopterami są rozwijane od wielu lat, jednak największy rozwój przyniosło ostatnie dziesięciolecie. W tym czasie zmieniono kluczowe podejście do konstrukcji quadcopterów. Uległy one miniaturyzacji a zastosowanie zmieniło się z typowo transportowego na zwiadowcze, czyli na pojazd bezzałogowy bliskiego zasięgu [1][2].

Współcześnie, roboty nie są budowane już tylko przez wielkie i znane koncerny. Coraz częściej swoich konstruktorskich możliwości, do celów prywatnych, próbują również technicy i inżynierowie [3].

Dlatego autorzy, w niniejszym referacie, postawili sobie za cel udzielenie odpowiedzi na następujące pytanie: czy jest możliwa budowa latającego robota mobilnego na bazie łatwo dostępnego i o niskiej mocy obliczeniowej kontrolera oraz prostego regulatora? Potwierdzenie tej tezy wymagało skonstruowania prototypu robota latającego.

Pierwszym etapem projektu była budowa części mechanicznej quadcoptera, a kolejnym wybór i oprogramowanie sterownika robota wraz z czujnikami.

### 2. CZĘŚĆ MECHANICZNA

Zbudowany robot składa się z ramy nośnej, czterech silników wyposażonych w śmigła oraz elementów odpowiedzialnych za sterowanie pracą silników i regulację położenia robota. Układ na podstawie pomiarów z akcelerometru i żyroskopu oraz sygnałów odebranych z bezprzewodowego kontrolera powinien utrzymywać się

w powietrzu w zadanej pozycji oraz kompensować zakłócenia pochodzące od sił zewnętrznych. Układ wykonawczy oraz sterownik zasilono z baterii litowo-polimerowej.

#### 2.1. Rama nośna

W referacie przedstawiono prototyp robota latającego o gabarytach 51 cm x 51 cm x 20 cm i masie 950 g. Zastosowano w nim ramę nośną wykonaną z aluminium. W celu zwiększenia jej wytrzymałości wykorzystano płyty z włókna węglowego, które zamontowano jedna na drugiej z użyciem dystansów o wysokości 20 mm. W dolnej części ramy znalazło się miejsce na obwód drukowany, w górnej zamontowano baterie. Na rysunku 1 przedstawiono zdjęcie wykonanego robota.



Rys. 1. Zdjęcie zbudowanego robota

#### 2.2. Silniki

Do uniesienia platformy w powietrze konieczne jest wygenerowanie odpowiedniej siły ciągu, która musi rozkładać się na cztery silniki. Założono, że masa robocza robota nie przekroczy 1 kg. Wówczas, siła ciężkości wynosi 9,81 N. Siła nośna pojedynczego zespołu silnik – śmigło wynosi 6,4 N wyznaczona zgodnie z [4]. Daje to zapas ponad 15 N, co pozwala na swobodne unoszenie i manewrowanie robotem.

Najlepszym stosunkiem mocy do masy, z motorów dostępnych na rynku, wykazują się silniki bezszczotkowe prądu stałego. W zbudowanym prototypie pojazdu zastosowano silniki firmy Turnigy, model D2822/17,

których maksymalna prędkość obrotowa wynosi 13200 obr/min. Waga każdego z nich to 38 g. Urządzenia mają kształt walca o średnicy 28 mm oraz długości 22 mm. Maksymalna moc pojedynczego silnika jest równa 102 W.

W prezentowanym robocie mobilnym wykorzystano śmigła dwułopatowe o długości 203 mm i skoku wynoszącym 114 mm.

### 3. STEROWNIK ROBOTA

Zdecydowano, że rolę jednostki obliczeniowej będą pełniły dwa 8-bitowe mikrokontrolery firmy Atmel, z rodziny AVR. Wybór ten podyktowany był powszechną dostępnością, łatwością programowania i uruchomienia. Mikrokontrolery te nie odznaczają się wysoką mocą obliczeniową, wobec czego spełniają założenia postawione przez autorów tego referatu, odnośnie ich weryfikacji w sterowaniu lotem robota latającego.

Głównym mikrokontrolerem pełniącym funkcje krytyczne czasowo jest ATmega644p. Do jego zadań należy: odbiór sygnałów z czujników, wyznaczenie sygnału sterującego regulatora, odpowiednie wysterowanie regulatorów silników i wyznaczanie pozycji robota. Mikrokontroler ten odpowiedzialny jest także za komunikację z mikrokontrolerem ATmega48V i z komputerem.

Natomiast rolę mikrokontrolera pomocniczego pełni układ ATmega48V. Jego głównymi zadaniami są: odbiór sygnałów z radiokontrolera, kontrola poziomu rozładowania baterii i obsługa wyświetlacza LCD.

#### 3.1. Zasilanie

Do zasilania robota wybrano akumulator litowo - polimerowy firmy ZIPPY o pojemności 2200 mAh. Z wybranego pakietu można pobierać prąd ciągły rzędu 55 A oraz prąd chwilowy o natężeniu 77 A. Jego wymiary to 104 mm × 36 mm × 25 mm przy wadze równej 173 g.

Do zasilania każdego silnika wymagany jest oddzielny regulator ESC (ang. Electronic Speed Controller), więc w projekcie wykorzystano cztery. Każdy z nich waży 19 g, a jego wymiary wynoszą 45 mm × 25 mm × 4 mm. Z pojedynczego regulatora można pobierać prąd ciągły o natężeniu 18 A oraz prąd chwilowy równy 20 A.

#### 3.2. Zdalne sterowanie

Zdalne sterowanie robotem zapewniono przy pomocy modułu radiowego firmy Turnigy. Transmisja odbywa się drogą radiową z częstotliwością 2,4 GHz i przebiega bez zakłóceń w promieniu 300 m. Odbiornik modułu radiowego zasilono stabilizowanym napięciem 5 V doprowadzonym ze sterownika robota. Do sterowania pracą robota wykorzystano 2 wolanty, z których każdy może poruszać się w dwóch osiach. Wolant lewy odpowiada za ustalanie kąta robota. Ruch gałki w górę lub w dół powoduje odpowiednie przechylenie robota w przód lub w tył, natomiast odchylenie wolantu w prawo lub lewo spowoduje odpowiednie przechylenie robota w danym kierunku. Zmiana położenia prawego wolantu w kierunku pionowym spowoduje zwiększenie lub zmniejszenie prędkości obrotowej silników, przez co ciąg generowany przez śmigła ulegnie zmianie i robot zacznie się wznosić lub opadać.

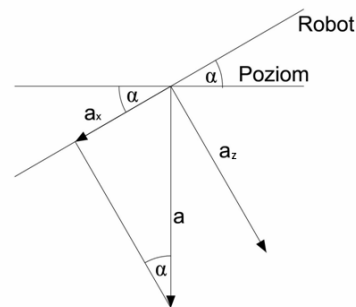
#### 3.3. Czujniki

W celu uzyskania informacji o aktualnym położeniu robota zastosowano dwa rodzaje czujników: żyroskop oraz akcelerometr. Wykorzystano zestaw IMU 5DOF, który

zbudowany jest na bazie trójosiowego akcelerometru ADXL335 oraz dwuosiowego żyroskopu IDG500. Wymaga on zasilania napięciem stabilizowanym 3,3 V. Wyjścia pomiarowe akcelerometru jak i żyroskopu są analogowe. Zakres pomiarowy czujnika przyspieszenia wynosi  $\pm 3$  g natomiast czujnika prędkości obrotowej  $\pm 500$  °/s. Wyjścia pomiarowe czujników podłączono poprzez sprzętowy filtr dolnoprzepustowy do wejść analogowych mikrokontrolera ATmega644p.

Dodatkowo robota wyposażono w zestaw czujników cyfrowych - układ MPU 6050 w celu porównania ich działania z czujnikami analogowymi oraz redundancji urządzeń pomiarowych. Układ ten zbudowany jest na bazie trójosiowego akcelerometru oraz trójosiowego żyroskopu zawartego w jednym układzie. MPU 6050 posiada 16-bitowy przetwornik A/C, o programowalnej częstotliwości próbkowania w przedziale 4 – 1000 Hz. Zakres pomiaru akcelerometru robota wynosi  $\pm 2$  g, natomiast żyroskopu  $\pm 250$  °/s.

Sterowanie quadcopterem wymaga znajomości aktualnego położenia robota, czyli kątów nachylenia w odniesieniu do poziomu w osi X oraz Y. Na rysunku 2 zamieszczono rozkład wektora przyspieszenia ziemskiego  $a$  w układzie odniesienia zgodnym z osiami robota.



Rys. 2. Rozkład wektora przyspieszenia ziemskiego

Gdy robot unosi się w powietrzu działające na niego siły równoważą się i czujnik mierzy tylko przyspieszenie ziemskie, a dokładniej akcelerometr mierzy składową przyspieszenia ziemskiego działającą zgodnie z jego osią pomiaru. Znając wartość przyspieszenia ziemskiego oraz wartość zmierzoną przez akcelerometr w danej osi ( $a_x$  w osi X,  $a_y$  w osi Y czy  $a_z$  w osi Z) i korzystając z poniższego wzoru możliwe jest wyznaczenia kąta nachylenia robota  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctan \frac{a_x}{a_z} \quad (1)$$

Po wyznaczeniu kąta  $\alpha$  na podstawie pomiarów z akcelerometru dokonywana jest jego korekta na podstawie pomiaru żyroskopowego. Czujnik ten mierzy prędkość obrotową. W celu uzyskania wartości kąta należy wykonać operację całkowania na zmierzonym sygnale. Numerycznie należałoby to wykonać zgodnie z poniższą zależnością:

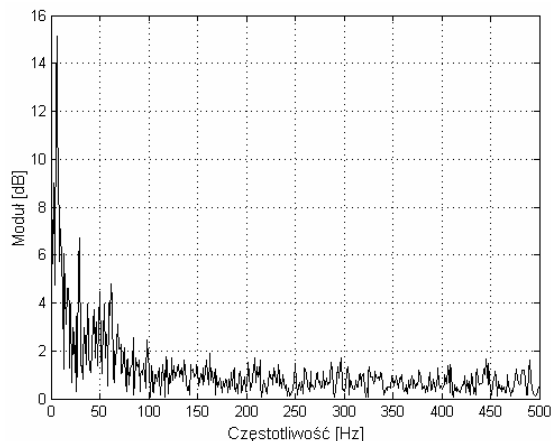
$$\alpha[k] = \alpha[k-1] + T\omega[k] \quad (2)$$

gdzie:  $\alpha[k]$  – kąt wyznaczony w chwili k,  
 $\alpha[k-1]$  – kąt wyznaczony w chwili k-1,  
 $\omega[k]$  – prędkość kątowa wyznaczona w chwili k,  
 $T$  – okres próbkowania.

Ostatecznie kąt nachylenia robota  $\alpha$  obliczany jest, jako średnia ważona kąta wyznaczonego na podstawie pomiaru z żyroskopu i akcelerometru. Eksperymentalnie ustalono wartości tych wag, jako 0,8 dla pomiaru z czujnika prędkości obrotowej i 0,2 dla czujnika przyspieszenia.

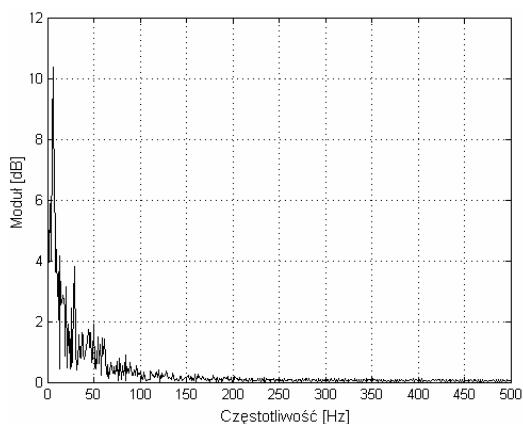
Analogowe sygnały pomiarowe oprócz istotnych informacji zawierają znaczną liczbę szumów.

W omawianym obiekcie występuje wiele źródeł zakłóceń [4]. Podczas wykonywania testów prototypu zauważono, iż głównym źródłem tych błędów są bicia w silnikach oraz śmigłach spowodowane nieprawidłowym wyważeniem tych elementów. Wymagana prędkość obrotowa silników umożliwiająca wzniesienie się quadcoptera w powietrze wynosi około 3 000 obr./min. Taka wartość prędkości obrotowej powoduje, że nawet niewielkie niewyważenie zespołu silnik – śmigło wprowadza znaczne drgania w widmach sygnałów pomiarowych. Na rysunku 3 zamieszczono charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową sygnału pomiarowego kąta nachylenia robota do poziomu w osi X zmierzonego w czasie 5 s z częstotliwością 500 Hz.



Rys. 3. Widmo sygnału bez filtracji

Powyższy rysunek widma sygnału potwierdza występowanie licznych, niepożądanych częstotliwości w mierzonym sygnale. Z tego względu w quadcopterze zaimplementowano filtr dolnoprzepustowy drugiego rzędu, w którym zamiast wyznaczania pochodnej kąta numerycznie wykorzystano pomiar z żyroskopu. Widmo sygnału po filtracji zaprezentowano na rysunku 4.



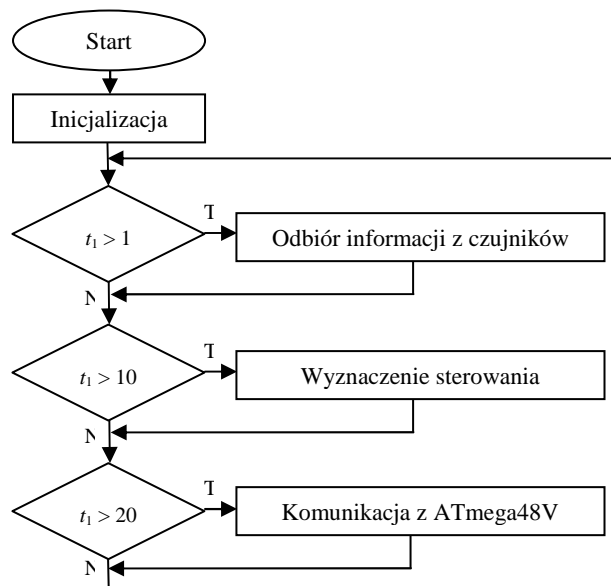
Rys. 4. Widmo sygnału po filtracji

Porównując charakterystyki przedstawione na rysunkach 3 i 4 widać, że w przypadku filtra drugiego rzędu

tłumione są już składowe o częstotliwości powyżej 50 Hz, natomiast udział składowych o częstotliwości powyżej 200 Hz jest pomijalnie mały. Niekorzystnym efektem jest tłumienie składowych o niskich częstotliwościach, jednak przeprowadzone testy eksperymentalne prototypu pojazdu potwierdziły, że układ regulacji działa prawidłowo. Dzięki wykorzystaniu pomiaru z żyroskopu zmniejszono opóźnienia generowane przez filtr dolnoprzepustowy o około 60%.

### 3.4. Algorytm działania robota

Do obsługi robota zaimplementowano zaprojektowaną przez autorów aplikację, której algorytm działania został zaprezentowany na rysunku 5.

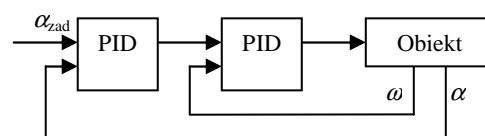


Rys. 5. Algorytm działania robota

Po uruchomieniu programu inicjalizowane są peryferia mikrokontrolera, a następnie program w pętli nieskończonej: odbiera sygnały z czujników, wyznacza sterowanie regulatorów silników i komunikuje się z mikrokontrolerem pomocniczym. Każdej funkcji robota została przyporządkowana częstotliwość, z jaką powinna się ona wykonywać. Na przykład odbiór informacji wykonywany jest z częstotliwością 1 kHz, więc dopiero po upływie czasu  $t_1$  równego 1 ms od poprzedniego pomiaru wykonywany jest następny. Taka struktura programu zapewniła pełną kontrolę wykonywania poszczególnych funkcji oraz zminimalizowała liczbę wymaganych operacji.

### 3.5. Regulator

Quadcopter do kontrolowanego lotu potrzebuje układu regulacji [6][7][8][9][10]. Urządzenie posiada dwie względnie niezależne osie, więc zastosowano dwa autonomiczne regulatory (rys. 6).



Rys. 6. Schemat ideowy układu sterowania

Wejście regulatora stanowi uchyb między wartością zadaną kąta pochodzącą z pilota, a zmierzonym kątem.

W celu kontroli prędkości kątowej obiektu w osi X oraz Y zastosowano oddzielnie, dla każdej osi, regulator kaskadowy złożony z dwóch regulatorów PID.

Ze względu na brak modelu obiektu wartości nastaw członu proporcjonalnego, całkowitego i różniczkującego obu regulatorów PID wyznaczono empirycznie. Na rysunku 7 zamieszczono uzyskane wyniki testów robota podczas lotu.



Rys. 7. Odpowiedź obiektu przy zastosowaniu regulatora kaskadowego

Na podstawie pomiarów można stwierdzić, iż czas narastania sygnału mieści się w 10 próbkach. Pomiaru zbierano w odstępie czasu wynoszącym 50 ms, więc czas narastania sygnału wynosi 0,5 s. Zmierzony uchyb w stanie ustalonym nie przekracza  $1^\circ$ . Układ regulacji charakteryzuje się znacznym przeregulowaniem, jednak jest to efekt pożądaný, zwłaszcza podczas zmiany kierunku lotu robota.

Dzięki osiągnięciu akceptowalnych wyników pomiarów, możliwe było przeprowadzenie stabilnych lotów bez asekuracji.

#### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

W referacie przedstawiono prototyp robota latającego, celowo wyposażonego w 8-bitowy mikrokontroler oraz prosty regulator, aby sprawdzić możliwość płynnej regulacji i sterowania jego lotem. Wykorzystanie dwóch mikrokontrolerów pozwoliło na zapewnienie wystarczającej mocy obliczeniowej i poprawne wykonywanie się programu sterującego pracą robota.

Przeprowadzone wyniki doświadczalne zaprojektowanego robota takie jak: 15-to minutowy czas lotu, uchyb w stanie ustalonym nieprzekraczający  $1^\circ$  oraz swobodna kontrola i płynne manewrowanie obiektem latającym, dowiodły tezy, iż jest możliwa realizacja sterowania lotem quadcoptera z zastosowaniem

mikrokontrolera o niskiej mocy obliczeniowej i prostego regulatora kaskadowego.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- Altug E., Ostrowski J. P., Taylor C. J.: Quadrotor control using dual camera visual feedback, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings. ICRA '03, 2003, vol. 3, s. 4294–4299.
- Lupashin S., Schollig A., Sherback M., D'Andrea R.: A simple learning strategy for high-speed quadcopter multi-flips, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010, s. 1642–1648.
- Stranc P., Szczesny S.: Modification and development of the mobile platform type Quadcopter: flight without security', Gdańsk University of Technology, 2013.
- T. Liecau, M. Warkocz, K. Wąsik, i M. Grochowski.: Modelowanie, sterowanie i wizualizacja quadcoptera, Pomiary Automatyka Robotyka, t. R. 16, nr 2, 2012, s. 234–240.
- Golijanek-Jędrzejczyk A., Rafiński L, Szczesny S.: Using Alpha-beta filtration for robustness improvement of a quadcopter positioning system, Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, vol. 84., 2015, s.55-61.
- Bouabdallah S., Siegwart R.: Full control of a quadrotor, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2007, s. 153–158.
- Tomasik P., Okarma M., Marchewka D.: QUADROTOR - od pomysłu do realizacji, Pomiary Automatyka Robotyka., vol. 15, nr 9, s. 88–92, 2011.
- Engel J., Sturm J., Cremers D.: Camera-based navigation of a low-cost quadcopter, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012, s. 2815–2821.
- Huang H., Hoffmann G. M., Waslander S. L., Tomlin C. J.: Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive maneuvering, IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '09, 2009, s. 3277–3282.
- Bonisławski A., Juchniewicz M., Piotrowski R.: Projekt techniczny i budowa platformy latającej typu quadcopter, Pomiary Automatyka Robotyka, vol.18, nr 1, 2014, s. 91–97.

## THE ROBOT TYPE OF QUADROPTER CONTROLLED BY LOW COMPUTING POWER MICROCONTROLLERS

A quadcopter is an unmanned aerial vehicle (UAV) platform. The development of the quadcopter is caused by their use not only by the military or rescue services, but also by civilians for the most unusual tasks such as cleaning bot, pesticide sprayer for vast fields of crops or respraying paint on lines on the roads. Therefore, the authors of the paper undertook to build a flying mobile robot based on low computing power controller and simple speed regulator.

The paper presents a prototype of a flying robot, purposely equipped with a weak 8-bit microcontroller and a simple regulator, in order to check the possibility of proper regulation and flight control. The constructed robot consists of: a support frame, four engines fitted with propellers and motor controllers. The measurement system is based on an accelerometer and a gyroscope. The final version of the robot is controlled by two 8-bit microcontrollers.

The constructed robot test results, such as: 15-minute flight time, the steady-state error of less than  $1^\circ$  and casual smooth maneuvering and flight control, proved that it is possible to realize a quadcopter flight control system using low computational power microcontrollers and a simple cascade controller.

**Keywords:** mobile platform, quadcopter, control systems.