

MODEL MATEMATYCZNY I ANALIZA STANÓW PRACY SERWONAPĘDÓW WYKORZYSTYWANYCH W BEZZAŁOGOWYCH STATKACH POWIETRZNYCH

W artykule omówiono funkcjonowanie i zasadę działania serwonapędów wykorzystywanych w bezzałogowych statkach powietrznych. W pierwszej części przedawiono ich zastosowanie oraz krótko omówiono zasadę działania. W drugiej części zaprezentowano model matematyczny opisujący procesy fizyczne zachodzące w czasie ich pracy. W pracy zawarto również omówienie sygnałów sterujących stanami pracy układów serwonapędów. W dalszej części przedawiono własną koncepcję układu sterującego funkcjami układu napędowego BSP wraz z rzeczywistymi badaniami, które miały na celu ocenić efektywność i wydajności opracowanego układu elektronicznego przeznaczonego jako podzespoł stanowiska laboratoryjnego. W dalszej kolejności zamieszczono podsumowanie oraz wnioski wynikające z przeprowadzonych testów.

WSTĘP

Wraz z rozwojem technologicznym na całym świecie, jak również w Polsce, można zaobserwować znaczny wzrost popularności oraz czynny udział Bezzałogowych Statków Powietrznych w codziennym życiu człowieka. Producenci elementów konstrukcyjnych prześcigają się w tworzeniu innowacyjnych projektów, aby sprostać coraz to większym wymaganiom konsumenta.

Rynek Bezzałogowych Statków Powietrznych jest niesamowicie zróżnicowany, dlatego aby ułatwić przyszłemu pilotowi -operatorowi wybór sprzętu, wprowadzono trzy klasy Bezzałogowych Statków Powietrznych. Pierwszą klasę stanowią Bezzałogowe Statki Powietrzne o masie poniżej 150kg i długości lotu do 6 godzin. Druga klasa to Bezzałogowe Statki Powietrzne o masie większej niż 150kg ale mniejszej od 600kg i długości lotu do 24 godzin. Ostatnią czyli trzecią klasę stanowią bezzałogowe statki powietrzne o masie większej niż 600kg i długości lotu powyżej 24 godzin.

Ze względu na sposób konstrukcji Bezzałogowe Statki Powietrzne można podzielić na płatowce, śmigłowce, wielowirnikowce zwane również kopterami, aerostat i balony, a także statki naśladujące ruchy ptaków lub owadów.

Aby móc sterować Bezzałogowym Statkiem Powietrzny skonstruowano mechanizm oddziaływający w głównej mierze na powierzchni sterowe – jest to mechanizm nazywany serwonapędem. Serwonapędy używane w małych BSP to najczęściej serwomechanizmy modelarskie typu analogowego lub cyfrowego o niewielkich wymiarach i masie, ze względu na ograniczenia dotyczące przepisów, w których zostały ustalone normy o maksymalnej dopuszczalnej masie BSP. W przypadku silników spalinowych można zastosować serwonapędy do zmiany położenia przepustnicy, w celu regulacji prędkości BSP. Dodatkowo mogą być wykorzystane przy lądowaniu do otwierania zasobnika ze spadochronem lub poduszką powietrzną, a także do otwierania i zamykania luku podwozia i wysuwania podwozia, jeżeli BSP jest w nie wyposażony. Serwomechanizmy znajdują zastosowanie również w wielowirnikowcach. stosuje się je głównie w gimbalu z kamerą. Dodatkową opcją jest możliwość wykorzystania serwomechanizmów do składania nóg podwozia. Ponadto serwomechanizmy odpowiedzialne są za zmianę kąta natarcia łopat wirnika, a także skoku śmigła ogonowego. Niemniej jednak serwonapędy mogą

być zastosowane dowolnie do innych celów niż te wymienione, ograniczeniem jest tylko ludzka wyobraźnia [1], [2].

Celem pracy jest przedstawienie zasad sterowania serwonapędami, ich zastosowania oraz określenie ich własności użytkowych w celu bezpiecznego użytkowania Bezzałogowych Statków Powietrznych. Do realizacji założonego celu określono następujące zadania badawcze:

- Scharakteryzować główne zasady projektowania układów sterowania,
- Opisać możliwe metody sterowania serwonapędami oraz sygnały wykorzystywane do sterowania małymi Bezzałogowymi Statkami Powietrzny mieszczącymi się w klasie I w standardach modelarskich,
- Zaprojektować i wykonać prosty układ sterowania serwonapędem w oparciu o zasady sterowania różnymi klasami serwonapędów,
- Przeprowadzić badania parametrów użytkowych wykonanego układu sterowania serwomechanizmem modelarskim oraz dokonać ich analizy.

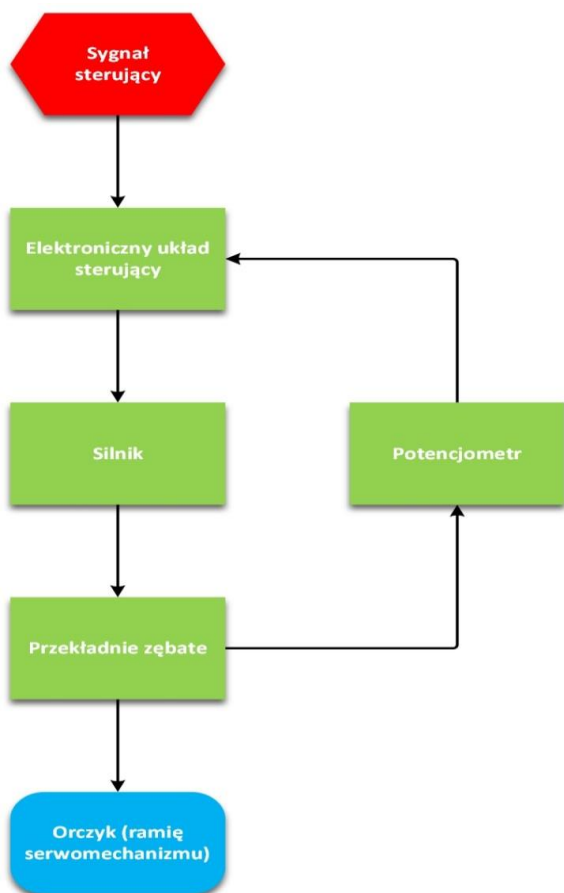
1. SERWONAPĘDY - PRZEZNACZENIE

Serwonapędy są złożonymi układami napędowymi, w których regulacja położenia odbywa się przy użyciu dedykowanych regulatorów z wykorzystaniem pętli sprzężenia zwrotnego. W pętli tej stosuje się resolwery, tachometry, enkodery i potencjometry umożliwiające precyzyjną zmianę kąta obrotu wału. Cechą, która charakteryzuje serwonapędy jest ich wysoka sprawność nawet przy dużych obciążeniach. Dzięki użytym w nich silnikom z magnesami trwałymi, które charakteryzują się bardzo szybką reakcją na polecenia ze sterownika, posiadają bardzo dobre właściwości dynamiczne, duże przyspieszenia kątowe wirnika i dużą dokładność pozycjonowania.[5] Głównymi parametrami określającymi parametry pracy serwonapędu jest jego prędkość i moment obrotowy. Prędkość jest parametrem mówiącym o tym w jakim czasie orczyk pokona kąt 60°. Podaje się ją w sekundach lub najczęściej w ułamkach sekund i jest ona mierzona z nieobciążonym serwomechanizmem, tzn. że podczas pomiaru na orczyk wykonujący pracę nie działa żadna siła. W przypadku serwonapędu, na którego orczyk działa zewnętrzna siła stawiająca opór czas ten ulega zmianie w zależności od wektora działającej siły.

Moment obrotowy pomaga w określeniu do jakich celów może być wykorzystany dany serwonapęd. Podaje się go w kg/cm. Oznacza to jaki ciężar jest w stanie utrzymać serwonapęd na orczyku o długości jednego centymetra. Przykładowo jeśli serwonapęd posiada moment obrotowy 2kg/cm to znaczy, że orczyk o długości 1cm podniesie/utrzyma czy pokona stawiany opór o ciężarze 2kg. Wszystkie te parametry są głównie zależne od rodzaju i rozmiaru serwonapędu oraz użytych w nim podzespołów [7].

1.1. Zasada działania

Przebieg pracy serwomechanizmu jest procesem złożonym, wymagającym dostarczania stałego sygnału w celu utrzymania właściwej pozycji wyjściowej elementu wykonawczego. Układ elektroniczny odbiera z odbiornika zadany przez operatora sygnał za pośrednictwem trójżyłowego kabla sygnałowego. Poprzez analizę odebranego sygnału dokonuje porównania obecnego położenia orczyka w danym momencie, a zadanego położenia odebranego z sygnału. Po dokonaniu analizy i porównaniu wartości zadanej z obecną włącza silnik i poprzez większe bądź mniejsze wypełnienie impulsu sterującego wprowadza go w ruch o obrotach prawych lub lewych, zależnie od tego w którą stronę ma się przesunąć orczyk serwomechanizmu. Obracający się wał silnika wprawia w ruch przekładnie zębate, które obracają orczyk o zadany kąt, otrzymany z sygnału wejściowego. Do przekładni zębatej podłączony jest potencjometr, który podczas obrotu przekładni zębatej zmienia swoje położenie zmieniając jednocześnie rezystancję, którą odbiera elektroniczny układ sterujący i analizuje z wejściową wartością zadaną z sygnału. Po osiągnięciu pożądanego efektu, elektroniczny układ sterujący wyłącza silnik zatrzymując orczyk [3], [4], [5].



Rys. 1. Schemat zasady działania serwomechanizmu

2. SYGNAŁ STERUJĄCY SERWONAPĘDAMI

Sygnałem sterującym serwonapędami w małych bezzałogowych statkach powietrznych jest sygnał PWM (Pulse Width Modulation – modulacja szerokości impulsu). W sygnale PWM istnieje możliwość modulacji szerokości impulsu, dzięki czemu sygnał ten wykorzystywany jest do sterowania wartością prądu stałego i napięcia. Zasada działania polega na zmianie szerokości impulsu (wypełnienia), natomiast jego amplituda i częstotliwość pozostają stałe. Wypełnienie impulsu mówi, przez jaki czas impuls jest w stanie wysokim, czyli przez jaki czas podaje napięcie. W celu wyznaczenia współczynnika wypełnienia korzysta się ze wzoru:

$$k_w = \frac{T_{100\%}}{T} \quad (1)$$

k_w – współczynnik wypełnienia
 $T_{100\%}$ – czas trwania stanu wysokiego
 T – czas trwania jednego impulsu

W celu zamiany wartości wypełnienia na wypełnienie procentowe powyższy wzór należy pomnożyć przez 100%:

$$k_w = \frac{T_{100\%}}{T} * 100\% \quad (2)$$

Za szybkość działania odpowiedzialna jest częstotliwość, która mówi o tym ile razy w przeciągu jednej sekundy podawany jest impuls, np. dla częstotliwości 100Hz impuls powtórzy się 100 razy w przeciągu jednej sekundy.

Przy pomocy dwóch powyższych parametrów wyznacza się czas impulsu. Jest to parametr oznaczający czas trwania jednego impulsu.

Wzór do wyznaczenia w sekundach:

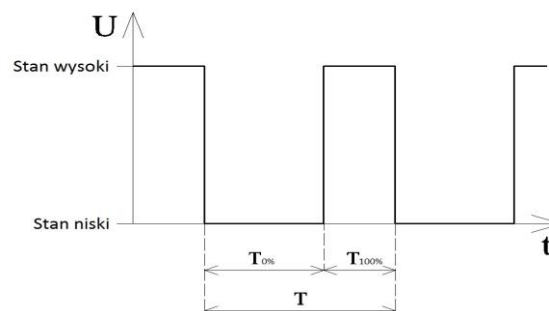
$$T[s] = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Wzór do wyznaczenia w mili sekundach:

$$T[ms] = \frac{1}{f} * 1000 \quad (4)$$

T – czas trwania jednego impulsu
 f – częstotliwość

Amplituda sygnału posiada tylko dwa stany wysoki i niski jest to zasilanie serwonapędu. Wysoki to 100% mocy a niski to 0%. Od szerokości impulsu, czyli czasu wypełnienia zależy, ile czasu dany stan będzie trwał. Częstotliwość określa ile razy w przeciągu jednej sekundy zostanie powtórzony impuls o danym wypełnieniu [6].



Rys. 2. Wykres przebiegu sygnału PWM: $T_0\%$ - wypełnienie impulsu stanu niskiego, $T_{100\%}$ - wypełnienie impulsu stanu wysokiego, T - czas trwania pojedynczego impulsu

Wykres przedstawia przykładowy przebieg sygnału PWM, gdzie T oznacza czas trwania jednego impulsu, $T_{0\%}$ to czas trwania impulsu o stanie niskim, a $T_{100\%}$ to czas trwania impulsu o stanie wysokim. Każdy taki impuls powtarza się x razy w przeciągu jednej sekundy, zależnie od wartości częstotliwości. Modulując sygnał zmienia się długość wypełnienia, czyli czas trwania $T_{0\%}$ i $T_{100\%}$. Nie zmienia się natomiast długość trwania impulsu T , który jest stały i zależy od częstotliwości. W zależności od tego ile będzie trwała zmiana stanu z niskiego na wysoki współczynnika wypełnienia, o tyle proporcjonalnie wychyli się orczyk serwonapędu, np. dla wypełnienia równego 50% czasu stanu wysokiego orczyk wychyli się o połowę, jeżeli serwonapęd działa w przedziale od 0° do 180° to wychyli się o kąt 90° [7].

2.1. Sygnał sterujący w standardzie modelarskim

W standardach modelarskich przyjęto, że częstotliwość dla serwomechanizmów analogowych wynosi 50Hz. Oznacza to, że impuls jest powtarzany pięćdziesiąt razy w przeciągu jednej sekundy, czyli że czas jednego impulsu wynosi 20ms. Czas wypełnienia impulsu w celu sterownia wynosi od 1ms do 2ms, co daje od 5% do 10% czasu wypełnienia. Można to sprawdzić stosując standardowe wzory znajdujące się poniżej.

Na początek należy wyznaczyć czas trwania całego impulsu.

$$T[\text{ms}] = \frac{1}{f} * 1000$$

$$T = \frac{1}{50} * 1000 = 20\text{ms}$$

Znając już czas trwania jednego impulsu należy wyznaczyć wartość wypełnienia.

$$k_\omega = \frac{T_{100\%}}{T}$$

$$k_\omega = \frac{1}{20} = \frac{5}{100} = 0,05$$

$$k_\omega = \frac{2}{20} = \frac{10}{100} = 0,1$$

Kolejno zamienić tą wartość na wartość wypełnienia procentowego.

$$k_\omega = \frac{T_{100\%}}{T} * 100\%$$

$$k_\omega = \frac{1}{20} * 100\% = \frac{5}{100} * 100\% = 5\%$$

$$k_\omega = \frac{2}{20} * 100\% = \frac{10}{100} * 100\% = 10\%$$

Serwomechanizmy cyfrowe w standardach modelarskich działają na sześciokrotnie wyższej częstotliwości w porównaniu do częstotliwości serwomechanizmu analogowego. Korzystając z powyższych wzorów można wyliczyć pozostałe parametry takie jak długość impulsu.

$$T = \frac{1}{300} * 1000 = 3,33 \text{ ms}$$

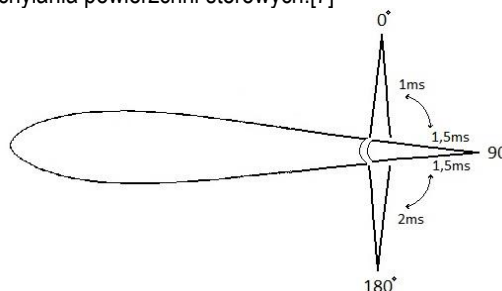
Oznacza to, że impuls wypełnienia występuje sześć razy częściej niż w serwomechanizmie analogowym. Dzięki tak wysokiej częstotliwości serwonapęd uzyskuje dużo szybszą reakcję na zadany sygnał i większą precyzyjność w ruchu. Dodatkowo charakteryzuje się płynniejszą i szybszą pracą. Podczas sterowania czas wypełnienia w mili sekundach pozostaje bez zmian, tak jak przy sterowaniu serwonapędem analogowym od 1 do 2ms. Zmienia się natomiast wypełnienie procentowe dla tych wartości.

$$k_\omega = \frac{T_{100\%}}{T} * 100\%$$

$$k_\omega = \frac{1}{3,33} * 100\% \approx 0,3 * 100\% \approx 30\%$$

$$k_\omega = \frac{2}{3,33} * 100\% \approx 0,6 * 100\% \approx 60\%$$

Jedna milisekunda czasu wypełnienia, czyli 5% wypełnienia impulsu dla serwonapędu analogowego i 30% dla serwonapędu cyfrowego oznacza skrajnie lewe wychylenie orczyka, tzn. że orczyk znajduje się w pozycji 0° . Dwie milisekundy czasu wypełnienia impulsu, co przekłada się na 10% dla serwonapędu analogowego i 60% dla serwonapędu cyfrowego oznacza skrajnie prawe wychylenie orczyka, czyli że orczyk jest w pozycji 180° . W zależności od tego, gdzie i w jakim celu są użyte serwonapędy wyróżnia się ich kilka trybów pracy. W płatowcach serwonapędy sterujące lotkami muszą wykonywać ruch w górę i w dół, zamiast klasycznego ruchu od 0° do 180° , dlatego aparatura sterująca ustawiona w pozycji neutralnej wysyła sygnał o szerokości impulsu 1,5ms, przez co orczyk serwonapędu ustawia się w pozycji 90° , co daje możliwość kontroli góra dół w zakresie 90° . Znalazło to zastosowanie na pokładach płatowców w celu wychylania powierzchni sterowych.[7]



Rys. 3. Zależność położenia lotki sterowej od czasu wypełnienia impulsu sterującego PWM, źródło: opracowanie własne

3. ZAPROJEKTOWANIE I WYKONANIE UKŁADU STERUJĄCEGO SERWONAPĘDEM POPRZEC UKŁAD MIKROPROCESOROWY EMAX ES – 3103

Układ mikroprocesorowy umożliwia stworzenie prostego autopilota. Po uprzednim zaprogramowaniu może on z powodzeniem zastąpić ręczną aparaturę sterującą a tym samym odciążyć operatora Bezzałogowego Statku Powietrznego.

3.1. Oprogramowanie sterujące serwonapędem

Jest jedną z metod sterowania serwonapędem, dzięki której można zaprogramować serwonapęd nie tylko do wykonywania pojedynczego ruchu, ale również do np. zapętlenia go, by poruszał się ciągle wykonując ruch wahadłowy. Do zaprogramowania posłużyła płytka arduino mega 2560 rev3. Jest to płytka programowalna, dzięki której można programować serwonapędy. Przetwarza napisane na komputerze polecenie na sygnał sterujący PWM i przekazuje do serwonapędu.



Rys. 4. Płytkę arduino mega 2560 rev3

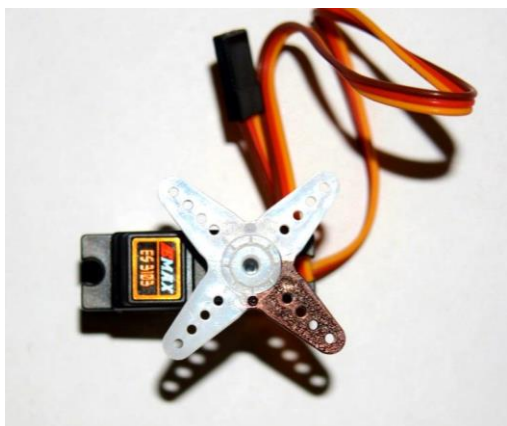
Jest to jedna z najpopularniejszych płyt mikroprocesorowych używana do programowania. Płytkę Arduino mega 2560 rev3 wyposażona jest w mikrokontroler ATmega 2560, 54 portów cyfrowych z czego 15 mogą służyć do sygnału PWM i 16 analogowych, pamięć Flash równą 256kB i 8kB pamięci RAM. Do płytki Arduino podłączony został serwomechanizm modelarski EMAX ES – 3103. Jest to serwomechanizm analogowy klasy mini.



Rys. 5. Serwomechanizm modelarski EMAX ES – 3103

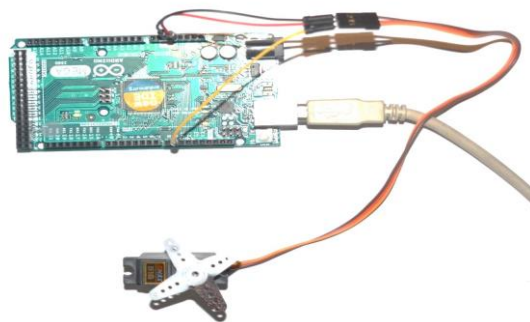
Masa: 17g
 Wymiary: 28x13x27mm
 Moment obrotowy: 4,8V – 2,5 kg/cm 6,0V – 3,0 kg/cm
 Prędkość: 4,8V – 0,14 s/60° 6,0V – 0,12 s/60°
 Napięcie: 4,8 – 6,0V

Następnie na serwomechanizm nałożony został orczyk krzyżowy z zaznaczonym jednym ramieniem na kolor czarny, w celu lepszego kontrastu przy obserwacji wykonywanej przez niego pracy.



Rys. 6. Serwomechanizm modelarski z nałożonym orczykiem

Do zaprogramowania płytki potrzebny jest software, w którym można napisać specjalny program sterowania serwomechanizmem. Oprogramowanie zostało pobrane ze strony producenta <https://www.arduino.cc>. Do przeprowadzenia badania posłużyła najnowsza dostępna wersją ARDUINO 1.6.8. Następnie przewody zostały podłączone do odpowiadającym im na płytce portom. Przewód koloru czarnego(-) do portu GND, koloru czerwonego(+) do portu zasilającego napięciem 5V, które mieści się w zakresie pracy badanego serwomechanizmu, żółty przewód sygnałowy do portu 9, który został przypisany w programie do przesyłania sygnału.



Rys. 7. Podłączony serwomechanizm do płytki Arduino

Po podłączeniu wszystkiego napisany został przykładowy program sterujący serwomechanizmem, tak aby wykonywał zapętlony ruch wahadłowy od 0° do 180° i z powrotem.

```
/* Program obrazujący sterowanie serwomechanizmem
EMAX ES 3103
za pomocą płytki Arduino MEGA 2560
*/
```

```
#include <Servo.h>
```

```
Servo EMAXES3103; // tworzy obiekt serwo i umożliwia
sterowanie nim
```

```
int pos = 0; // tworzy zmienną typu int do przetrzymywania
pozycji kątowej serwa
```

```
void setup()
{
    EMAXES3103.attach(9); // sterowanie serwem z pinu nr
    9
}
```

```
void loop()

{
    for (pos = 0; pos <= 180; pos += 1) // pętla zmiany pozycji
    kątowej serwa od 0 do 180 stopni co 1 stopień - opóźnienie
    czasowe 2,5 ms
    {
        myservo.write(pos); // rozkaz wysteroowania serwa
        do pozycji 'pos'
        delay(25); // opóźnienie czasowe 2,5 ms
    }
    for (pos = 180; pos >= 0; pos -= 1) // pętla zmiany pozycji
    kątowej serwa od 180 do 0 stopni co 1 stopień - opóźnienie
    czasowe 2,5 ms
    {
        myservo.write(pos); // rozkaz wysteroowania serwa
        do pozycji 'pos'
        delay(25); // opóźnienie czasowe 2,5 ms
    }
}
```




Rys. 8. Napisany program w ARDUINO 1.6.8

Kompilacja napisanego programu i wgranie na płytkę arduino, spowodowało ruch wahadłowy ramienia serwomechanizmu od 0° do 180°, w tą i z powrotem. Ruch ten będzie się powtarzał aż do momentu odłączenia serwomechanizmu od płytki arduino lub wgrania nowego programu. Napisany program ma na celu pokazanie prostego ruchu serwomechanizmu. Za pomocą płytki arduino istnieje możliwość stworzenia prostego autopilota. Cała idea sterowania serwonapędami, jak i całym BSP, sprowadza się do generowania odpowiednich sygnałów PWM. Dzięki takiej płytce jak arduino i odpowiednio napisanemu programowi, który sterował by silnikiem i serwonapędami istnieje możliwość stworzenia prostego autopilota.

3.2. Przeprowadzenie badań

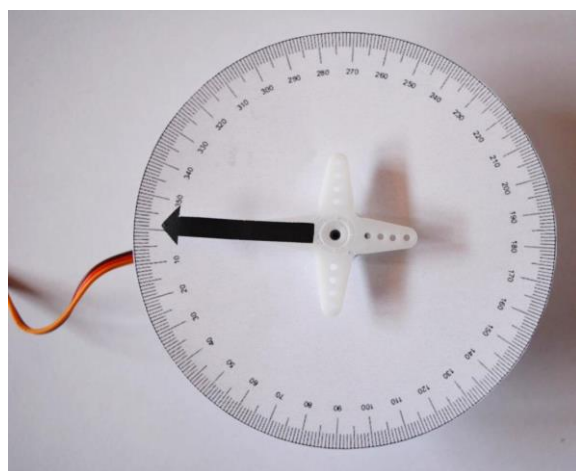
Przeprowadzenie badania ma na celu pokazanie, dlaczego do pracy serwomechanizmu w standardzie modelarskim dobrano takie a nie inne odpowiadające standardom parametry i jak ważne jest odpowiednie dobranie parametrów sygnału aby serwonapęd działał płynnie i bez zakłóceń. Na wstępie zostaną pokazane zakresy pracy serwomechanizmu. Kolejnym krokiem będzie wskazanie zależności częstotliwości od dynamiki zespołu napędowego serwomechanizmu.

Do przeprowadzenia badania posłużył generator sygnałów agilent 33220a i serwomechanizm modelarski EMAX ES – 3103. W celu lepszego zobrazowania przygotowana została tarcza z wyznaczonymi kątami oraz strzałką wskazująca kąt wychylenia orczyka.



Rys. 9. Generator sygnałów PWM agilent 33220a

Pierwszym krokiem było zamocowanie do serwomechanizmu tarczy z zaznaczonymi kątami, a następnie nałożenie orczyka ze strzałką.



Rys. 10. Przygotowany serwomechanizm do badania

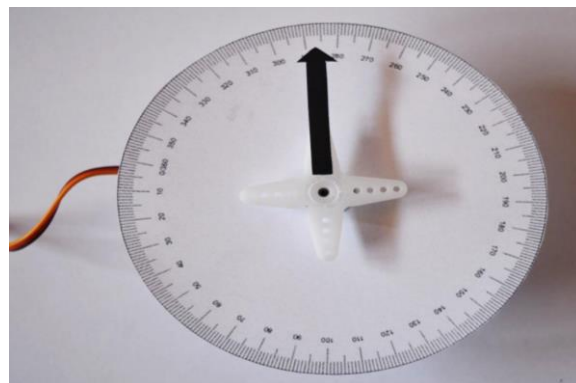
Na generatorze ustawione zostały odpowiednie parametry, zgodne ze standardami modelarskim. Częstotliwość równa 50Hz a wypełnienie na 1,5ms, zasilanie wynosiło 5V. W chwili podłączania przygotowanego wcześniej serwomechanizmu generator ustawiono tak, by nie wysyłał sygnału. Po podłączeniu i sprawdzeniu czy wszystkie zadane parametry się zgadzają na generatorze został włączony przycisk wysyłający sygnał. Serwomechanizm ustawił się w pozycji zerowej, oznaczającej wychylenie orczyka w zakresie jego pracy o kąt 90°. Dalszy przebieg badania polegał na stopniowej zmianie wypełnienia od 1,5ms w górę a następnie w dół. Miało to na celu sprawdzenie, do jakiej wartości wypełnienia, serwomechanizm będzie działał i jakie będą jego maksymalne wychylenia.

Tab. 1. Wyniki badania dla wartości rosnącej

Wartość impulsu	Kąt wychylenia
1,55	357°
1,6	350°
1,65	347°

Częstotliwość	Stopnie dla 1,5 ms	Stopnie dla 1 ms	Stopnie dla 2 ms
70Hz	0°	62°	313°
60Hz	0°	62°	313°
50Hz	0°	62°	313°
40Hz	0°	62°	313°
30Hz	0°	62°	313°

Tabela przedstawia rosnące wyniki kątownego wychylenia orczyka z pozycji wyjściowej od wypełnienia sygnału równego 1,5ms dla którego położenie orczyka równe jest 0°. Przy wypełnieniu 2,25ms serwomechanizm przestał reagować na zadawany mu sygnał co oznacza, że jest to jego maksymalne wychylenie.

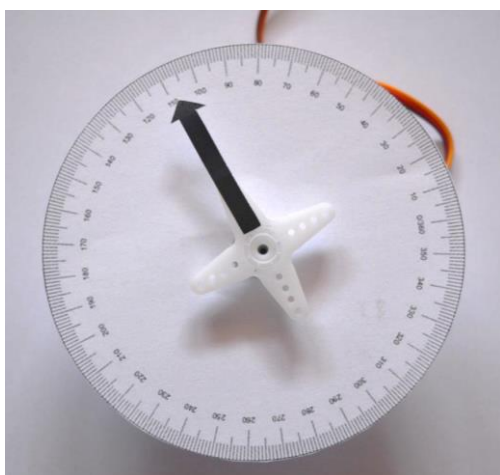


Rys. 11. Wychylenie orczyka serwomechanizmu dla maksymalnego wypełnienia sygnału

Tab. 2. Tabela wyników badania dla wartości malejącej

Wartość impulsu	Kąt wychylenia
1,45	7°
1,4	12°
1,35	18°
1,3	23°
1,25	29°
1,2	36°
1,15	42°
1,1	49°
1,05	55°
1	62°
0,95	70°
0,9	78°
0,85	87°
0,8	99°
0,75	109°
0,7	Brak reakcji

Tabela przedstawia malejące wyniki kąтового wychylenia orczyka z pozycji wyjściowej 0°. Przy wypełnieniu równym 0,7ms serwomechanizm przestał reagować na zadawany mu sygnał co oznacza, że jest to jego minimalne wychylenie.



Rys. 12. Wychylenie orczyka serwomechanizmu dla minimalnego wypełnienia sygnału, źródło: opracowanie własne

Badanie pokazało, że praca standardowego serwomechanizmu modelarskiego wykracza poza standardy modelarskie sygnału sterującego. Dzięki takiemu eksperymentowi można dokonać sprawdzenia możliwości każdego serwomechanizmu i jego zakres pracy. Daje to możliwość zwiększenia pola pracy serwonapędu.

Kolejny eksperyment miał ukazać zależność pracy serwomechanizmu od częstotliwości. W tym badaniu zmieniano częstotliwość sygnału i sprawdzano reakcję działania serwa na wymuszenie. Na początku ustawiono wypełnienie a następnie zmieniano częstotliwość i dopiero generowano sygnał.

Tab. 3. Tabela wyników przy zmienianej częstotliwości

1,7	343°
1,75	337°
1,8	333°
1,85	327°
1,9	323°
1,95	317°
2	313°
2,05	307°
2,1	303°
2,15	298°
2,2	294°
2,25	Brak reakcji

Ponieważ sygnał sterujący wysyłany jest z inną częstotliwością, zmienia się prędkość ruchu serwomechanizmu a nie kąt wychylenia orczyka.

Następnym krokiem było sprawdzenie czy zmiana częstotliwości ma wpływ wypełnienie.

Tab. 4. Tabela wyników zależności wypełnienia od częstotliwości

Częstotliwość	Wypełnienie	Kąt wychylenia
50Hz	7,5%	0°
40Hz	7,5%	325°
38Hz	7,5%	316°
36Hz	7,5%	306°
34Hz	7,5%	294°
32Hz	7,5%	Brak reakcji

Poniżej 34Hz serwomechanizm przestał reagować na wymuszenie.

$$34 \text{ Hz} = \frac{1}{34} \text{ s}$$

$$\frac{1}{34} \text{ s} = 0,029 \text{ s}$$

$$0,029 \text{ s} = 29 \text{ ms}$$

$$2,175 \text{ ms} = 7,5\%$$

Dobierając częstotliwości pracy serwomechanizmu należy przeprowadzić badania, w celu ustalenia optymalnych wartości, gdyż w przypadku sterowania procentowym wypełnieniem a sterowaniem poprzez wypełnienie w ms występują rozbieżności w pozycji zerowej.

Również zmiana częstotliwości ma znaczący wpływ na wypełnienie impulsu. Przy zmieniającej się częstotliwości zmienia się wypełnienie. Podczas przeprowadzania badania można było zauważyć znaczące pogorszenie się parametrów pracy serwomechanizmu przy zmianie częstotliwości. Spadek częstotliwości spowodował spowolnienie serwomechanizmu i problemy z płynną pracą. Wzrost częstotliwości polepszył prędkość obrotu ale spowodował przekraczanie wyznaczanych wartości kątowych, przez co serwomechanizm musiał dokonywać poprawki

PODSUMOWANIE

Dobierając serwonapędy do konstrukcji Bezzałogowego Statku Powietrznego należy pamiętać o właściwym wyborze ich klasy w zależności od zapotrzebowania i celów jakim mają służyć. Zastosowanie za dużych serwonapędów do małych modeli może wiązać się z przekroczeniem dopuszczalnych wartości sił działających na usterzenie oraz konstrukcję, co może powodować zniszczenie modelu oraz przekroczenie masy startowej, a w rezultacie uziemienie Bezzałogowego Statku Powietrznego. Z kolei zastosowanie zbyt małych serwonapędów do bardzo dużych modeli może wiązać się z problemami w ich pilotowaniu, wynikającymi z niewystarczającego momentu obrotowego serwonapędu, przez co może doprowadzić do katastrofy. Dokonując wyboru trzeba się również zastanowić nad rodzajem serwonapędu pomiędzy analogowym a cyfrowym. Trzeba zwrócić uwagę na fakt, czy droższe ale szybsze i bardziej precyzyjne serwonapędy nie będą zbędnym wydatkiem. Kolejnym etapem jest dobór rodzaju sterowania. Czy bardziej użyteczne będzie sterowanie ręczne poprzez aparaturę sterującą, czy sterowanie automatyczne za pomocą autopilota, które wydaje się o wiele wygodniejsze i prostsze, lecz profesjonalne autopiloty sięgają bardzo wysokich cen. W przypadku budowy tanich i lekkich modeli BSP w celach rekreacyjnych zastosowanie drogiego autopilota mija się z celem. Co innego stanowią profesjonalne Bezzałogowe Statki Powietrzne wykorzystywane przez służby mundurowe. Dzięki zastosowaniu w nich autopilota, który jest wyposażony w funkcje pomocnicze i zabezpieczające lot, takie jak

failsafe, dzięki którym po utracie sygnału Bezzałogowy Statek powietrzny jest w stanie sam wykonać manewr lądowania lub powrócić do punktu startowego.

Z przeprowadzonych badań wynika, jak ważne znaczenie ma odpowiednie dobranie charakterystyk i parametrów pracy sygnału PWM, w celu sterowania serwonapędem. Podczas badania przedstawione zostały konsekwencje zastosowania zbyt dużej jak i zbyt małej częstotliwości sygnału sterującego. Przy zastosowaniu zbyt małej częstotliwości sterowanie serwomechanizmem staje się trudne z powodu opóźnionej reakcji na sygnał, jak i spowolnionego ruchu, co praktycznie uniemożliwia sterowanie. Przy zastosowaniu zbyt dużej częstotliwości można by wnioskować że serwomechanizm zaczął działać lepiej, a czym wyższa częstotliwość tym działa szybciej i sprawniej. Jednakże wówczas serwomechanizm był przesterowany i podczas obrotu zaczął przekraczać pożądany kąt, po czym cofał się na oczekiwaną pozycję. Przy takiej częstotliwości sterowanie było by bardzo utrudnione z powodu braku możliwości płynnej regulacji, przez co przy sterowaniu, BSP wykonywał by niepożądane ruchy, a każda próba koordynacji kończyła by się pogłębieniem niekontrolowanych ruchów. Przy badaniu wypełnienia impulsu sygnału można było zauważyć, że serwomechanizm, pomimo wykroczenia poza standardy modelarskie 1-2ms wciąż działał, a kąt wychylenia orczyka jest znacznie większy od przyjętego standardu 180°. Dzięki przeprowadzonym badaniom uzyskuje się wiedzę, pomagającą zwiększyć możliwości przy programowaniu autopilota i sterowaniu serwonapędem. Powyższy eksperyment zawiera dodatkowo ważne informacje, dzięki którym w przypadku precyzyjnego sterowania można odpowiednio wyregulować pracę elementu sterowanego za pomocą serwonapędu.

BIBLIOGRAFIA

1. Astrom K., Hagglund T., PID Controllers: Theory, design, tuning. USA, 1995. ISBN 1-55617-516-7
2. Barret J., Harned T., Monnich J. Linear motor basics. Parker Hannifin Corporation.
3. Bortsov J.A., Sokolovskii G.G., Automated electrical drive with flexible connections. Printed by Energoatomizdat, Saint-Petersburg (in Russian), 1992. ISBN 5-283-04544-7
4. Kowalik R., Komorek A., Bieńczyk R., Wyznaczanie dokładności pozycji obiektów ruchomych w przestrzeni 3D, Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. 12/2016
5. Kowalik R., Komorek A., Bieńczyk R., Matematyczny opis dynamiki ruchu bezzałogowego statku powietrznego, TTS Technika Transportu Szynowego, 12/2015
6. Kowalik R., Orlińska M., Analiza kinematyczna pojazdu w układzie 3D, Logistyka, 12/2014
7. Ogata K., Modern Control Engineering. Prentice Hall PTR, Fourth edition, 2001.

Mathematical model and analysis of working electro-servo motor used in unmanned aerial vehicle

This article discusses the operation and operation of servo drives used in unmanned aerial vehicles. In the first part, their use was shortened and the principle of operation was briefly discussed. The second part presents a mathematical model describing physical processes occurring during their work. The work also includes an overview of the signals that control the states of servo drive systems. The concept of the UAV drive system, together with real-life research, was designed to evaluate the efficiency and efficiency of the developed electronic system intended to be a subassembly of a laboratory station. The summary and the conclusions of the tests were then presented.

Autor:

dr inż. **Rafał Kowalik** - Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Wydział Lotnictwa, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania