

THE USE OF A FUZZY LOGIC TO ELIMINATE AN ERROR IN MEASURING THE FLIGHT ALTITUDE OF THE W-3 „SOKÓŁ” HELICOPTER

WYKORZYSTANIE LOGIKI ROZMYTEJ W CELU WYELIMINOWANIA BŁĘDU POMIARU WYSOKOŚCI LOTU ŚMIGŁOWCA W-3 „SOKÓŁ”

Krystian Bujak, Norbert Grzesik, Konrad Kuźma

Air Force Academy in Dęblin
Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Wydział Lotnictwa

Abstract: *Along with the growing technology, helicopters are equipped with increasingly complex avionics and operational control systems. Such devices use a variety of input signals in order to enhance their performance. Owing to the use of electronic control systems, modern helicopters have a wide range of possibilities, both in terms of manoeuvrability and combat. The article presents a case study of designing equipment control systems on the example of a radio altimeter, which is mounted onboard the W-3 “Sokół” helicopter. The primary assumption was to design a fuzzy controller using FuzzyLogic Toolbox in the Matlab software package that will facilitate similar results, and, above all, will eliminate the altitude measurement error resulting from the bank of a helicopter.*

Keywords: *radio altimeter, Fuzzy Logic, helicopter W-3 „Sokół”*

Streszczenie: *Wraz z rozwijającą się technologią, śmigłowce wyposażane są w coraz bardziej złożone systemy awioniki i kontroli pracy. Takie urządzenia wykorzystują wiele sygnałów wejściowych, w celu uzyskania jak najlepszych rezultatów. Dzięki zastosowaniu elektronicznych systemów sterowania współczesne śmigłowce mają bardzo duży wachlarz możliwości zarówno manewrowych jak i bojowych. W artykule przedstawiono studium przypadku projektowania systemów sterowania urządzeń, na przykładzie radiowysokościomierza będącego na wyposażeniu śmigłowca W-3 „Sokół”. Podstawowym założeniem autorów było zaprojektowanie sterownika rozmytego z wykorzystaniem FuzzyLogic Toolbox programu Matlab, który pozwoli otrzymać podobne rezultaty pracy urządzenia, a przede wszystkim wyeliminuje błąd pomiaru wysokości wynikający z przechylenia śmigłowca.*

Słowa kluczowe: *radiowysokościomierz, logika rozmyta, śmigłowiec W-3 „Sokół”*

THE USE OF A FUZZY LOGIC TO ELIMINATE AN ERROR IN MEASURING THE FLIGHT ALTITUDE OF THE W-3 „SOKÓŁ” HELICOPTER

1. Introduction

Along with the development of a construction thought, Man has tried to exclude human factor as a decisive thought for the operation of machines. Contemporary designers attempt at building machines whose work will be reliable in all conditions. Such assumptions require devices to adapt to changing environmental conditions. Searching for these solutions led to the separation of the direction of research, which is fuzzy logic. It was proposed in 1965 by Prof. Lotfi Zadeh and is closely linked with his theory of fuzzy sets. Classical logic is based on values set out in the zero-one system, that is, in short, something is either true or false. The boundary between truth and false is strictly determined and non-changing. Fuzzy logic, on the other hand, is a substitute for human reasoning and introduces additional values between the above-mentioned sets. Due to such solutions, it is possible to assess more precisely a given problem [1]. Fuzzy logic has found its application everywhere where the use of classical logic makes a mathematical record of the process impossible. It has proved very useful in various engineering applications [2,3,4,5,6].

Along with the growing technology, helicopters are equipped with increasingly complex avionics and operational control systems. Such devices use a variety of input signals in order to obtain the best results. Owing to the use of electronic control systems, modern helicopters have a wide range of possibilities, both in terms of manoeuvrability and combat capabilities. The aim of this article is to present a case study of designing equipment control systems on the example of a radio altimeter, which is mounted onboard the W-3 “Sokół” helicopter.

2. Research problem

Helicopters perform operations at low altitudes, often manoeuvring between obstacles. Such tasks require high concentration levels as well as commitment on the part of the pilot. A very important aspect is to maintain an appropriate flight altitude, which allows a safe flight over obstacles while remaining relatively low. The device to assist such manoeuvres is a radio altimeter.

The principle of operation of a radio altimeter is based on measuring the time between sending a beam of a radio wave from the transmitting antenna and receiving the same wave by the receiving antenna. Knowing the time and speed of propagation of the wave, it is possible to determine the way that the wave has travelled. Unfortunately, this instrument is burdened by a certain error that occurs in case of a position of the helicopter other than parallel with the line of the horizon.

During turn manoeuvres the distance indicated by the radio altimeter deviates from the absolute altitude. The larger bank of the helicopter, the bigger error occurs on the readings of the radio altimeter. Therefore, the authors decided to design a controller based on fuzzy logic that will allow receiving similar results of the operation of the device, and above all will eliminate measurement error of altitude, resulting from the helicopter bank.

3. Research platform

The W-3 "Sokół" helicopter is equipped with two types of radio altimeters: A-037 model and KRA 405 model. Their primary purpose is to indicate the current flight altitude from the ground. In addition, radio altimeters have also:

- a light and audible indication of a lowered flight altitude of the helicopter below the dangerous altitude, determined by the pilot;
- signalling an incorrect operation of the radio altimeter.

The full KRA 405 radio altimeter set includes a transmitter- receiver block, an altitude indicator, a transmitting antenna, a receiving antenna, and a safety switch [7]. The basic technical parameters of the radio altimeter have been presented in Table 1.

Tab. 1 Tactical and technical data of KRA 405 radio altimeter [7].

Range of measured and signalled dangerous altitudes	0 – 2,000 ft (0 – 609.6m) 1 ft (1 feet – 0.3048m)
Accuracy of measurement of absolute altitude	From 0 to 500 ft it equals ± 5 ft (1,5m) or $\pm 5\% H_{rz}$ for $H > 500$ ft it equals $\pm 7\% H_{rz}$
Accuracy of signalling a dangerous altitude	± 5 ft (1.5m) or $\pm 5\% H_{rz}$
Range of transmitting frequencies	4285 – 4315 MHz
Power supply	$= 27.5 \pm 20\% V$
Maximum altitude of operation	55,000 feet (16,764 m)
Range of operation	from $-54^{\circ}C$ to $+71^{\circ}C$

4. Design of the fuzzy controller

In the project of the radio altimeter fuzzy control at stake, the parameters specifying the altitude are the time of wave propagation and the helicopter bank. Due to small changes in the helicopter bank during a flight, this parameter was omitted. The maximum input bank equals 30° , because its greater value is not indicated by the radio altimeter. The main objective of the project is to eliminate the error measurement by the radio altimeter caused by the helicopter bank. The graphic layout of the controller developed in the FuzzyLogic software of the Matlab package is shown in Figure 1

*The use of a fuzzy logic to eliminate an error in measuring the flight altitude...
Wykorzystanie logiki rozmytej w celu wyeliminowania błędu pomiaru wysokości...*

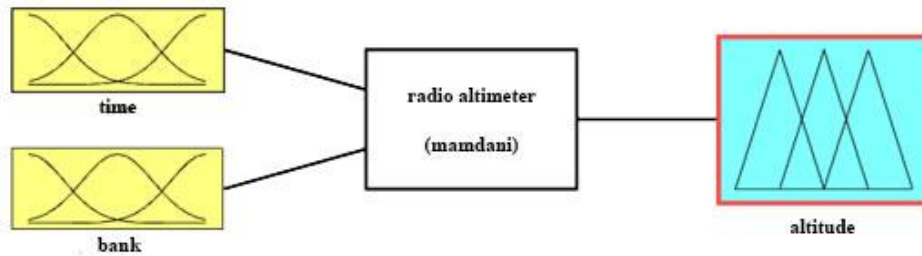


Fig. 1 Fuzzy controller model

The input signals of the controller are described by three gaussian membership functions. The time of wave propagation was defined in the range from 0 to 8,000 μ s as small, medium and large. The helicopter bank varied from -30° to the left to 30° to the right and was described by membership functions: left, horizontal and right. The shape and the parameters of individual input signals are presented in Figures 2 and 3, respectively.

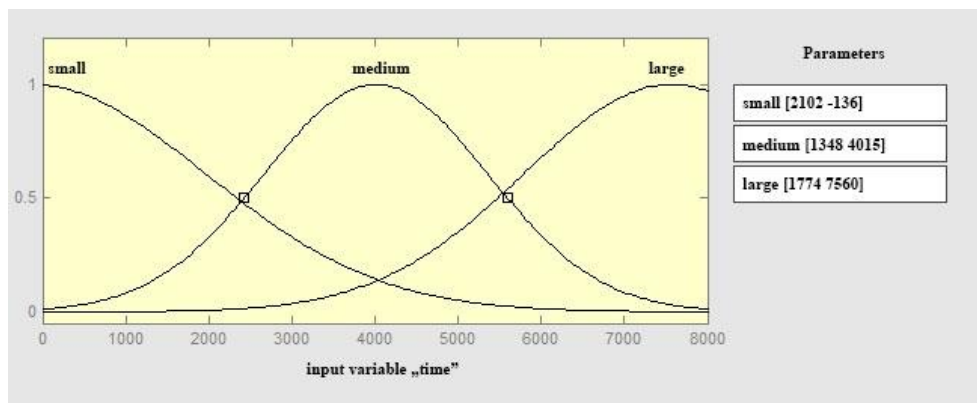


Fig. 2 Input signal "time of wave propagation"

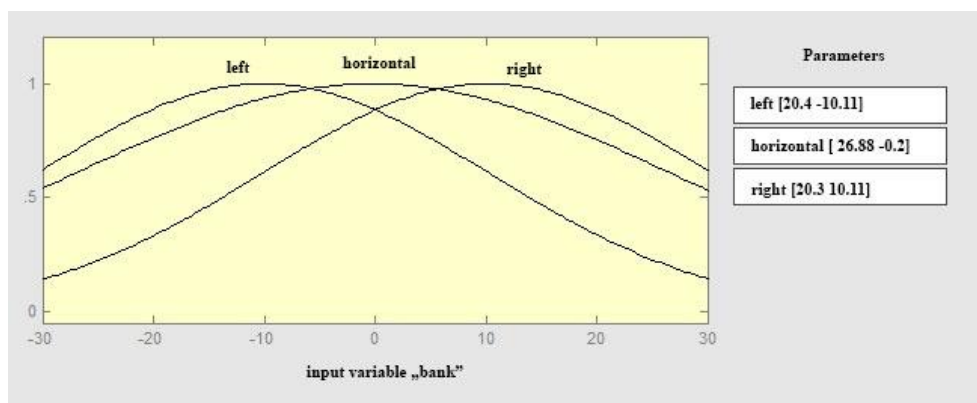


Fig. 3 Input signal "helicopter bank"

The input signal, however, was determined in the range from 0 to 2,400 ft (731.52 m). The authors used membership functions composed of two gaussian functions, determined as: very small, small, medium, large medium, big and very big. The appearance and parameters of the membership function of the output signal are shown in Figure 4.

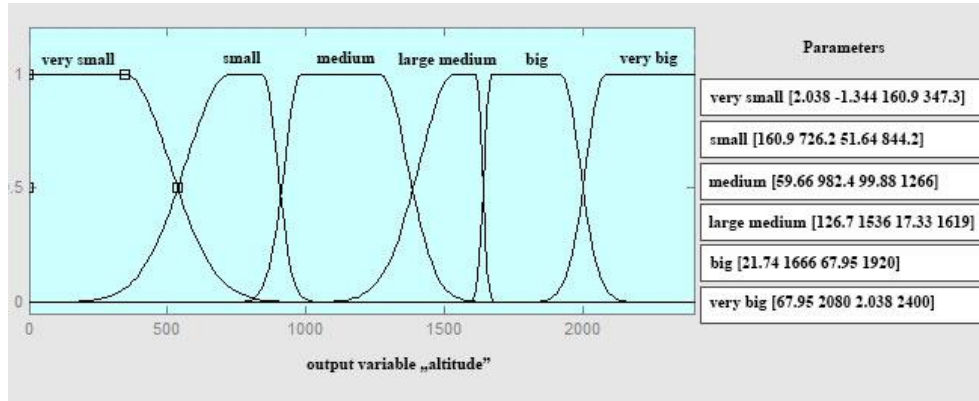


Fig. 4 Output signal "altitude"

After determining the membership function of the input signals and the output signal, we determined the principles of deduction, whose number stems from the dependency [8,9]:

$$r = z^w$$

where:

- r - number of deduction principles
- z - number of fuzzy sets of the system
- w - number of inputs

Nine deduction principles created for each combination of the input parameters are assigned to the appropriate system response. The base of principles relies on actual experience and expertise knowledge.

System examination

The next step in this project was to test the work of the controller, which was divided into three phases: an analysis of the plane control, an application of the sampling method and a simulation of the controller's operation in Simulink package.

- 1) The first step in checking the correctness of the controller's operation was to analyze the control plane as shown in Figure 5. The shape of the plane is as expected, the altitude does not change practically for each angle of the bank for different time values of the wave propagation. There are, however, bulges or hollows, especially at larger angles of bank, which may suggest slight differences in the determined altitude.

*The use of a fuzzy logic to eliminate an error in measuring the flight altitude...
Wykorzystanie logiki rozmytej w celu wyeliminowania błędu pomiaru wysokości...*

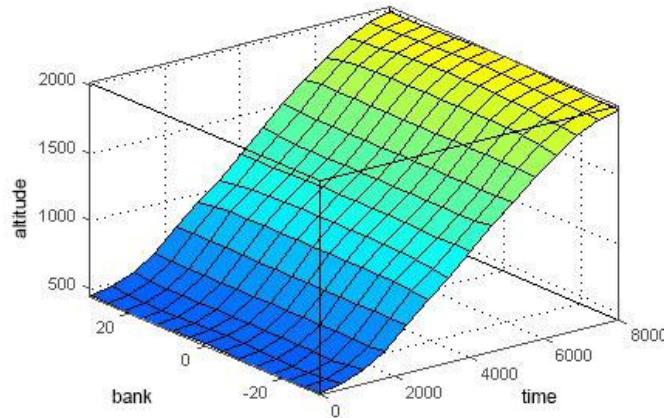


Fig. 5 Altitude dependence on wave propagation and bank

- 2) During the second phase of testing the controller, for the sake of an accurate analysis of its work, there were selected 21 test samples for 3 different times of wave propagation, where 7 different positions of the helicopter in the form of a horizontal flight and bank to the left and right. The test results are shown in Table 2.

Tab. 2 Findings of examining 20 samples.

No.	Input signals		Output signals
	Time	Bank	Time
1.	1,000	0	510
2.	1,000	-5	510
3.	1,000	-15	510
4.	1,000	-25	510
5.	1,000	5	510
6.	1,000	15	510
7.	1,000	25	510
8.	5,000	0	1,460
9.	5,000	-10	1,460
10.	5,000	-20	1,460
11.	5,000	-30	1,480
12.	5,000	10	1,460
13.	5,000	20	1,460
14.	5,000	30	1,480
15.	7,000	0	1,950
16.	7,000	5	1,950
17.	7,000	-5	1,950
18.	7,000	-15	1,940
19.	7,000	15	1,940
20.	7,000	-30	1,920
21.	7,000	30	1,920

The analysis of the results of sampling confirmed suspicions as for the indications for larger angles of bank. The altitude, at a short time of wave propagation, is invariant, whereas at longer times the altitude changes from the moment of exceeding the bank above 15° . In addition, it can be noted that the change of the bank from left to right, at the same angle value, does not change the altitude.

- 3) The last stage of checking the work of the controller was a simulation conducted in the Simulink software package. For a better illustration of the behaviour of the controller, two simulations and their course were read out on oscilloscopes.

During the first simulation, the following assumptions were adopted: the first input signal "time" within ten seconds of the simulation reduces its value from 1,200 to 520. The helicopter in the initial phase flies with a zero angle of bank and then rolls to the left by 5° and after two seconds increases the bank to 10° to the left. The course of the input signals and the course of the simulation has been shown in Figure 6.

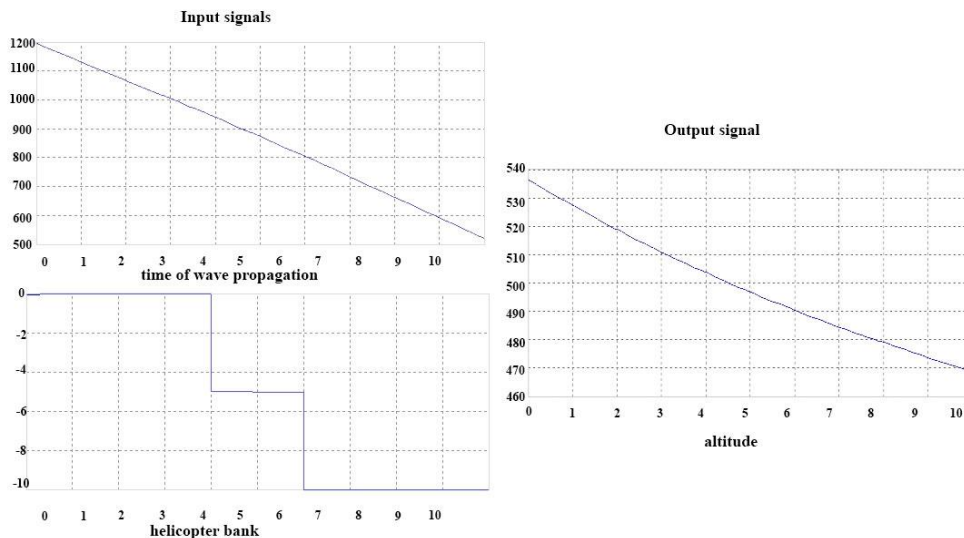


Fig. 6 First simulation

The result obtained in the simulation indicates a correct operation of the controller. The altitude decreases proportionally to the declining time of wave propagation while maintaining almost linearity when changing the bank. Absence of altitude leaps when changing the bank also confirms the correct behaviour of the controller.

In the second simulation the authors examined the behaviour of the controller when changing the bank, without changing the time of wave propagation.

*The use of a fuzzy logic to eliminate an error in measuring the flight altitude...
Wykorzystanie logiki rozmytej w celu wyeliminowania błędu pomiaru wysokości...*

The parameter "time" received a fixed value of 3,000 μ s, whereas the parameter "bank" begins from the right bank of the helicopter at an angle of 30° and linearly it moves to a horizontal forward flight of the helicopter, and then linearly it moves into a left bank of the value 30°. The course of the simulation has been depicted in Figure 7.

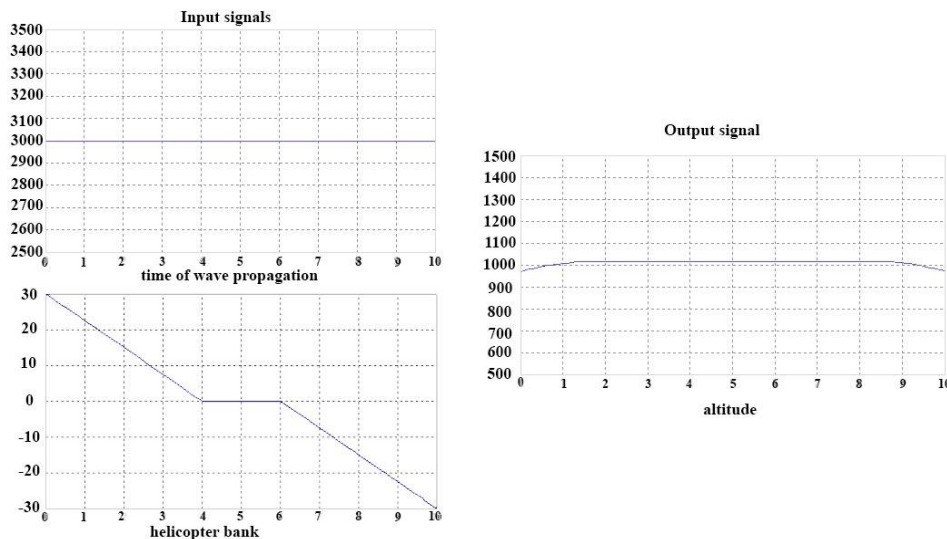


Fig. 7 Second simulation

The generated signal of altitude within the bank angles by 15° has got a fixed value, which confirms the results of the sampling. From 15° of bank, both to the left and to the right, the altitude is slightly lowered, which may prove that the controller needs adjusting. A good phenomenon, however, is a symmetrical appearance of the signal, because the direction of bank cannot change the value of the altitude.

5. Summary, Conclusions

The obtained results are satisfactory. Irrespective of the value of the bank, for short times of propagation of the wave, the same flight altitude was received. For long periods, there is a difference in altitude with bank ranging from 15 to 30°, however it does not exceed 1.6 %, which according to the authors is a good result. However, before the implementation of the controller into service, undoubtedly it needs to be optimized and tuned.

On the basis of the obtained results of the analysis of the work and simulation, it can be assumed that the application of the fuzzy controller in the radio altimeter could contribute to eliminating a measurement error of altitude due to the bank of the helicopter. It seems particularly important in terms of the tasks performed by helicopters at low levels, very often between obstacles. More accurate visualization of the instruments would certainly contribute to the safety improvement of the executed tasks.

6. References:

- [1] Mulawka J.J.: Systemy ekspertowe, WNT, Warszawa 1996.
- [2] Anderson G.: Applying fuzzy logic in the real world. „Reprinted with permission of Sensor magazine, Helmers Publishing. Inc”, 1992.
- [3] Azadeh A. Ebrahimipour V. Bavar P.: A fuzzy inference system for pump failure diagnosis to improve maintenance process: The case of a petrochemical industry, „Expert Systems with Applications”, 2010, 37, 627-639.
- [4] Demirci S. Hajiyev Ch. Schwenke A.: Fuzzy logic-based automated engine health monitoring for commercial aircraft, „Aircraft Engineering and Aerospace Technology”, 2008, 80 Iss: 5, 516 – 525.
- [5] Chaudhari S. Patil M.: Study and Review of Fuzzy Inference Systems for Decision Making and Control, „American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics”, 2014, 2328-3491.
- [6] Mitkiewicz A.: Wykorzystanie sztucznej inteligencji w współczesnym lotnictwie, Dęblin, 2004.
- [7] Rypulak A.: Podstawy użytkowania śmigłowca W-3WA, wyposażenie radioelektroniczne, Dęblin, 2000.
- [8] Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte, Warszawa, 1997.
- [9] Grzesik N.: Podstawy sterowania rozmytego, Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Dęblin 2012.



Norbert Grzesik, prof. – Associate Professor at the Air Force Academy in Dęblin. He graduated from the Military Technical Academy, a speciality of weapons. He specializes in the use of fuzzy expert systems in aircraft (military and civilian) in on-board systems which are responsible for the the assessment of reliability and efficiency. (Share 25%)



Konrad Kuźma, MSc.Eng. – a senior lecturer at the Air Force Academy in Dęblin. He graduated from The Military Technical Academy on the course of mechatronics. He specializes in IT and the use of fuzzy expert systems in aircraft (military and civilian) in on-board systems which are responsible for the assessment of reliability and efficiency. (Share 25%)

Krystian Bujak, Eng. – student at the Air Force Academy in Dęblin on the course of the helicopter pilot. (Share 50%)

WYKORZYSTANIE LOGIKI ROZMYTEJ W CELU WYELIMINOWANIA BŁĘDU POMIARU WYSOKOŚCI LOTU ŚMIGŁOWCA W-3 „SOKÓŁ”

1. Wstęp

Wraz z rozwojem myśli konstruktorskich, człowiek coraz częściej próbuje wykluczyć czynnik ludzki jako myśl decyzyjną pracy maszyn. Współcześni konstruktorzy starają się budować maszyny, których praca będzie niezawodna w każdych warunkach. Takie założenia wymagają od urządzeń dopasowywania się do zmiennych warunków otoczenia. Poszukiwania owych rozwiązań pozwoliło na wydzielenie się kierunku badań, jakim jest logika rozmyta. Została ona zaproponowana w 1965 roku przez prof. Lotfi Zadeha i jest ściśle powiązana z jego teorią zbiorów rozmytych. Klasyczna logika opiera się na wartościach określonych w systemie zerojedynkowym, czyli krótko mówiąc albo coś jest prawdziwe albo fałszywe. Granica między prawdą a fałszem jest ściśle określona i niezmienna. Logika rozmyta natomiast jest namiastką rozumowania ludzkiego i wprowadza dodatkowe wartości między wyżej określonymi zbiorami. Takie rozwiązania pozwalają na bardziej precyzyjne oszacowanie danego problemu [1]. Logika rozmyta znalazła zastosowanie wszędzie tam, gdzie wykorzystanie klasycznej logiki uniemożliwia matematyczny zapis procesu. Okazała się bardzo przydatna w różnorodnych zastosowaniach inżynierskich [2,3,4,5,6].

Wraz z rozwijającą się technologią, śmigłowce wyposażane są w coraz bardziej złożone systemy awioniki i kontroli pracy. Takie urządzenia wykorzystują wiele sygnałów wejściowych, w celu uzyskania jak najlepszych rezultatów. Dzięki zastosowaniu elektronicznych systemów sterowania współczesne śmigłowce mają bardzo duży wachlarz możliwości, zarówno manewrowych jak i bojowych. W artykule przedstawione zostało studium przypadku projektowania systemów sterowania urządzeń, na przykładzie radiowysokościomierza będącego na wyposażeniu śmigłowca W-3 „Sokół”.

2. Problem badawczy

Śmigłowce wykonują operacje na niskich wysokościach, często manewrując między przeszkodami. Takie zadania wymagają dużego skupienia i zaangażowania ze strony pilota. Bardzo ważnym aspektem jest tutaj utrzymywanie odpowiedniej wysokości lotu, pozwalającej bezpiecznie przelecieć nad przeszkodami przy zachowaniu relatywnie niskiej wysokości lotu. Urządzeniem, które przychodzi z pomocą w takich manewrach jest radiowysokościomierz.

Zasada działania radiowysokościomierza opiera się na pomiarze czasu, pomiędzy wysłaniem wiązki fali radiowej z anteny nadawczej, a odbiorem tej samej fali przez antenę odbiorczą. Znając czas i prędkość rozchodzenia się fali, można określić drogę, jaką przebyła fala.

Niestety przyrząd ten jest obarczony pewnym błędem, który występuje w przypadku każdego innego położenia śmigłowca niż równoległe z linią horyzontu. Podczas wykonywania manewrów takich jak zakręt, odległość wskazywana przez radiowysokościomierz odbiega od rzeczywistej wysokości lotu. Im większe przechylenie śmigłowca, tym większym błędem obciążone są wskazania radiowysokościomierza. Dlatego też postanowiono zaprojektować sterownik oparty o logikę rozmytą, który pozwoli otrzymać podobne rezultaty pracy urządzenia, a przede wszystkim wyeliminuje błąd pomiaru wysokości wynikający z przechylenia śmigłowca.

3. Platforma badawcza

Na śmigłowcu W-3 „Sokół” zabudowane są dwa rodzaje radiowysokościomierzy: model A-037 oraz KRA 405. Ich podstawowym przeznaczeniem jest wskazywanie aktualnej wysokości lotu od ziemi. Ponadto radiowysokościomierze umożliwiają również:

- świetlną i dźwiękową sygnalizację obniżenia wysokości lotu śmigłowca poniżej ustalonej przez pilota wysokości niebezpiecznej;
- sygnalizację niewłaściwej pracy radiowysokościomierza.

W skład kompletu radiowysokościomierza KRA 405 wchodzi: blok nadawczo-odbiorczy, wskaźnik wysokości, antena nadawcza, antena odbiorcza oraz wyłącznik samoczynny [7]. Dane taktyczno-techniczne radiowysokościomierza przedstawione są w tabeli 1.

Tab. 1 Dane taktyczno-techniczne radiowysokościomierza KRA 405 [7].

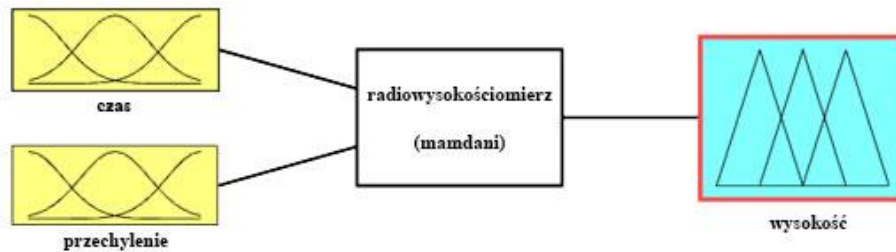
Zakres mierzonych i sygnalizowanych niebezpiecznych wysokości	0 – 2000 ft (0 – 609,6m) 1 ft (1 feet – 0,3048m)
Dokładność pomiaru wysokości rzeczywistej	Od 0 do 500 ft wynosi ± 5 ft (1,5m) lub $\pm 5\% H_{rz}$ dla $H > 500$ ft wynosi $\pm 7\% H_{rz}$
Dokładność sygnalizacji niebezpiecznej wysokości	± 5 ft (1,5m) lub $\pm 5\% H_{rz}$
Zakres częstotliwości nadawczych	4285 – 4315 MHz
Zasilanie	$= 27,5 \pm 20\% V$
Maksymalna wysokość pracy	55 000 stóp (16764 m)
Zakres temperatury pracy	od $-54^{\circ}C$, do $+71^{\circ}C$

4. Projekt sterownika

W realizowanym projekcie systemu sterowania rozmytego radiowysokościomierza, parametrami określającymi wysokość są czas rozchodzenia się fali oraz przechylenie śmigłowca. Ze względu na małe zmiany pochyleń śmigłowca w czasie lotu, parametr ten został pominięty. Maksymalne przechylenie wejściowe to 30° , ponieważ przy większej jego wartości radiowysokościomierz nie wykazuje odczytu.

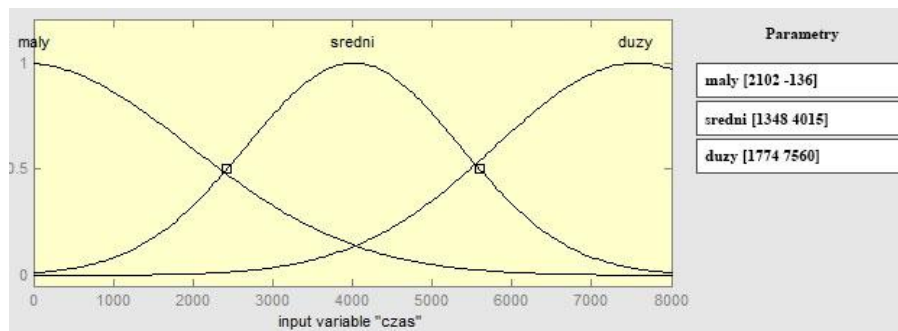
*The use of a fuzzy logic to eliminate an error in measuring the flight altitude...
Wykorzystanie logiki rozmytej w celu wyeliminowania błędu pomiaru wysokości...*

Głównym celem projektu jest wyeliminowanie błędu pomiaru wysokości przez radiowysokościomierz wywołanego przechyleniem śmigłowca. Graficzny układ sterownika, opracowanego w dodatku FuzzyLogic programu Matlab przedstawiony jest na rysunku 1.

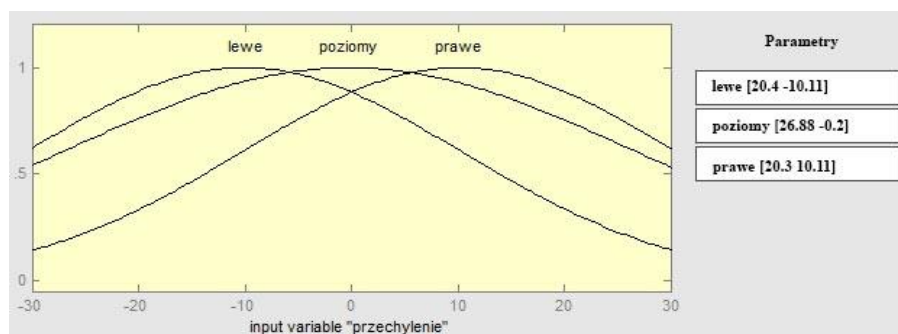


Rys. 1 Model sterownika rozmytego

Sygnale wejściowe sterownika zostały opisane trzema gaussowskimi funkcjami przynależności. Czas rozchodzenia się fali został określony w zakresie od 0 do 8000 μ s jako mały, średni i duży. Przechylenie śmigłowca wahało się od -30° dla przechylenia w lewo do 30° dla przechylenia w prawo i opisano je funkcjami przynależności: lewe, poziomy i prawe. Wygląd i parametry poszczególnych sygnałów wejściowych zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 2 i 3.

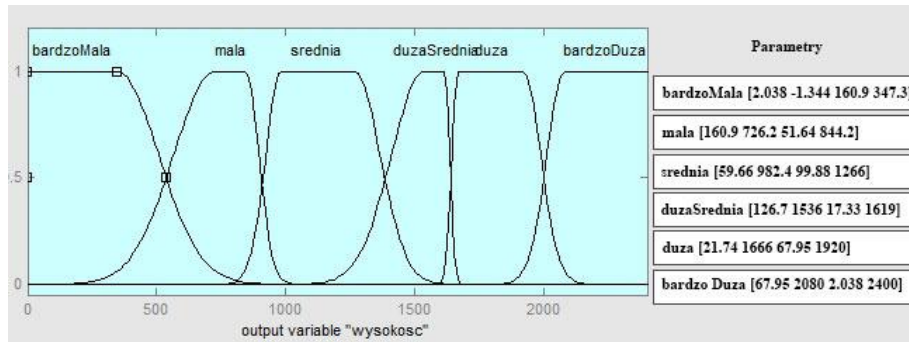


Rys. 2 Sygnał wejściowy „czas rozchodzenia się fali”



Rys. 3 Sygnał wejściowy „przechylenie śmigłowca”

Sygnal wyjściowy natomiast stanowiła wysokość ustalana w zakresie od 0 do 2400 ft (731,52 m). Zastosowano tu funkcje przynależności złożone z dwóch funkcji gaussowskich i wyznaczono je jako: bardzo mała, mała, średnia, duża średnia, duża i bardzo duża. Wygląd i parametry funkcji przynależności sygnału wyjściowego przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Sygnal wyjściowy „wysokość”

Po określeniu funkcji przynależności sygnałów wejściowych oraz sygnału wyjściowego wyznaczono reguły wnioskowania, których liczba wynika z zależności [8,9]:

$$r = z^w$$

gdzie:

- r – liczba reguł wnioskowania
- z – liczba zbiorów rozmytych układu
- w – liczba wejść

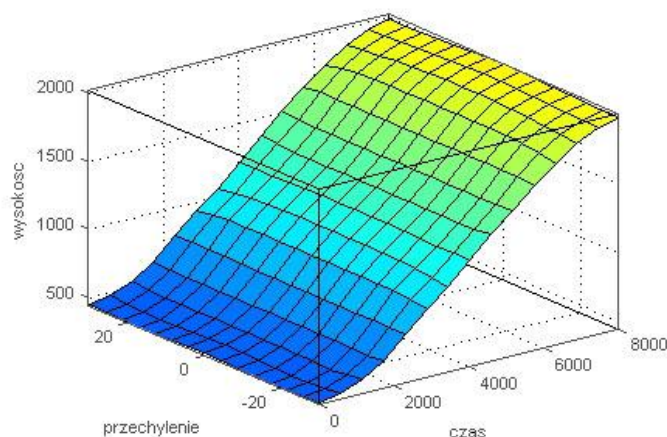
Dziewięć utworzonych reguł wnioskowania, dla każdej kombinacji parametrów wejściowych przypisuje odpowiednią odpowiedź układu. Baza reguł oparta jest na rzeczywistych doświadczeniach i wiedzy eksperckiej.

Badanie układu

Kolejnym krokiem w prezentowanym projekcie było testowanie pracy sterownika, które zostało podzielone na trzy fazy: analizę płaszczyzny sterowania, zastosowanie metody próbkowania oraz symulację działania sterownika w pakiecie Simulink.

- 1) Pierwszym etapem sprawdzenia poprawności pracy sterownika była analiza płaszczyzny sterowania, którą przedstawiono na rysunku 5. Kształt płaszczyzny jest zgodny z oczekiwaniami, wysokość nie zmienia się praktycznie dla każdego kąta przechylenia dla różnych wielkości czasu rozchodzenia się fali. Pojawiają się jednak uwypuklenia bądź zagłębienia, szczególnie przy większych kątach przechylenia, co może sugerować nieznaczne różnice w wyznaczonej wysokości.

*The use of a fuzzy logic to eliminate an error in measuring the flight altitude...
Wykorzystanie logiki rozmytej w celu wyeliminowania błędu pomiaru wysokości...*



Rys. 5 Zależność wysokości od czasu propagacji fali i przechylenia

- 2) Podczas drugiej fazy sprawdzania sterownika, w celu dokładnej analizy jego pracy, wybrano 21 próbek testowych dla 3 różnych czasów rozchodzenia się fali, przy których symulowano 7 różnych położenia śmigłowca w postaci lotu poziomego i przechyleń w lewo i prawo. Wyniki próbkowania przedstawiono w tabeli 2.

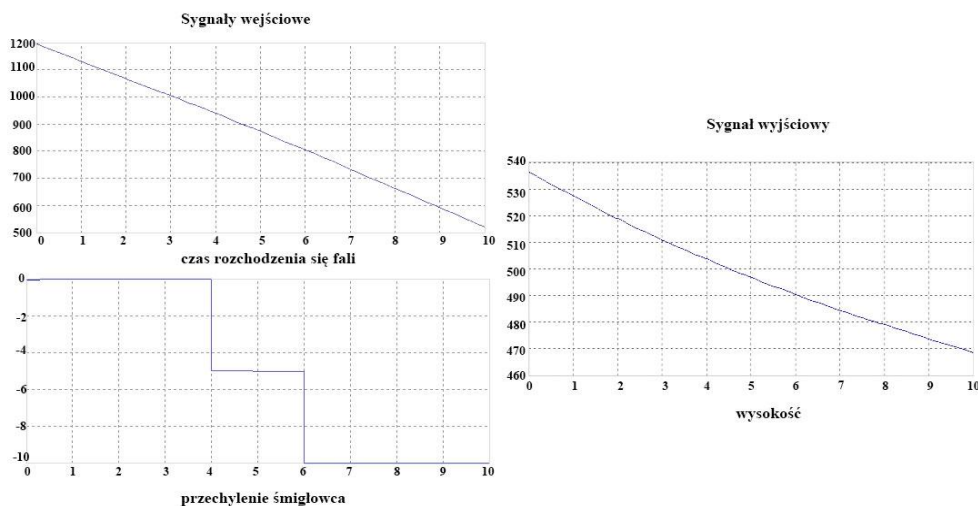
Tab. 2 Wyniki badania próbek testowych.

Lp	Sygnały wejściowe		Sygnały wyjściowe
	Czas	Przechylenie	Wysokość
1.	1000	0	510
2.	1000	-5	510
3.	1000	-15	510
4.	1000	-25	510
5.	1000	5	510
6.	1000	15	510
7.	1000	25	510
8.	5000	0	1460
9.	5000	-10	1460
10.	5000	-20	1460
11.	5000	-30	1480
12.	5000	10	1460
13.	5000	20	1460
14.	5000	30	1480
15.	7000	0	1950
16.	7000	5	1950
17.	7000	-5	1950
18.	7000	-15	1940
19.	7000	15	1940
20.	7000	-30	1920
21.	7000	30	1920

Analiza wyników próbkowania potwierdziła przypuszczenia dotyczące wskazań wysokości dla większych kątów przechylenia. Wysokość przy krótkim czasie rozchodzenia się fali jest niezmienna, natomiast przy dłuższych czasach wysokość zmienia się od momentu przekroczenia przechylenia śmigłowca powyżej 15° . Dodatkowo zauważyć można, że zmiana przechylenia z lewego na prawy, przy tej samej wartości kąta, nie powoduje zmiany wysokości.

- 3) Ostatnim etapem sprawdzenia działania sterownika była symulacja przeprowadzona w pakiecie Simulink. Dla lepszego zobrazowania zachowania sterownika przeprowadzono dwie symulacje, a ich przebieg odczytano na oscyloskopach.

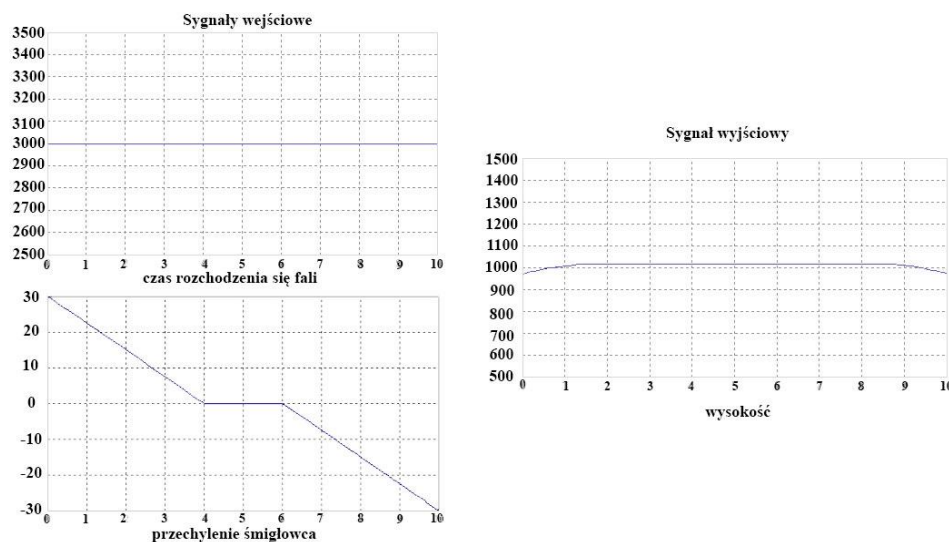
Podczas pierwszej symulacji przyjęto następujące założenia. Pierwszy sygnał wejściowy „czas” w ciągu 10 sekund symulacji zmniejsza swoją wartość od 1200 do 520. Śmigłowiec w początkowej fazie leci z zerowym kątem przechylenia, po czym przechyla się w lewo o 5° i po dwóch sekundach zwiększa przechylenie do 10° w lewo. Widok sygnałów wejściowych oraz przebieg symulacji pokazano na rysunku 6.



Rys. 6 Pierwsza symulacja

Wynik otrzymany w symulacji wskazuje na poprawną pracę sterownika. Wysokość zmniejsza się proporcjonalnie do zmniejszającego się czasu rozchodzenia fali przy jednoczesnym zachowaniu niemalże liniowości podczas zmiany przechylenia. Brak skoków wysokości przy zmianie przechylenia również potwierdza prawidłowe zachowanie sterownika.

W drugiej symulacji zbadano zachowanie sterownika podczas zmiany przechylenia przy niezmiennym czasie rozchodzenia fali. Parametr „czas” otrzymał stałą wartość $3000 \mu s$, natomiast parametr „przechylenie” rozpoczyna się od prawego przechylenia śmigłowca pod kątem 30° i liniowo przechodzi do lotu poziomego śmigłowca by następnie dalej liniowo przejść w lewe przechylenie o takiej samej wartości 30° . Przebieg symulacji zobrazowano na rysunku 7.



Rys. 7 Druga symulacja

Generowany sygnał wysokości w zakresie kątów przechylenia do 15° ma stałą wartość co potwierdza wyniki próbkowania. Od 15° przechylenia zarówno w lewo jak i w prawo wysokość nieznacznie się obniża, co może wskazywać, że sterownik wymaga jeszcze dostrojenia. Dobrym zjawiskiem jest natomiast symetryczny wygląd sygnału, bowiem kierunek przechylenia nie może zmieniać wartości wysokości.

5. Podsumowanie, Wnioski

Niezależnie od wartości przechylenia, dla krótkich czasów rozchodzenia się fali otrzymano identyczną wysokość lotu. Dla długich czasów wystąpiła różnica wysokości przy przechyleniu od 15° do 30° , jednak nie przekraczała ona 1,6 %, co w ocenie autorów jest dobrym wynikiem. Jednak aby można było myśleć o wdrożeniu sterownika do eksploatacji niewątpliwie należy jeszcze dokonać jego optymalizacji i dostrojenia.

Na podstawie otrzymanych wyników analizy pracy i symulacji, można przypuszczać, że zastosowanie sterownika rozmytego w układzie radiowysokościomierza mogłoby przyczynić się do wyeliminowania błędu pomiaru wysokości spowodowanego przechyleniem śmigłowca. Wydaje się to szczególnie ważne w aspekcie zadań wykonywanych przez śmigłowce na niskich wysokościach, bardzo często pomiędzy przeszkodami. Dokładniejsza wizualizacja wysokości na przyrządach z pewnością przyczyniłaby się do poprawy bezpieczeństwa wykonywanych zadań.

6. Literatura

- [1] Mulawka J.J.: Systemy ekspertowe, WNT, Warszawa 1996.
- [2] Anderson G.: Applying fuzzy logic in the real world. „Reprinted with permission of Sensor magazine, Helmers Publishing. Inc”, 1992.
- [3] Azadeh A. Ebrahimipour V. Bavar P.: A fuzzy inference system for pump failure diagnosis to improve maintenance process: The case of a petrochemical industry, „Expert Systems with Applications”, 2010, 37, 627-639.
- [4] Demirci S. Hajiyev Ch. Schwenke A.: Fuzzy logic-based automated engine health monitoring for commercial aircraft, „Aircraft Engineering and Aerospace Technology”, 2008, 80 Iss: 5, 516 – 525.
- [5] Chaudhari S. Patil M.: Study and Review of Fuzzy Inference Systems for Decision Making and Control, „American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics”, 2014, 2328-3491.
- [6] Mitkiewicz A.: Wykorzystanie sztucznej inteligencji w współczesnym lotnictwie, Dęblin, 2004.
- [7] Rypulak A.: Podstawy użytkowania śmigłowca W-3WA, wyposażenie radioelektroniczne, Dęblin, 2000.
- [8] Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte, Warszawa, 1997.
- [9] Grzesik N.: Podstawy sterowania rozmytego, Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Dęblin 2012.



dr hab. inż. Norbert Grzesik – profesor nadzwyczajny Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie, Dziekan Wydziału Lotnictwa. Ukończył Wojskową Akademię Techniczną, specjalność uzbrojenie lotnicze. Aktualne zainteresowania naukowe to zastosowanie rozmytych systemów eksperckich w samolotowych (wojskowych i cywilnych) pokładowych systemach oceny niezawodności i efektywności. (Udział 25%)



mgr inż. Konrad Kuźma – starszy wykładowca w Wyższej Szkole Oficerskiej Sił Powietrznych w Dęblinie. Ukończył Wojskową Akademię Techniczną na kierunku mechatronika. Jego specjalnością jest informatyka oraz zastosowanie rozmytych systemów eksperckich w samolotowych (wojskowych i cywilnych) pokładowych systemach oceny niezawodności i efektywności. (Udział 25%)

inż. Krystian Bujak – student piątego roku Wyższej Szkoły Oficerskiej Sił Powietrznych na kierunku pilotaż śmigłowców. (Udział 50%)

The use of a fuzzy logic to eliminate an error in measuring the flight altitude...
Wykorzystanie logiki rozmytej w celu wyeliminowania błędu pomiaru wysokości...