

WOJCIECH Z. CHMIELOWSKI, KINGA SORKOWSKA*

ZASTOSOWANIE SYSTEMU REGULATORA ROZMYTEGO W DOZOWANIU HELU, AZOTU I TLENU W RAMACH MIESZANKI „BESTMIX”

APPLICATION OF FUZZY REGULATOR TO DOSING OF HELIUM, NITROGEN AND OXYGEN IN THE MIX “BESTMIX”

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono model symulacyjny sterowania pracą regulatora rozmytego, którego celem jest właściwe dozowanie frakcji helu, azotu i tlenu w ramach mieszanki „bestmix”, której skład winien być uzależniony jest od głębokości nurkowania. Przedstawiono założenia dotyczące parametrów regulatora rozmytego i układu regulacji z jego zastosowaniem. Poprzez właściwe dozowanie frakcji gazów, główne zadanie regulacji sprowadza się do zapewnienia takich właściwości mieszanki „bestmix”, aby nurkowanie na dużych głębokościach było bezwzględnie bezpieczne.

Słowa kluczowe: logika rozmyta, regulatory rozmyte, sterowanie, inżynieria środowiska wodnego

Abstract

This paper presents a simulation model of controlling the operation of the fuzzy controller, whose objective is the appropriate dosage of the fraction of helium, nitrogen and oxygen within the mixture "bestmix", whose composition should depend on the depth of the dive. There are presented assumptions and parameters of fuzzy logic control system with its application. Through the appropriate dosage of the fraction of gases, the main task of regulation is reduced to ensure that such properties of compound "bestmix" to dive at great depths was absolutely safe.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy regulators, control, water environment engineering

* Dr hab. inż. Wojciech Z. Chmielowski, prof. PK, mgr Kinga Sorkowska, doktorantka, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

W nurkowaniu rekreacyjnym, czyli nurkowaniu do limitów bezdekompresyjnych i maksymalnej głębokości 30–40 m, najczęściej stosowanymi mieszankami, którymi oddychają nurkowie, są powietrze i nitroks.

Powietrze zawiera w przybliżeniu 21% tlenu i 79% azotu. Azot rozpuszczony pod wpływem ciśnienia w krwi i tkankach nurka limituje czas przebywania na danej głębokości, dlatego w zakresie głębszych rekreacyjnych nurkowań (ok. 30 m) popularna jest mieszanka zwana nitroks. Nitroks to mieszanina tlenu i azotu. W nurkowaniu rekreacyjnym stosuje się nitroksy zawierające od 21% do 40% tlenu, czyli posiadające w swym składzie mniej azotu niż powietrze, co pozwala na wydłużenie limitów bezdekompresyjnych.

Podczas nurkowania poza limity rekreacyjne powszechnie stosowane są mieszanki gazowe inne niż powietrze. Związane jest to z działaniem poszczególnych gazów pod wysokim ciśnieniem parcjalnym, a dobór mieszaniny uzależniony jest od głębokości nurkowania.

Zakładając, że na powierzchni panuje ciśnienie 1 atm (przyjmuje się takie ciśnienie dla nurkowania na głębokości 0–300 m p.p.m.) oraz że na każde 10 metrów głębokości ciśnienie wzrasta o kolejne 1 atm, to ciśnienie otoczenia P można przedstawić następującą zależnością (1):

$$P = \frac{Depth}{10} + 1 \quad (1)$$

gdzie:

$Depth$ – głębokość.

Ciśnienie parcjalne pp można zdefiniować jako iloczyn ciśnienia otoczenia i frakcji gazu, np. ciśnienie parcjalne tlenu ppO_2 będzie wynosiło:

$$ppO_2 = P \times fO_2 \quad (2)$$

gdzie:

fO_2 – frakcja tlenu w mieszance,

P – ciśnienie otoczenia.

Graniczną wartość ciśnienia parcjalnego tlenu przyjmuje się jako 1,4–1,6 atm, co ogranicza zastosowanie powietrza jako czynnika oddechowego do głębokości 56–66 m. Ponadto pod wysokim ciśnieniem parcjalnym (azot jak i tlen) mają właściwości narkotyczne, co powoduje ograniczenie zastosowania powietrza jeszcze bardziej, do około 30–40 m. Dlatego w nurkowaniu poniżej 50 metrów nie stosuje się powietrza, tylko precyzyjnie dobrane mieszaniny, by poszczególne ciśnienia parcjalne na głębokości operacyjnej pozostawały w założonych limitach. Taka najlepsza mieszanka dla danej głębokości jest określana nazwą „bestmix”.

„Bestmix” będzie zawierał tyle tlenu, by na głębokości operacyjnej jego ciśnienie parcjalne wynosiło założoną wartość, najczęściej 1,4–1,6 atm. Z uwagi na narkotyczność azotu i tlenu wprowadza się trzeci gaz – hel, w celu ograniczenia efektu narkotycznego. Ilość helu dobiera się tak, by dla głębokości operacyjnej nie przekroczyć założonej równoważnej głębokości narkotycznej END, przyjmowanej zwykle jako 30–40 m.

Definicja:

Równoważna głębokość narkotyczna END (*Equivalent Narcotic Depth*) dla danej mieszanki i głębokości to głębokość, na której na powietrzu byłby taki sam efekt narkotyczny.

W ujęciu matematycznym zależność na równoważną głębokość narkotyczną można przedstawić w następującej formie:

$$END = ((1 - f_{He}) \times (Depth + 10)) - 10 \quad (3)$$

gdzie :

f_{He} – frakcja helu w mieszance,

$depth$ – głębokość.

Precyzyjne ustalenie składu mieszanki „bestmix” w funkcji głębokości nurkowania jest zadaniem złożonym. Istnieje wiele rozwiązań technicznych, które w konsekwencji realizują zamierzony cel, to jest ustalają proporcje gazów w ramach mieszanki „bestmix” w funkcji głębokości. O ważności tego problemu świadczą fakty tworzenia z tego zakresu coraz to nowszych problemów badawczych przez czołowe firmy światowe zjednoczone w tej branży sportowo-rekreacyjnej.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie założeń i opisanie możliwości zastosowania logiki rozmytej w celu opracowania regulatora umożliwiającego właściwe ustalenie składu mieszanki gazów w funkcji głębokości nurkowania.

Regulator rozmyty (*Fuzzy Logic Controller*) oraz symulacyjny układ sterujący dozowaniem helu, azotu i tlenu, zrealizowano w środowisku Matlab z zastosowaniem modułu (*Fuzzy Logic Toolbox*).

Pierwszym krokiem do realizacji regulatora było zdefiniowanie reguł postępowania w formie rozmytych zadań warunkowych i ich określenie w tzw. FIS (*Fuzzy Interface System*) [1]. Do testowania zaprojektowanego regulatora rozmytego przyjęto środowisko *Fuzzy Logic Toolbox* programu narzędziowego MATLAB-SIMULINK [8]. Symulację sterowania składnikami mieszanki „bestmix” przeprowadzono w oparciu o dane syntetyczne, a dostrojenie parametrów regulatora dokonane zostało z wykorzystaniem AG (algorytmu genetycznego) [6]. Otrzymany w ten sposób układ sterowania można testować w aspekcie głębokości nurkowania do 100 m p.p.m.

Trzeba zwrócić uwagę, że obecnie stosowane rozwiązania dotyczą jedynie uzyskiwania mieszanki utrzymującej założone ciśnienie parcjalne tlenu dla danej głębokości.

2. Struktura regulatora rozmytego – FIS (*Fuzzy Interface System*)

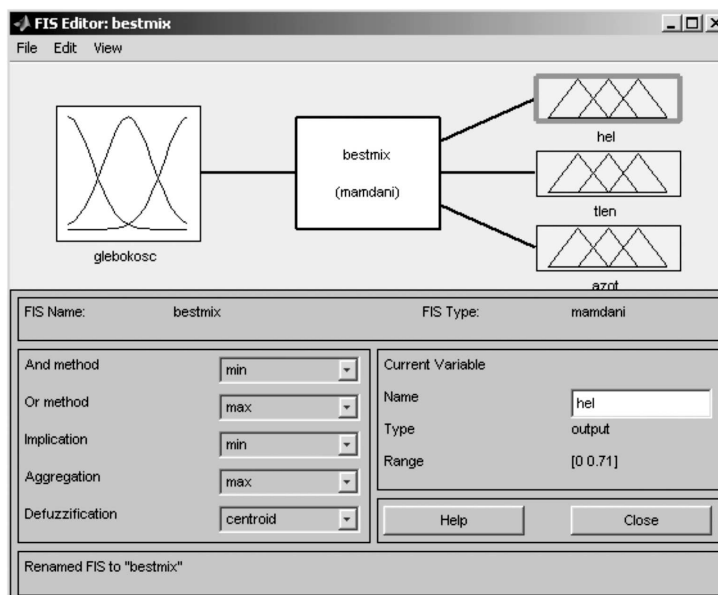
Do tworzenia systemu regulatora rozmytego wykorzystano dostępny w pakiecie MATLAB-SIMULINK (*Fuzzy Logic Toolbox*) interfejs graficzny (rys. 1), umożliwiający wprowadzenie zmiennych wejściowych oraz określenie zmiennych wyjściowych, jak również wybranie struktury regulatora rozmytego między strukturą Mamdaniego lub Takagi-Sugeno [4–6].

Wektor zmiennych wejściowych został zdefiniowany następująco:

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t)] \quad (4)$$

gdzie:

$x_1(t)$ – zmienna w czasie głębokość nurkowania m p.p.m.



Rys. 1. FIS. Edytor zmiennych wejściowych, bazy reguł i zmiennych wyjściowych
 Fig. 1. FIS (Fuzzy interface system). Editor of input variables, the base rules and output variables

Dla wektora $\mathbf{X}(t) = [x_1(t)]$ określono przestrzeń zmiennych wejściowych $\mathbf{U} = [u_1]$, $u_1 = [0; 100]$, [m]

Wektor zbiorów rozmytych T_{x_1} dla zmiennej wejściowej $x_1(t)$ (rys. 2) zdefiniowano jak niżej;

$$T_{x_1} = [t_{x_1,1} = 0; t_{x_1,2} = 10; t_{x_1,3} = 20; \bullet \bullet t_{x_1,10} = 90; t_{x_1,11} = 100] \quad (5)$$

Każdy ze zbiorów rozmytych to liczba rozmyta o podanym kształcie i parametrach. Odpowiedni edytor umożliwia wybranie kształtu, parametrów oraz umiejscowienie w przestrzeni.

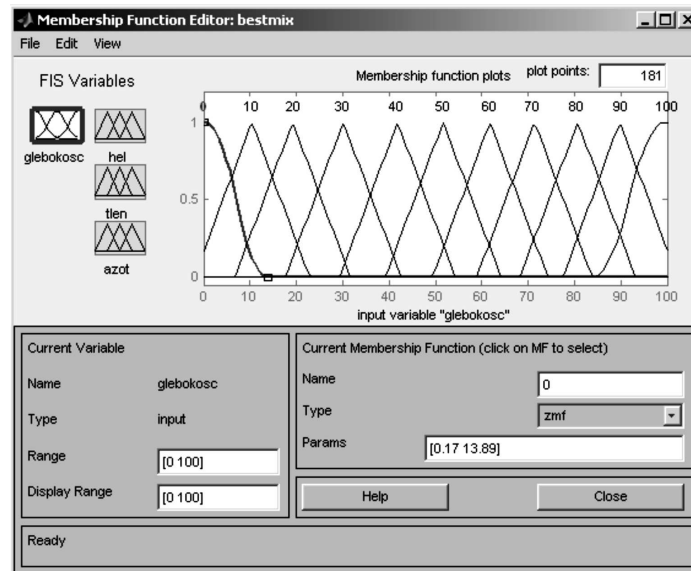
Wektor zmiennych wyjściowych, zilustrowany na rysunku 3, zdefiniowano w następujący sposób:

$$Y(t) = [y_1(x_1(t)); y_2(x_1(t)); y_3(x_1(t))]^T \quad (6)$$

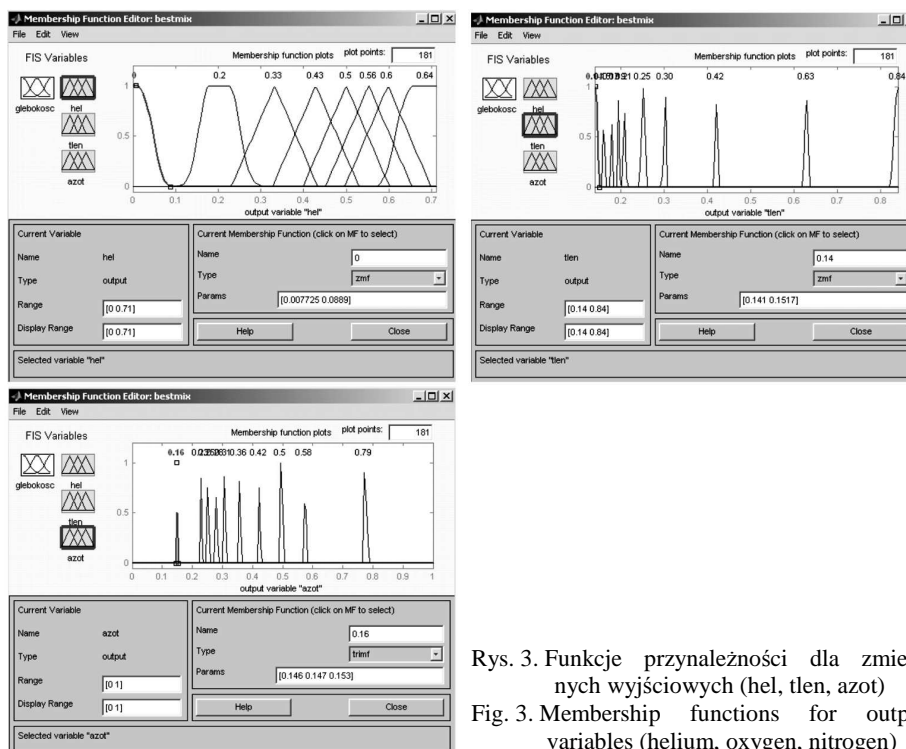
gdzie:

- $y_1(x_1(t))$ – udział frakcji helu w mieszance „bestmix” w funkcji głębokości [jednostka bezwymiarowa],
- $y_2(x_1(t))$ – udział frakcji tlenu w mieszance „bestmix” w funkcji głębokości [jednostka bezwymiarowa],
- $y_3(x_1(t))$ – udział frakcji azotu w mieszance „bestmix” w funkcji głębokości [jednostka bezwymiarowa].

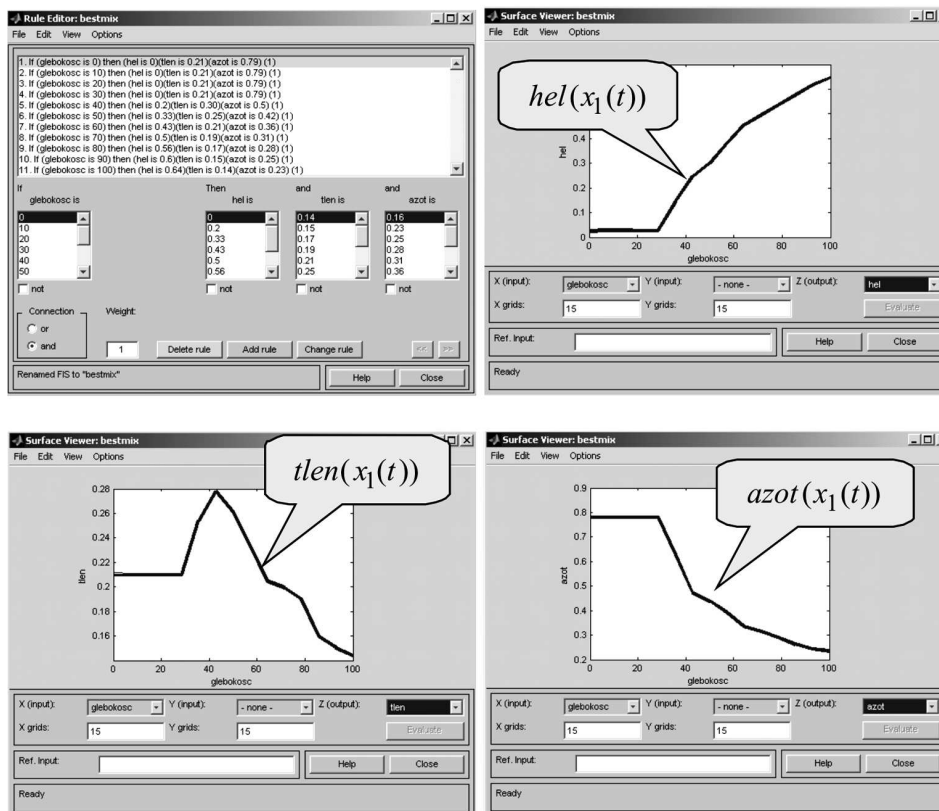
Baza reguł (rys. 4) zawiera jedenaście funkcji logicznych korelujących między zmienną wejściową $\mathbf{X}(t) = [x_1(t)]$ a zmiennymi wyjściowymi $Y(t)$ określonymi wzorem (6).



Rys. 2. Funkcje przynależności dla zmiennej $x_1(t)$ (głębokość nurkowania)
 Fig. 2. Membership functions for variable $x_1(t)$ (depth of diving)



Rys. 3. Funkcje przynależności dla zmiennych wyjściowych (hel, tien, azot)
 Fig. 3. Membership functions for output variables (helium, oxygen, nitrogen)



Rys. 4. Baza reguł dla rozpatrywanego regulatora, krzywe decyzyjne wynikająca z bazy reguł
Fig. 4. Base rules for the controller concerned, the curves resulting from the base of decision rules

Jest to z pewnością najtrudniejsza do zaprojektowania część regulatora rozmytego [3]. Regulator wnioskuje [1, 4, 5] na podstawie informacji zawartych w bazie reguł. Reguły są odzwierciedleniem znajomości sterowanego procesu [2, 9], wiedzy i doświadczenia osoby projektującej bazę reguł.

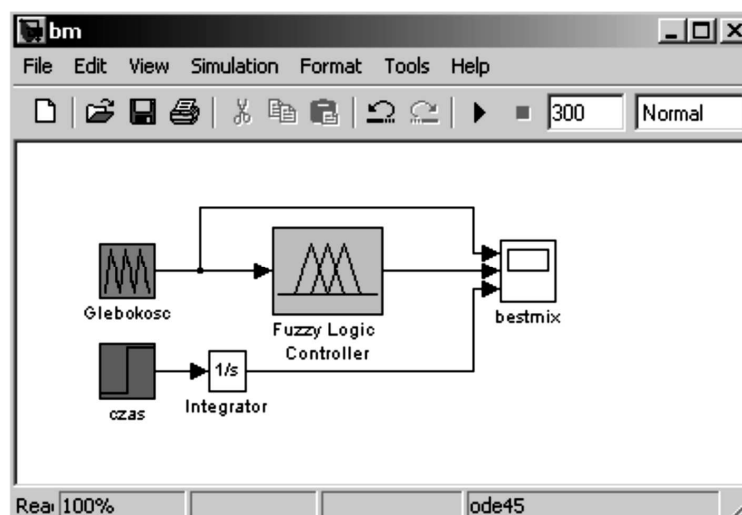
Niewłaściwe zestawienie bazy reguł wynikające z braku dostatecznej wiedzy [3] na temat sterowanego procesu prowadzi w konsekwencji do złego wnioskowania przez regulator, wynikiem czego wypracowane sygnały wyjściowe mogą odbiegać od oczekiwanych.

3. Układ sterowania mieszanką w funkcji głębokości nurkowania

Układ sterowania mieszanką w funkcji głębokości, zrealizowano w module MATLAB-SIMULINK (rys. 5).

Danymi wejściowymi do układu są: $x_1(t)$ głębokość nurkowania m p.p.mp.

Dane wyjściowe: skład mieszanki „bestmix” (hel, tlen, azot)



Rys. 5. Układ sterowania mieszanką z zastosowaniem regulatora rozmytego
Fig. 5. Mix control system using a fuzzy set

W trakcie symulacji zmieniano głębokość nurkowania, obserwując, jakie wartości komponentów składowych mieszanki „bestmix” (helu, tlenu, azotu) dozowane są do mieszanki.

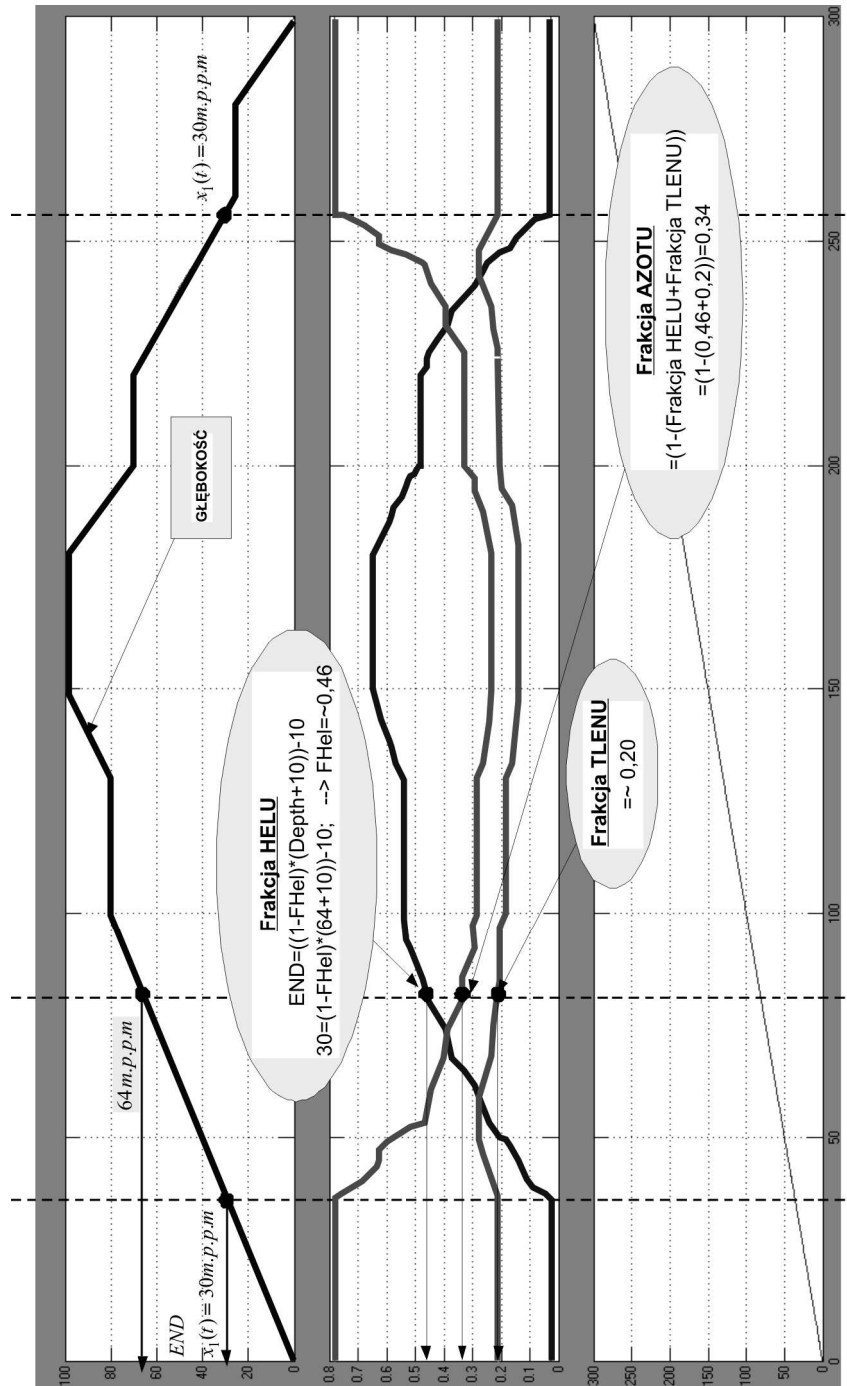
Uzyskane rezultaty działania regulatora są bardzo poprawne, a odpowiednie przebiegi przedstawiono na rysunku 6. W wyniku dozowania komponentów przebiegi zmian odpowiednich frakcji mieszanki (helu, azotu i tlenu) w funkcji głębokości nurkowania odpowiadają założeniom teoretycznym, które przedstawione zostały za pomocą zależności (1), (2) i (3). Mogą one stanowić wytyczne do procesu konstrukcji dla fizycznie realizowanego regulatora.

Przykładowo dla głębokości 64 m p.p.m. (rys. 6) uzyskuje się procentowe frakcje mieszanki ($\text{He} = 46\%$, $\text{O}_2 = 20\%$, $\text{N} = 34\%$), które są bardzo zbliżone do wartości wyliczonych według wzorów teoretycznych. Analogiczna sytuacja zachodzi w całym przedziale zmienności głębokości nurkowania, co skłania do stwierdzenia, że zastosowanie logiki rozmytej w zakresie projektowania regulatorów dozujących frakcje helu, azotu i tlenu w ramach mieszanki „bestmix” może być technicznie uzasadnione.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono operacje i przekształcenia konieczne przy formowaniu i projektowaniu systemu regulatora rozmytego dla zadanych funkcji i ich ograniczeń. W tym konkretnym przypadku jest to system regulatora sterującego dozowaniem komponentów (frakcjami helu, tlenu, azotu) do mieszanki „bestmix” używanej przez nurków w czasie nurkowania do głębokości 100 m p.p.m.

Standardowy zestaw nurkowy dla nurka rekreacyjnego oparty jest o oddychanie sprężonym powietrzem. Taki zestaw umożliwia bezpieczne nurkowanie w zakresie głębokości 30–40 m. W przypadku głębszych nurkowań należy uwzględnić działanie



Rys. 6. Przebiegi zmian głębokości i frakcji składników mieszanki „bestmix” w funkcji czasu nurkowania
 Fig. 6. The courses of change in depth and the fraction of the mixture components "bestmix" as a function of dive time

gazów pod wysokim ciśnieniem parcjalnym: efekt toksyczności tlenu i narkotyczności azotu, co niesie za sobą konieczność używania zmodyfikowanych mieszanek. Skład mieszanki musi być odpowiednio dobrany dla danej głębokości nurkowania, co przy głębszych nurkowaniach uniemożliwia zastosowanie jednego rodzaju gazu przez całe nurkowanie.

Rozwiązaniem stosowanym w nurkowaniu na obiektach otwartych jest wykorzystanie kilku gazów i ich zmiana podczas nurkowania. Powoduje to jednak, że gaz jest dobrany idealnie jedynie dla kilku głębokości nurkowania, co prowadzi do wydłużenia czasu dekompresji.

Dużo lepszym rozwiązaniem jest dostarczanie nurkowi idealnej mieszanki przez cały czas nurkowania. Umożliwia to skuteczniejszą dekompresję i ogranicza nasycanie azotem podczas zanurzania. Przedstawione rozwiązanie umożliwia również utrzymywanie END na zadanym poziomie, co powoduje tak pożądane przez nurków zmniejszenie ilości wykorzystywanego helu podczas nurkowania.

Analiza zaprezentowanego rozwiązania wskazuje, że może ono stanowić wytyczne do procesu konstrukcji fizycznie realizowalnego regulatora. Otrzymane w trakcie symulacji komputerowej wyniki są bardzo obiecujące, co świadczy o niezwykłej skuteczności działania układów deskryptycznego sterowania rozmytego [3, 9].

Literatura

- [1] Chmielowski W., Twaróg B., *Regulator rozmyty sterujący przejściem fali powodziowej przez zbiornik retencyjny*, Czasopismo Techniczne, 10-Ś/2006, Wydawnictwo PK, Kraków 2006.
- [2] Hajek M., *Optimization of fuzzy rules by using a genetic algorithm*, Proc. The Third International Conf. On Automation, Robotics and Computer Vision ICARV, 94, Singapor, vol. 4, 1994, 2111-2115.
- [3] Kacprzyk J., *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*, WNT, Warszawa 2001.
- [4] Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [5] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
- [6] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [7] Tobi T., Hanafusa T., *A practical application of fuzzy control for an air-conditioning system*, International Journal of Approximate Reasoning 1991, No 5, 331-348.
- [8] Osowski S., Cichocki A., Siwek K., *MATLAB w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- [9] Yager R.R., Filev D.P., *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995.