

Krzysztof Ficoń¹⁾

MODELOWANIE BEZPIECZNEJ PRĘDKOŚCI RMS „TITANIC” NA POLU LODOWYM ZA POMOCĄ WIELOPOZIOMOWEGO STEROWNIKA ROZMYTEGO MAMDANIEGO

MODELING SAFE SPEED FOR THE RMS ‘TITANIC’ IN AN ICE FIELD WITH THE MAMDANI MULTILEVEL FUZZY CONTROLLER

STRESZCZENIE W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania rozmytych sterowników Mamdaniego do modelowania bezpiecznej prędkości RMS „Titanic” w krytycznym momencie rejsu 14 kwietnia 1912 roku. Dla potrzeb dedykowanego sterownika *Logic Fuzzy Controller* (Titanic) zaprojektowano sytuacyjny model logiczny obrazujący uwarunkowania nawigacyjno-meteorologiczne i eksploatacyjno-organizacyjne panujące w tym rejonie w newralicznym momencie podróży. Dodatkowo w modelu uwzględniono psychologiczny czynnik presji i prestiżu rejsu, który nie pozostał bez wpływu na podejmowane decyzje. Wariantowe badanie bezpiecznej prędkości RMS „Titanic” przeprowadzono dla czterech hipotetycznych sytuacji decyzyjnych aplikowanych za pomocą eksperckich baz reguł logicznych.

Słowa kluczowe:

decyzje, fuzyfikacja, inferencja, logika, nawigacja, model, prędkość, ryzyko, statek, sterownik, „Titanic”, reguły, załoga, zbiory.

ABSTRACT This paper presents a concept of using the Mamdani fuzzy logic controller for modeling a safe speed for the RMS ‘Titanic’ at the critical moment of her voyage on 14 April, 1912. For the purposes of the *Fuzzy Logic Controller* (Titanic) a situation-focused logic model was designed. It displays navigation-meteorology and exploitation-organization related conditions in the area at the crucial moment of the voyage. In addition, a psychological factor of pressure and voyage prestige which affected the decisions made was taken into account in the model. Study of variants of safe speed for RMS ‘Titanic’ were made for four hypothetical decision situations using expert bases of logic rules.

Keywords:

decisions, fuzzyfication, inference, logic, navigation, model, speed, risk, ship, controller, ‘Titanic’, rules, crew, sets.

DOI: 10.5604/0860889X.1119435

¹⁾ Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Dowodzenia i Operacji Morskich, 81-103 Gdynia, ul. J. Śmidowicza 69; e-mail: krzysztof.ficon@wp.pl

WSTĘP

Bezpieczna żegluga morska od wieków była przedmiotem troski cywilizowanego świata, czego przejawem są między innymi takie standardy, jak międzynarodowe kodeksy morskie, międzynarodowe prawo drogi na morzu, rozmaite deklaracje i konwencje o znaczeniu międzynarodowym, a także tradycyjne zasady dobrej praktyki morskiej i wiele innych pisanych i niepisanych aktów oraz kodeksów. Przykładem międzynarodowych uregulowań prawnych jest międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu SOLAS (*International Convention for the Safety of Life at Sea*). Choć żegluga morska zaraz po lotnictwie należy do najbardziej bezpiecznej gałęzi transportowej [9], to spektakularne katastrofy oraz wielkie i mniejsze wypadki morskie są przyczyną wielu negatywnych emocji, postępowań sądowych, odwołań arbitrażowych, racjonalnych działań prewencyjnych i zaradczych, głównie techniczno-konstrukcyjnych, formalno-prawnych i organizacyjno-proceduralnych.

Wyjątkowe emocje i reakcje wywołują wielkie katastrofy i tragedie morskie, w których ludzie tracą zdrowie lub życie. Z tego powodu bezpieczeństwo światowej żeglugi pasażerskiej znajduje się pod szczególnym nadzorem społeczności międzynarodowej i jest przedmiotem wielu regulacji nie tylko formalno-prawnych. Chyba najbardziej spektakularną katastrofą morską z wielką, choć nie największą w historii, liczbą ofiar było zatonięcie 14 kwietnia 1912 roku na Północnym Atlantyku RMS „Titanic”,

INTRODUCTION

Safe marine navigation has for ages been a matter of concern for the civilized world. It has been manifested, by such standards as international maritime codes, Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, several declarations and conventions of international importance, traditional principles of good seafaring practice and many other written and non-written Acts and Codes. An example of international legal Acts is the International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). Although second to aviation seafaring is accepted as the safest means of transport. [9] Spectacular catastrophes cause many negative emotions, law suits, arbitration appeals, and rational preventive actions mainly of technological, legal, organizational, and procedural character.

Great marine disasters and tragedies in which people lose their health or lives, cause extremely strong emotions and reactions. This is the reason why safety in worldwide maritime passenger transport is under the special supervision of the international community and is the subject of several regulations, not only of legal character. Perhaps the most spectacular maritime disaster in history with a great, but not the greatest in history, loss of lives was the sinking of the RMS ‘Titanic’ in the Northern Atlantic on 14 April, 1912, the ship which was advertised as luxurious and unsinkable [1]. This myth contributed to the causes and the scale

statku reklamowanego jako luksusowy i niezatapialny [1]. Ten mit znacząco zaciążył na przyczynach oraz skali nieszczęścia, którego jednym ze źródeł była presja uciekającego czasu, prestiż dziewiczego rejsu oraz królewski przepych i luksus niektórych pokładów pasażerskich. Wiele jeszcze innych czynników krępowało racjonalność podejmowanych na mostku decyzji [8, 10], w tym autorytet kapitana, nowoczesność rozwiązań technicznych i tak modna na początku XX wieku pokusa otarcia się w pierwszym rejsie o kolejny rekord prędkości (Błękitną Wstęgę Atlantyku) w tej klasie.

Dla statku morskiego będącego w ruchu oprócz szeregu uwarunkowań techniczno-konstrukcyjnych i nawigacyjno-pogodowych zasadniczym wyznacznikiem bezpieczeństwa jest bezpieczna droga, czyli sposób prowadzenia nawigacji oraz rzeczywisty kurs i odpowiednia dla różnych warunków prędkość eksploatacyjna. Dla wielkiego RMS „Titanic” odcinek drogi na środku Oceanu Atlantyckiego wydawał się bardzo bezpieczny. Przed kolizją z innymi statkami zabezpieczały go odpowiednie przepisy, dobra praktyka morska doświadczonej załogi oraz profesjonalna wachta na wszystkich stanowiskach służbowych. Dla potrzeb budowanej aplikacji stwierdzenie to formalnie można zapisać jako:

$$Q = f(K, V, \Omega) \cong f(E), \text{ przy czym / while } E = mV^2/2, \quad (1)$$

gdzie:

where:

- Q — poziom bezpieczeństwa / safety level;
- K — kurs rzeczywisty statku / ship's real course;
- V — aktualna prędkość statku / ship's speed of the moment;
- E — energia kinetyczna statku / ship's kinetic energy;

of the disaster, whose sources were the pressure of fast passing time, maiden voyage prestige and royal ostentation and luxury on some passenger decks. Many other factors hampered rationality of decisions made on the bridge [8, 10], including captain's authority, state of the art technological solutions, and so fashionable, at the beginning of the 20th century, the temptation to break another world speed record (the Blue Ribbon) in this class.

For an oceangoing ship under way, apart from several technological and design-related, as well as navigation and weather conditions, the main safety determinant is a safe way, i.e. the way navigation is executed, combined with course and cruising speed appropriate for various conditions. For a huge ship like the RMS 'Titanic' the section of the route in the middle of the Atlantic Ocean seemed very safe. She was protected against a collision by appropriate regulations, good maritime practice of the experienced crew and professional watches on all duty stations. For the needs of the application being built this statement can formally be written as:

- m — masa statku (52310 ton) / weight of the ship (52310 tons);
- Ω — zbiór pozostałych uwarunkowań proceduralnych, technicznych, organizacyjnych itp. rzutuujący na bezpieczeństwo żeglugi /
a set of the other procedural, technological, organizational, etc. conditions having impact on safe navigation.

Spośród dwóch zasadniczych wymiernych parametrów ruchu statku: kursu (K) i prędkości (V) — interesować nas będzie tylko prędkość, jako że aktualnie obrany kurs (K) jest funkcją wielu czynników nawigacyjno-ekonomicznych, których dobór i analiza zaczyna się na etapie profesjonalnej edukacji przyszłych adeptów nawigacji. Natomiast prędkość statku V to chwilowy, zmienny parametr jego trajektorii, wynikający głównie z ustalonego planu podróży i aktualnie podejmowanych decyzji. Czynnikiem ten wydaje się najbardziej elastyczny, ale też najbardziej energetyczny, jeśli zastosujemy zwykłe prawa fizyczne o zamianie ogromnej masy ($m = 52310$ t) na energię kinetyczną (E) przy kwadratowej proporcjonalności do wektora prędkości (V). Stoczniowa gwarancja niezatapialności obejmowała w zasadzie tylko dwie grodzie kadłubowe, a zderzenie z górą lodową uszkodziło cztery takie grodzie, co musiało skutkować gwałtownym zatonięciem statku na lodowatych wodach Północnego Atlantyku.

Artykuł podejmuje próbę modelowania bezpiecznej prędkości RMS „Titanic” w konkretnych warunkach sytuacyjnych w nocy 14 kwietnia 1912 roku, wykorzystując do tego oryginalną metodę logiczno-analityczną z oferty sztucznej inteligencji [3] opartą na teorii zbiorów rozmytych L. Zadeha [21], a aplikowaną na gruncie tzw. sterowników rozmytych Mamadaniego [12].

Of the two basic rational parameters relating to ship's movement: course (C) and speed (V) — we will be interested only in speed, as the course of the moment (C) set is a function of several navigation-economic related factors, whose choice and analysis starts at the stage of professional training received by future professionals in navigation. Ship's speed (V), on the other hand, is an instantaneous variable parameter of her trajectory, arising mostly from a cruise plan and decisions made at each moment. This factor seems to be the most flexible but also the most energetic, if we employ common laws of physics relating to the change of a great mass ($m = 52310$ t) into kinetic energy (E) at the square proportional to the speed vector (V). The unsinkable guarantee given by the shipyard included, in fact, only two hull bulkheads, and in the collision with the ice-berg four bulkheads were damaged, which had to result in the fast sinking of the ship in the icy waters of the North Atlantic.

This article makes an attempt to model the safe speed for the RMS Titanic in the specific conditions on 14 April, 1912, using an original logical-analytical method taken from the artificial intelligence offer [3] based on L. Zadeh theory of fuzzy sets [21], and employed in the so-called Maharani fuzzy controllers [12]. The considerations are of theoretical and model character,

Rozważania mają charakter teoretyczny i modelowy, choć użyteczność rozmytych sterowników Mamdaniego jest dziś powszechna i zadziwiająca, nie tylko w preferowanej technice, ale także w innych dziedzinach badań operacyjnych i aplikacji naukowych [5].

Praca wskazuje na szerokie, nie do końca jeszcze odkryte pomimo upływu prawie pięćdziesięciu lat, możliwości zastosowań koncepcji zbiorów rozmytych L. Zadeha w różnych obszarach badań teoretycznych i aplikacjach praktycznych [19]. „Miękkie”, nieformalne modele bazujące na aparacie logiki rozmytej i algorytmach programowania lingwistycznego pozwalają na stosunkowo proste modelowanie nawet bardzo skomplikowanych zadań także praktycznych za pomocą bardzo bliskich ludzkiemu umysłowi konwencji logiczno-analitycznych, bazujących przede wszystkim na wiedzy zdroworozsądkowej i eksperckiej bazie reguł logicznych.

Dla zwięzłości wywodu skupimy się wyłącznie na modelowaniu bezpiecznej prędkości statku, przy założonych warunkach, pomijając dość rozbudowane elementy teorii zbiorów rozmytych L. Zadeha i szczegółowe mechanizmy funkcjonowania sterowników rozmytych Mamdaniego [11, 12, 18]. Obszerne wprowadzenie w podstawy teoretyczne i praktyczne aplikacje tych narzędzi badawczych zostało przedstawione w prezentowanej na łamach „Zeszytów Naukowych AMW” pracy [4]. W efekcie niniejszy artykuł stanowi próbę zastosowania teorii *Fuzzy* do modelowego rozwiązania problemu z zakresu bezpieczeństwa żeglugi morskiej.

although the use of Mamdani fuzzy controllers is today common and amazing, not only in a preferred technology but also in other operational investigations and scientific applications [5].

The work points to the wide possibilities, not yet fully discovered, despite the passage of almost fifty years, of using the L. Zadeh concepts of fuzzy sets in various areas of theoretical studies and practical applications [19]. ‘Soft’, informal models based on the fuzzy logic apparatus and linguistic programming algorithms makes it possible to model even very complicated tasks, including practical ones, using, , logical-analytical conventions, very similar to the human mind, based, first of all, on the commonsense knowledge and expert base of logic rules.

In order to keep our deliberations concise we will focus exclusively on modeling the ship’s safe speed for the assumed conditions, omitting fairly extensive elements of the L. Zadeh theory of fuzzy sets and detailed mechanisms of functioning of Mamdani fuzzy controllers [11, 12, 18]. A broad introduction to the theoretical fundamentals and practical applications of these scientific investigation tools is presented in an article in ‘Zeszyty Naukowe AMW’ [4]. As a result this article is an attempt to use the *Fuzzy* theory for a model solution to a problem relating to safety in marine navigation.

PODSTAWY DZIAŁANIA STEROWNIKÓW ROZMYTYCH

O praktycznej użyteczności teorii zbiorów rozmytych A. L. Zadeha (1965) w najwyższym stopniu zdecydowały tzw. rozmyte sterowniki Mamdaniego (1976), które zostały zaprojektowane jako produkt sztuki inżynierskiej dziesięć lat później [12, 21]. Formalnie sterownik rozmyty FLC (*Fuzzy Logic Controller*) jest modelem matematyczno-logicznym opisanym za pomocą zmiennych lingwistycznych oraz zbioru reguł eksperckich definiujących określone operacje na tych zmiennych. W sterownikach rozmytych FLC możemy wyróżnić trzy chronologicznie aktywowane bloki funkcjonalne [6, 11]: blok rozmywania (FLC(F), wnioskowania (FLC(I) i wyostrzania (FLC(D):

$$\text{FLC} = \langle \text{FLC(F)} | \mu \Rightarrow \text{FLC(I)} | \text{IF ... THEN} \Rightarrow \text{FLC(D)} | \mathcal{R}^+ \rangle, \quad (2)$$

gdzie:

- FLC(F) — blok rozmywania (fuzyfikacji) / a fuzzification block;
- FLC(I) — blok wnioskowania (inferencji) / an inference block;
- FLC(D) — blok wyostrzania (defuzyfikacji) / a defuzzification block;
- μ — funkcja przynależności elementu do zbioru rozmytego /
a function of membership of an element in a fuzzy set;
- IF...THEN — ekspercka baza reguł wnioskowania / expert base of rules for inference;
- \mathcal{R}^+ — zbiór liczb rzeczywistych / a set of real numbers.

Działanie sterownika FLC inicjuje blok fuzyfikacji (FLC(F)), na którego wejściu pojawia się pewien sygnał w postaci ostrej, np. jako liczba lingwistyczna (rzeczywista). Blok FLC(F) dokonuje transformacji danych wejściowych na formę zbiorów rozmytych w oparciu o zadehowską funkcję przynależności μ . Zgodnie z koncepcją zbiorów rozmytych

PERFORMANCE FUNDAMENTALS OF FUZZY CONTROLLERS

The practical usefulness of the L. Zadeh theory of fuzzy sets (1965) has been mostly based on the so called Mamdani fuzzy controllers (1976), which were designed as a product of engineering art ten years later [12, 21]. Formally a fuzzy logic controller (FLC) is a mathematical-logical model described by means of linguistic variables and a set of expert rules defining specific operations on these variables. In FLCs we can distinguish three chronologically activated functional blocks [6, 11]: a fuzzification block (FLC(F), an inference block (FLC(I) and a defuzzification (FLC(D):

where:

An FLC initiates a fuzzification block (FLC (F)), and at its input a signal appears in a defuzzified form, e.g. as a linguistic number (real). The FLC(F) block transforms the input data into a form of fuzzy sets using the Zadeh membership function μ . In accordance with the concept of fuzzy sets the defuzzified value of an input signal is

Fuzzy wartość ostra sygnału wejściowego podlega operacji rozmywania, w wyniku której wartość wejściowa zostaje odwzorowana w nieostry zbiór rozmyty. Proces rozmywania polega formalnie na wygenerowaniu wartości funkcji przynależności dla poszczególnych podzbiorów (term) zbioru rozmytego. Zadaniem bloku rozmywania (fuzyfikacji) jest przekształcenie ostrych danych wejściowych skojarzonych ze zmienną lingwistyczną na stopień przynależności (spełnienia) predykatów w poprzednikach reguł wiążących daną zmienną lingwistyczną.

subject to the fuzzification operation. As a result of this operation, the input value is mapped into a fuzzified fuzzy set. The fuzzification process formally involves generating a value of membership function for the particular subsets of a fuzzy set. The task of a fuzzification block is to transform defuzzified input data linked to a linguistic variable into a membership degree (fulfillment) of predicates in predecessors of rules binding a given linguistic variable.

$$\text{FLC}(F): X(Y) = \{XM \cup XS \cup XD \cup \dots\} = \{\mu_{X(XM)}, \mu_{X(XS)}, \mu_{X(XD)} \dots\}, \quad (3)$$

gdzie:

where:

XM, XS, XD — zbiory rozmyte (termy), np. „mały”, „średni”, „duży” / fuzzy sets, e.g. 'low', 'medium', 'big'.

Zasadniczą rolę w strukturze sterownika rozmytego FLC odgrywa blok wnioskowania logicznego, zwany blokiem inferencji (FLC(I)), który w oparciu o bazę reguł eksperckich na zasadzie określonych implikacji generuje pożądane konkluzje [6, 13, 14]. Na jego wejściu pojawia się rozmyta wartość zmiennej lingwistycznej w postaci odpowiednich funkcji przynależności, natomiast na wyjściu występuje zbiór rozmyty będący efektem wnioskowania. Wnioskowanie przeprowadza się na podstawie zestawu formuł eksperckich zawartych w bazie reguł. W niej przechowywana jest wiedza ekspercka dotycząca rozważanego problemu, zapisana w postaci klasycznych reguł wnioskowania, tj. mających przesłanki i konkluzje.

The basic role in the FLC structure is played by the block of logical inference (FLC (I)), which, using an expert base of rules generates desired conclusions [6, 13, 14]. At its input there appears a fuzzy linguistic variable value in the form of appropriate membership function, and at the output there is a fuzzy set being a result of inference. Inference is made using a set of expert formulas contained in the base of rules. The base is used to store expert knowledge relating to the considered problem, written in the form of classic inference rules, i.e. having premises and conclusions. The base of fuzzy logic rules constitutes the fundamental for an inference stage and the nature of FLC operation.

Baza reguł rozmytych stanowi podstawę etapu wnioskowania i istotę działania sterownika FLC. Jest zbudowana z instrukcji warunkowych, które powstają na podstawie realnej wiedzy eksperta.

Baza reguł zawiera reguły logiczne określające zależności przyczynowo-skutkowe istniejące w systemie pomiędzy zbiorami rozmytymi wejść i wyjść. Przesłanki obrazują przyczyny, natomiast konkluzje logiczne ich skutki i następstwa. Blok wnioskowania operuje na rozmytych zmiennych wejściowych, które zostały zamienione na stopnie spełnienia odpowiednich predykatów w przesłankach reguł logicznych. W bloku wnioskowania następuje uruchomienie każdej reguły, której przesłanki są spełnione celem wyznaczenia zbioru rozmytego będącego wynikiem jej działania. Do budowania bazy wiedzy wykorzystuje się ogólną notację wykonywania operacji logicznych, co pozwala na merytoryczne grupowanie przesłanek za pomocą spójników logicznych. Najczęściej stosowana jest klasyczna notacja języków programowania wysokiego poziomu, np. notacja języka ALGOL.

It is built of conditional instructions which are developed using the real knowledge of an expert.

The base of rules contains logic rules defining cause-effect dependences in a system between input and output fuzzy logic sets. Premises illustrate causes, while logical conclusions illustrate their effects and aftermaths. The inference block operates on input fuzzy logic variables which were transformed into degrees of fulfillment of appropriate predicates in premises of logic rules. In the inference block each rule, whose premises are fulfilled, is activated in order to determine a fuzzy logic set resulting from its operation. In order to build the knowledge base the general notation for performing logical operations is used, which makes it possible to group premises by means of logical conjunctions. Most often the classic notation of high level programming languages is used, e.g. notation of ALGOL language.

$$\text{FLC(I): IF (A=A1) AND (B=B2) OR (C=C3) ... THEN (D=DX), \quad (4)$$

gdzie:

where:

IF ... THEN ... — logiczne zdanie warunkowe / logical conditional sentence;
 AND, OR, NOT — logiczne spójniki zdaniowe / logical sentence conjunction;
 A, B, C, D — dowolne zmienne lingwistyczne / any linguistic variables;
 A1, B2, C3, DX — wartości logiczne zmiennych lingwistycznych /
 logical values of linguistic variables.

Ostatnim, stosunkowo żmudnym etapem pracy sterownika rozmytego FLC

The final, comparatively laborious stage of operation of an FLC is defuzzification,

jest wyostrzenie (defuzyfikacja), czyli zamiana zbiorów rozmytych na wielkości ostre (FLC(D)). Ponieważ wielkością wyjściową z bloku inferencji FLC(I) jest w ogólności N zbiorów rozmytych z wieloma funkcjami przynależności bądź jeden zbiór rozmyty z jedną funkcją przynależności, pojawia się problem odwzorowania tych zbiorów rozmytych w jedną ostrą wartość wyjściową będącą odpowiedzią sterownika rozmytego na wymuszenia wejściowe. Zadaniem bloku wyostrzania FLC(D) jest przetwarzanie wartości rozmytej na konkretne wartości liczbowe przekazywane jako wielkość wyjściowa (sterująca) ze sterownika. Odwzorowanie to nazywa się wyostrzeniem. Istnieje wiele metod wyostrzania wynikowego zbioru rozmytego na określoną wartość rzeczywistą stanowiącą wyjście sterownika FLC [2, 6, 14]. Do najbardziej popularnych należą metody: środka maksimum (MOM — *Middle of Max*), pierwszego maksimum (FOM — *First of Max*), ostatniego maksimum (LOM — *Latest of Max*), środka ciężkości (COA — *Center of Gravity*) i środka sum (BOA — *Bisector of Area*).

i.e. change of fuzzy logic sets into defuzzified magnitudes. As the initial magnitude in the inference block is, in generality, N sets of fuzzy logic sets with many membership functions or one fuzzy logic set with one membership function, there arises a problem of mapping these fuzzy logic sets in one defuzzified initial value being a response of the fuzzy logic controller to input enforcements. The task of the FLC(D) block is to transform a fuzzy logic value into specific numerical values transferred as an output magnitude (controlling) from the controller. This mapping is referred to as defuzzification. There exist many methods for defuzzification of a resultant fuzzy logic set into a specific real value being a FLC output [2, 6, 14]. The most commonplace are: First of Max (FOM), Middle of Max (MOM), Latest of Max (LOM), Center of Gravity (COA) and Bisector of Area (BOA).

$$\text{FLC(D): BR}\{\{G_1, G_2, \dots, G_N\} \times \text{MIN/MAX} \times \{F\} \rightarrow \mathfrak{R}^+, \quad (5)$$

gdzie:

where:

- BR — zbiór reguł aktywnych / a set of active rules;
 MIN/MAX — operator logiczny Mamdaniego / Mamdani logical operator;
 F — zbiór formuł ostrzenia zmiennych rozmytych /
 a set of formulas for defuzzification of fuzzy logic variables.

Należy zaznaczyć, że wykorzystanie zadehowskiej teorii zbiorów rozmytych *Fuzzy* aplikowanej w strukturze sterowników rozmytych FLC nie wymaga

It must be emphasized that applying the Zadeh theory of fuzzy logic sets in the structure of FLCs does not require any formal (mathematical) knowledge

formalnej (matematycznej) znajomości rozpatrywanych procesów czy obiektów fizycznych [2, 10]. Eliminuje potrzebę precyzyjnego modelowania matematycznego w oparciu o pewne prawa fizyczne, gdyż wystarczy jedynie sformułować zasady postępowania w formie logicznych reguł zdroworozsądkowych opisujących działanie tego systemu w konkretnych warunkach rzeczywistych. Aby zbudować zbiór reguł logicznych opisujących w języku predykatów logicznych proces podejmowania decyzji i jego konsekwencje wystarczy tzw. wiedza ekspercka i odpowiednio bogate doświadczenie w określonej dziedzinie. Za pomocą nieostrej logiki rozmytej budowany jest zestaw reguł logicznych charakteryzujących formalnie funkcjonowanie danego urządzenia czy systemu.

MODELOWANIE WARUNKÓW NAWIGACYJNO-EKSPLOATACYJNYCH PODRÓŻY RMS „TITANIC”

Podstawą funkcjonowania sterowników Mamdaniego [11] jest zawsze pewien model konceptualno-logiczny badanego procesu, uwzględniający zasadnicze jego parametry [6, 10]. W tym wypadku przyjmujemy aplikacyjne założenie, że szukana prędkość eksploatacyjna RMS „Titanic” (V) w krytycznym momencie rejsu 14 kwietnia 1912 roku była funkcją dwóch zmiennych opisujących hipotetyczne ryzyko [7]: ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne (R_{NM}) i ryzyko klasyfikacyjno-kwalifikacyjne (R_{KK}), a także pewnego parametru (Q_{PP}) określającego presję i prestiż tej dziewiczej podróży [1], co formalnie zapiszemy jako:

of the processes considered or of physical objects [2, 10]. It eliminates the need for precision mathematical modeling based on laws of physics, as it is enough to formulate rules of conduct in the form commonsense logical rules describing performance of a system in specific real conditions. To build a set of logical rules describing, in the language of logical predicates, the decision-making process, and its consequences. The so-called expert knowledge and appropriately rich experience in a specific field is sufficient. Using the fuzzified fuzzy logic, a set of logic rules is built which formally characterize the performance of a device or a system.

MODELING NAVIGATIONAL- OPERATIONAL CONDITIONS OF THE RMS ‘TITANIC’ VOYAGE

The basis for performance of Mamdani controllers [11] is always a certain conceptual-logical model of an investigated process, taking into account its basic parameters [6, 10]. In this case we make an assumption based on the looked-for operational speed of the RMS Titanic (V) at the critical moment of the voyage on 14 April, 1912 which was a function of two variables describing the hypothetical risk [7]: a navigation-meteorology related risk (R_{NM}) and classification-qualification-related risk (R_{KK}), as well as a certain parameter (Q_{PP}) determining the pressure and prestige of this maiden voyage [1], which we formally write as:

$$V = F(R_{NM}, R_{KK}, Q_{PP}), \quad (6)$$

gdzie:

where:

- R_{NM} — ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne charakteryzujące aktualne warunki podróży w krytycznym momencie rejsu /
a navigation-meteorology related risk characteristic of voyage conditions at the time at its critical moment;
- R_{KK} — ryzyko klasyfikacyjno-kwalifikacyjne dotyczące sprawności techniczno-eksploatacyjnej statku i poziomu wykszolenia oraz przestrzegania zasad dobrej praktyki morskiej /
a classification-qualification related risk regarding technical and operating efficiency of the ship, the level of crew qualifications and observance of good maritime practice rules;
- Q_{PP} — presja czasowa i prestiż rejsu wynikający z dużego rozgłosu medialnego oraz ambicji i działań marketingowych armatora /
time pressure and voyage prestige being a result of media coverage as well as ambitions and marketing activities of the ship-owner.

Wszystkie argumenty wyrażenia (6) są niejawnymi funkcjami szczegółowych zmiennych opisujących argumenty, z których każdy jest złożoną funkcją wielu zmiennych i stałych [10, 15]. Jej postać jest niezmiernie trudna do analitycznego określenia, a w przypadku operowania aparatem zbiorów rozmytych *Fuzzy* posługującym się zmiennymi lingwistycznymi zupełnie niepotrzebna.

All these arguments of the expression (6) are implicit functions of detailed variables describing arguments, each of which is a complex function of many variables and constancies [10, 15]. Its form is extremely difficult to determine analytically, and in the case of operating an apparatus of fuzzy sets which uses linguistic variables it is totally unnecessary.

Ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne podróży (R_{NM}) jest modelowane za pomocą następujących zmiennych wejściowych:

The navigation-meteorology related risk of the voyage is modeled with the following input variables:

$$R_{NM} = F(A, B), \quad (7)$$

gdzie:

where:

- A — warunki nawigacyjne / navigation conditions;
B — warunki meteorologiczne / meteorological conditions.

W ogólności warunki nawigacyjne (A) są złożoną funkcją na przykład takich zmiennych, jak ruch statków, przeszkody nawodne, przeszkody podwodne, widzialność, ostrzeżenia nawigacyjne. Warunki meteorologiczne (B) są natomiast złożoną funkcją na przykład takich zmiennych, jak pora roku, dnia, nocy, opady i zamglenia, temperatura powietrza, wody, kierunek, siła wiatru, stan morza, prognoza pogody. Z kolei ryzyko klasyfikacyjno-kwalifikacyjne statku (R_{KK}) jest modelowane za pomocą następujących zmiennych wejściowych:

The navigation conditions (A), in general, are a complex function of, for example such variables as ship's movement, surface obstacles, underwater obstacles, visibility, and navigation warnings. The meteorological conditions (B) are a complex function of, for example, such variables as season of year, time of day, time of night, rain or snow falls, and fog, as well as air temperature, water temperature, wind direction and force, sea state, and weather forecast. The classification-qualification related risk for the ship (R_{KK}) is modeled with the following input variables:

$$R_{KK} = F(C, D), \quad (8)$$

gdzie:

where:

- C — wymagania klasyfikacyjne (sprawność techniczno-eksploatacyjna statku) / classification requirements (technical and operating condition of the ship);
 D — wymagania kwalifikacyjne (wyszkolenia załogi i przestrzeganie zasad dobrej praktyki morskiej) / qualification requirements (level of crew qualifications and observance of good maritime practice rules).

Wymagania klasyfikacyjne (C) są złożoną funkcją na przykład takich zmiennych, jak wyposażenie nawigacyjne, systemy łączności, dzielność morska, klasa lodowa statku, sprawność techniczna. Wymagania kwalifikacyjne (D) są natomiast złożoną funkcją na przykład takich zmiennych, jak przepisy antykolizyjne, zasady dobrej praktyki, kwalifikacje załogi, doświadczenie kapitana, dyscyplina i profesjonalizm załogi.

The classification requirements (C) are a complex function of, for example, such variables as navigational equipment, communications systems, sea worthiness, ice class of ship, and the technical condition of the ship. The qualification requirements (D) are a complex function of, for example, such variables as collision avoidance regulations, good practice rules, crew qualifications, captain's experience, discipline and professionalism of the crew.

Do wielokryterialnego szacowania bezpiecznej prędkości chwilowej statku RMS „Titanic” w krytycznym momencie zderzenia z górą lodową wykorzystamy

For the multi-criterion evaluation of the safe instantaneous speed of the RMS Titanic at the critical moment of

aparat formalny teorii zbiorów rozmytych i logiki rozmytej [6, 14, 16] pozwalający na ominięcie „narzędziowej rafy” wynikającej z konieczności matematycznego modelowania formuł (6)–(8). Biorąc pod uwagę sekwencję wyrażeń (6)–(8), model wyznaczania bezpiecznej prędkości (V) RMS „Titanic” możemy formalnie zapisać w postaci dwupoziomowego szeregowo-równoległego sterownika rozmytego Mamdaniego za pomocą wyrażenia (9), którego graficzną interpretację przedstawia rysunek 1.:

$$\left. \begin{array}{l} A\{A_i\} \\ B\{B_i\} \end{array} \right\} R(A, B) \\ \left. \begin{array}{l} C\{C_i\} \\ D\{D_i\} \end{array} \right\} R(C, D) \\ \left. \begin{array}{l} Q\{Ps, Pt\} \\ R(A, B) \\ R(C, D) \end{array} \right\} V. \quad (9)$$

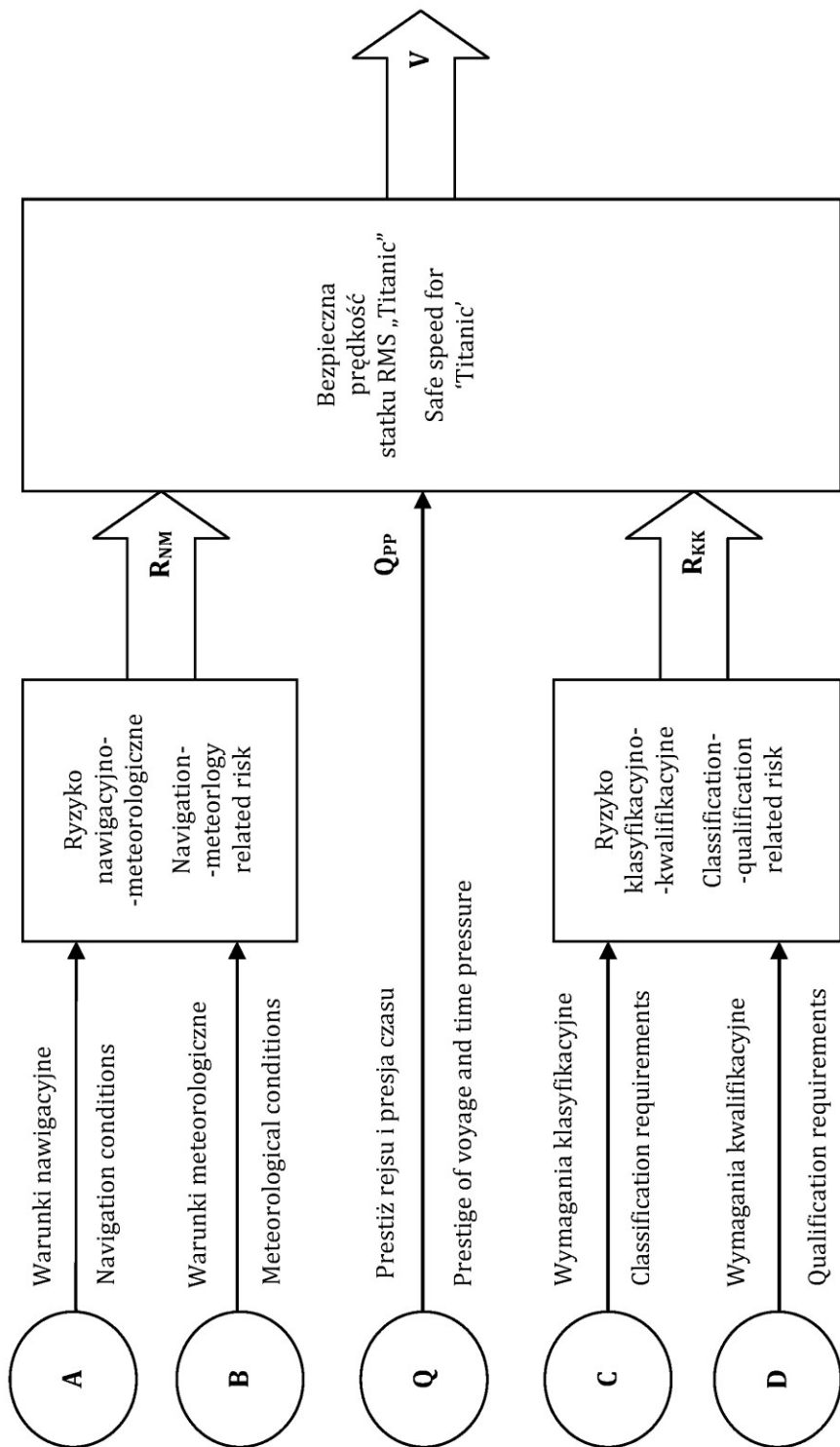
Jak wynika ze wzoru (9), proces wyznaczania bezpiecznej prędkości statku RMS „Titanic” za pomocą dedykowanego sterownika FLC(Titanic) został zdekomponowany na trzy oddzielne etapy dotyczące konstrukcji trzech standardowych sterowników Mamdaniego. Są to klasyczne sterowniki z dwoma lub trzema wejściami sygnałowymi i jednym wyjściem sterującym, będącym poszukiwanym ostrym parametrem rozmytym [6, 14].

Celem wyznaczenia szukanej prędkości bezpiecznej V wykorzystany zostanie tzw. model Mamdaniego posługujący się rozmytymi zmiennymi lingwistycznymi, logicznymi zdaniem warunkowymi i ekspercką bazą reguł wnioskowania. Dla eksperta-człowieka najbardziej naturalnym sposobem wyrażania wielkości logicznych jest użycie jakościowych określeń języka naturalnego typu: „mały”, „średni”, „duży” albo „niski”, „średni”, „wysoki” itp.

hitting the iceberg we will use a formal apparatus of the theory of fuzzy sets and of fuzzy logic [6, 14, 16] making it possible to avoid a ‘tool reef’ resulted from the necessity of modeling formulas (6)–(8). Taking into account the sequence of expressions (6)–(8), we can formally write a model for determining safe speed (V) for the RMS ‘Titanic’ in the form of the Mamdani two-layer series-parallel fuzzy controller with expression (9), whose graphic representation is shown in figure 1:

As it follows from the formula (9), the process for determining a safe speed for the RMS Titanic by means of a dedicated FLC (Titanic) was divided into three different stages relating to designing three standard Mamdani controllers. These are typical controllers with two or three signal inputs and one control output, being the defuzzified fuzzy parameter looked for [6, 14].

In order to determine the safe speed V looked for the so-called Mamdani model, which makes use of fuzzy logic linguistic variables, logical conditional sentences and the expert base of inference rules, will be employed. The most natural way of expressing logical magnitudes for a human-expert is to use natural language qualitative notions such as ‘small’, ‘medium’ or ‘low’, ‘medium’, ‘high’, etc.



Rys. 1. Schemat wielopoziomowego sterownika rozmytego FLC(Titanic)
 Fig. 1. A diagram of a multilevel FLC(Titanic)

Wszystkie wielkości wejściowe i parametry modelu będziemy rozpatrywać w kategoriach jakościowych zmiennych lingwistycznych. Przykładowo zmiennymi lingwistycznymi w badanym modelu będą: warunki nawigacyjne (A), warunki meteorologiczne (B), wymagania klasyfikacyjne (C), wymagania kwalifikacyjne (D) czy poziom presji/prestiżu (Q), z których każdy ma swoją dziedzinę reprezentowaną na przykład przez umowne wartości odpowiedniej funkcji przynależności. Dla uproszczenia rozważań przyjmujemy, że wszystkie zmienne lingwistyczne występujące w modelu będą wyrażone w ogólności, na przykład za pomocą jakościowych kategorii odpowiadających nieostrym rozmytym podzbiорom standardowym, typu: „mały”, „średni”, „duży”. W teorii *Fuzzy* podzbiory te nazywają się termami i obrazują strukturę logiczną danego zbioru rozmytego [14, 16]. Poszczególnym wartościom lingwistycznym zostaną przypisane ponadto określone merytoryczne przedziały liczbowe, które obrazują umowną fizyczną skalę zmienności tych wielkości (tabela 1. i 5.).

WYZNACZANIE WARTOŚCI RYZYKA R_{NM}

Zgodnie z założeniami modelu ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne (R_{NM}) zostanie wyznaczone na podstawie dwóch zmiennych wejściowych — warunków nawigacyjnych (A) i warunków meteorologicznych (B). Zmienne (A) i (B) mogą przyjmować wartości lingwistyczne jak w tabeli 1., a dodatkowo zostały wyskalowane w postaci liczb naturalnych z umownego przedziału zmienności. Ponadto w tabeli 1. przedstawiono

We will consider all the input magnitudes and model parameters in terms of qualitative linguistic variables. For example linguistic variables in the investigated model will be: navigation conditions (A), meteorological conditions (B), classification requirements (C), qualification requirements (D) or level of pressure/prestige (Q), each of which has their field represented by e.g. conventional values of the corresponding membership function. For the purpose of simplification we will assume that all linguistic variables occurring in the model will be expressed, in general, e.g. using qualitative categories corresponding to fuzzified fuzzy logic standard sub-sets such as: ‘low’, ‘medium’, ‘big’. In the *Fuzzy* theory these sub-sets are referred to as terms and they illustrate the logical structure of a fuzzy logic set [14, 16]. Additionally, the particular linguistic values will be assigned specific numerical intervals, which will illustrate the conventional physical variability scale of these magnitudes (tables 1 and 5).

DETERMINING RISK VALUES R_{NM}

Following the model assumptions the navigation-meteorology related risk (R_{NM}) will be calculated using two input variables – of the navigation conditions (A) and of the meteorological conditions (B). Variables (A) and (B) can take linguistic values as in table 1, and additionally they were scaled in the form of natural numbers from the conventional variability interval. In addition, the table shows a linguistic description of the resultant fuzzy logic set R_{NM} — the navigation-meteorology

opis lingwistyczny wynikowego zbioru rozmytego R_{NM} — ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne z odpowiednimi terminami i zakresem ich zmienności.

related risk with appropriate terms and their variability ranges.

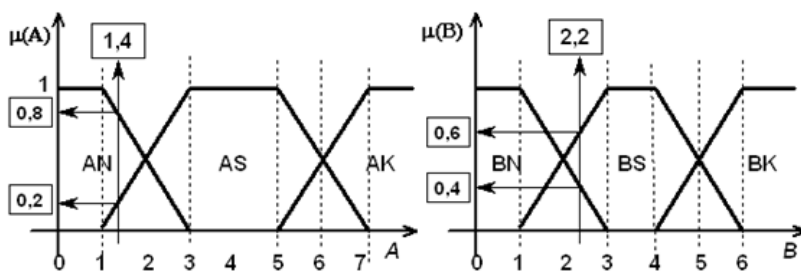
Tabela 1. Wartości lingwistyczne i terminy argumentów wejściowych A, B oraz zbioru wyjściowego R_{NM}

Table 1. The linguistic values and terms of input arguments A, B, and of the initial set R_{NM}

Warunki nawigacyjne (A) Navigation conditions (A) (0–10)	Niekorzystne Unfavorable $AN \leq 3$	Średnie Medium $1 \leq AS \leq 7$	Korzystne Favorable $AK \geq 5$
Warunki meteorologiczne (B) Meteorological conditions (B) (0–10)	Niekorzystne Unfavorable $BN \leq 3$	Średnie Medium $1 \leq BS \leq 6$	Korzystne Favorable $BK \geq 4$
Ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne Navigation-meteorology related risk (0–100%)	Małe Low $RXM \leq 40$	Średnie Medium $20 \leq RXS \leq 80$	Duże Big $RXD \geq 60$

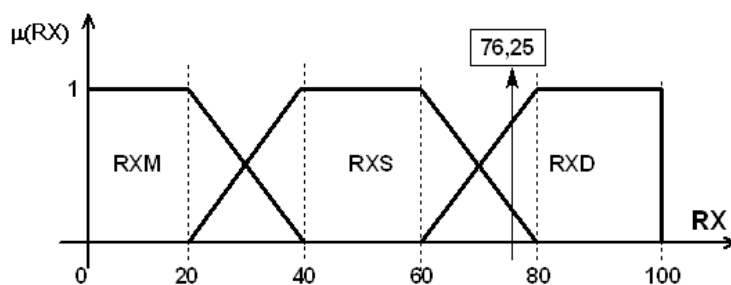
Graficzne zobrazowanie zbiorów rozmytych A, B i R_{NM} wraz z przykładowymi wartościami funkcji przynależności $\mu(A)$, $\mu(B)$ i $\mu(R_{NM})$ przedstawiono na rysunkach 2. i 3.

The graphic representation of the fuzzy logic sets A, B i R_{NM} together with examples of membership function values $\mu(A)$, $\mu(B)$ i $\mu(R_{NM})$ is shown in figures 2 and 3.



Rys. 2. Schemat operacji rozmywania zmiennych wejściowych A = 1,4 i B = 2,2

Fig. 2. A diagram of an operation of fuzzifying input variables A = 1,4 i B = 2,2



Rys. 3. Struktura zbioru rozmytego R_{NM} — ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne

Fig. 3. The structure of the fuzzy logic set R_{NM} — navigation-meteorology related risk

W celu wykorzystania zaprojektowanych zbiorów rozmytych w praktyce zakładamy, że według opinii eksperta zmienne lingwistyczne A i B przyjmują aktualnie następujące wartości lingwistyczne:

- warunki nawigacyjne — „niekorzystne” ($A = 1,4$);
- warunki meteorologiczne — „niekorzystne” ($B = 2,2$).

Aby wyznaczyć stopnie przynależności tych wartości do odpowiednich zbiorów rozmytych AN, AS, AK oraz BN, BS, BK, należy skorzystać z analitycznej postaci właściwej funkcji przynależności — w tym przypadku będziemy posługiwać się popularną funkcją trapezową [6, 14].

Przyjętym wartościom ostrym zmiennej lingwistycznej $A = 1,4$ i $B = 2,2$ odpowiadają stopnie przynależności podane w tabeli 2.

Tabela 2. Stopnie przynależności przykładowych wartości ostrych do zbiorów rozmytych A i B
Table 2. Membership degrees of examples of defuzzified values in fuzzy sets A and B

Zbiór rozmyty Fuzzy set	Stopnie przynależności Membership degrees		
A — warunki nawigacyjne A — navigation conditions	$\mu_{AN}(1,4) = 0,8$	$\mu_{AS}(1,4) = 0,2$	$\mu_{AK}(1,4) = 0$
B — warunki meteorologiczne B — meteorological conditions	$\mu_{BN}(2,2) = 0,4$	$\mu_{BS}(2,2) = 0,6$	$\mu_{BK}(2,2) = 0$

Wartość „warunki nawigacyjne” $A = 1,4$ odpowiada przynależności w stopniu 0,8 do zbioru rozmytego AN — „niekorzystne” oraz w stopniu 0,2 do zbioru rozmytego AS — „średnie”, natomiast wartość „warunki meteorologiczne” $B = 2,2$ odpowiada przynależności w stopniu 0,4 do zbioru BN — „niekorzystne” oraz w stopniu 0,6 do zbioru BS — „średnie”.

In order to make use of the designed fuzzy logic sets in practice, we assume that in an expert’s opinion the linguistic variable A and B take at the moment the following linguistic values:

- navigation conditions — ‘unfavorable’ ($A = 1.4$);
- meteorological conditions — ‘unfavorable’ ($B = 2.2$).

In order to determine the membership degrees of these values in the adequate fuzzy logic sets AN, AS, AK and BN, BS, BK, an analytical form of the proper membership function must be used — in this case we will use the popular trapezoidal function [6, 14].

The membership degrees presented in table 2 correspond to the adopted fuzzyfied values of the linguistic variable $A = 1.4$ and $B = 2.2$.

The value ‘navigation conditions’ $A = 1.4$ corresponds, in the degree 0.8, to the membership AN — ‘unfavorable’ and in the degree 0.2, to the fuzzy set AS — ‘medium’, while the value ‘meteorological conditions’ $B = 2.2$ corresponds, in the degree 0.4, to the set BN — ‘unfavorable’ and in the degree 0.6 to the set BS — ‘medium’.

Do oceny ryzyka nawigacyjno-meteorologicznego ($R_{NM} = RX$) wykorzystamy schemat wnioskowania oparty na regułach określonych przez eksperta, którego wiedza merytoryczna została implementowana, na przykład w postaci zestawu reguł logicznych opartych na modelu Mamdani [12]. W przypadku najbardziej popularnego systemu rozmytego zawierającego dwa wejścia i jedno wyjście dobór reguł wnioskowania można wstępnie zaplanować za pomocą dwuwymiarowej macierzy decyzyjnej (tabela 3.), której współrzędnymi są zmienne wejściowe — zbiory rozmyte A oraz B stanowiące przesłanki wnioskowania, a elementami macierzy projektowane konkluzje $R_{NM}(A, B)$.

In order to evaluate the navigation-meteorology related risk ($R_{NM} = RX$) an inference scheme was used, based on rules determined by an expert whose subject-matter knowledge was implemented in, e.g., the form of a set of logic rules based on the Mamdani model [12]. In the case of the most commonplace fuzzy set containing two inputs and one output the selection of inference rules can be initially planned using a two-dimensional decision matrix (table 3), whose coordinates are input variables — the fuzzy sets A and B being premises for inference, and matrix elements are the designed conclusions $R_{NM}(A, B)$.

Tabela 3. Macierz eksperckich reguł wnioskowania dla przesłanek A, B definiujących rozmyte zbiory ryzyka $RX = R_{NM}$

Table 3. The matrix of expert inference rules for premises A, B defining the risk fuzzy sets $RX = R_{NM}$

Warunki meteorologiczne Meteorological conditions	Warunki nawigacyjne (A)		
	Niekorzystne Unfavorable (AN)	Średnie Medium (AS)	Korzystne Favorable (AK)
Niekorzystne / Unfavorable (BN)	RXD	RXD	RXS
Średnie / Medium (BS)	RXD	RXS	RXM
Korzystne / Favorable (BK)	RXS	RXM	RXM

Zgodnie z ogólnym schematem wnioskowania rozmytego w bloku inferencji dokonamy selekcji reguł logicznych ze względu na ich aktualność. Aby ocenić stopnie przynależności poszczególnych zmiennych wejściowych A — „nawigacja” i B — „meteo” do zbioru rozmytego RX — „ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne”, należy sprawdzić warunek prawdziwości przesłanek, tj. zgodność z przyjętymi założeniami. Jak wynika z tabeli 3., spośród dopuszczalnego

Following the general fuzzy logic inference scheme in the inference block we will select logic rules in relation to their up-to-datedness'. In order to evaluate the membership degrees of the particular input variables A — 'navigation' and B — 'meteo' in the fuzzy logic set RX — 'navigation-meteorology related risk' it is necessary to check the truth of premises, i.e. conformity with the assumptions adopted. As it follows from table 3, of

zbioru obejmującego dziewięć reguł warunek ten spełniają tylko cztery reguły (G11, G12, G21, G22) odznaczające się prawdziwością przesłanek [6, 14].

the permissible set containing nine rules this condition is fulfilled only by four rules (G11, G12, G21, G22) characterized by the truth of premises [6, 14].

Tabela 4. Ekspertcka baza aktywnych reguł logicznych dla ryzyka $RX = R_{NM}$

Table 4. The expert base of active logic rules for risk $RX = R_{NM}$

<p>G11: IF (A=AN) AND (B=BN) THEN ($R_{NM} = RXD$) G12: IF (A=AN) AND (B=BS) THEN ($R_{NM} = RXD$) G21: IF (A=AS) AND (B=BN) THEN ($R_{NM} = RXD$) G22: IF (A=AS) AND (B=BS) THEN ($R_{NM} = RXS$)</p>

Zgodnie ze schematem Mamdaniego do powyższych reguł aktywnych {G11, G12, G21, G22} zastosujemy operator rozmyty typu MIN-MAX [6, 14]. W tym celu ustalimy minimum ze stopni przynależności poszczególnych przesłanek każdej reguły, co wyraża następujący układ równań logicznych:

Following the Mamdani scheme we will apply a MIN-MAX type fuzzy logic operator [6, 14] to the above active rules {G11, G12, G21, G22}. For this purpose we will calculate a minimum from the membership degrees of the particular premises of each rule, which is expressed by a set of logic equations:

$$0,8/AN \wedge 0,4/BN = 0,4/RXD \quad (10.1)$$

$$0,8/AN \wedge 0,6/BS = 0,6/RXD \quad (10.2)$$

$$0,2/AS \wedge 0,4/BN = 0,2/RXD \quad (10.3)$$

$$0,2/AS \wedge 0,6/BS = 0,2/RXS. \quad (10.4)$$

Wartości zmiennych lingwistycznych lewej strony układu równań (10.1)–(10.4) dotyczą przesłanek zbioru aktywnych reguł logicznych {G11, G12, G21, G22} połączonych operatorem koniunkcji (AND). Zgodnie z operatorem MIN prawa strona tego układu zawiera elementy minimalne. Celem uzyskania rozmytego wyniku wnioskowania {G11, G12, G21, G22} zastosujemy do układu (10.1)–(10.4) operator MAX, którego działanie obrazuje poniższe wyrażenie:

The values of the linguistic variables on the left side of the set of equations (10.1)–(10.4) refer to the premises of the set of active logic rules {G11, G12, G21, G22} connected with the conjunction operator (AND). Up to the operator MIN the left side of the set includes minimal elements. In order to obtain the result of the fuzzy logic inference {G11, G12, G21, G22} we will apply the operator MAX to the set (10.1)–(10.4), whose performance is illustrated by the expression below:

$$0,4/RXD \vee 0,6/RXD \vee 0,2/RXD \vee 0,2/RXS = 0,6/RXD \vee 0,2/RXS. \quad (11)$$

Rozmyte wyniki wnioskowania występujące po prawej stronie (RXS i RXD) określają wartości cząstkowe ryzyka nawigacyjno-meteorologicznego R_{NM} według opinii eksperta. Operowanie dwoma zbiorami rozmytymi i funkcją przynależności jest w praktyce mało komunikatywne, dlatego informacja ta w bloku defuzyfikacji podlega ostrzeniu, czyli transformacji do wartości liczbowej. Zgodnie z przyjętą metodologią operację defuzyfikacji przeprowadzimy za pomocą popularnej metody środka ciężkości (CG). Ze względów obliczeniowych wykorzystamy jej uproszczoną dyskretną wersję postaci:

$$RZ = \frac{0,2 \times \Omega_S\{20,40,60,80\} + 0,6 \times \Omega_D\{60,80,100,100\}}{0,2 + 0,6} = 76,25. \quad (12)$$

Wyznaczona wartość liczbową ryzyka nawigacyjno-meteorologicznego $R_{MN} = 76,25$ została graficznie zobrazowana na rysunku 3.

Ponieważ analogiczne postępowanie należy przeprowadzić celem wyznaczenia wartości ryzyka klasyfikacyjno-kwalifikacyjnego (R_{KK}), wartości współczynnika presji i prestiżu Q_{PP} oraz bezpiecznej prędkości statku V , opis tych działań zostanie ograniczony do niezbędnego minimum, obejmującego zasadnicze etapy i podetapy działania sterownika FLC(Titanic).

WYZNACZANIE WARTOŚCI RYZYKA R_{KK}

Etap 1.1

Fuzyfikacja: proces rozmywania ostrych zmiennych wejściowych C — sprawności technicznej statku, D — poziomu wykształcenia załogi.

The results of the fuzzy logic inference being on the right side (RXS and RXD) determine partial values of the navigation-meteorology related risk R_{NM} according to an expert's opinion. To operate two fuzzy logic sets and a membership function is in practice not very communicative, therefore this information in the defuzzification block is subject to defuzzification, i.e. to transform into a numerical value. Following the methodology adopted we will use the popular center of gravity method (CG) to carry out the defuzzification operation. For the purpose of calculation we will use its simplified version:

The numerical value determined for the navigation-meteorology related risk $R_{MN} = 76.25$ is graphically presented in figure 3.

Because an analogical procedure has to be carried out in order to determine the classification-qualification related risk (R_{KK}), the values of pressure and prestige coefficient Q_{PP} and of the ship's safe speed V the description of the steps to be taken will be limited to the minimum, and include the basic stages and sub-stages of the FLC's performance.

DETERMINING RISK VALUES R_{KK}

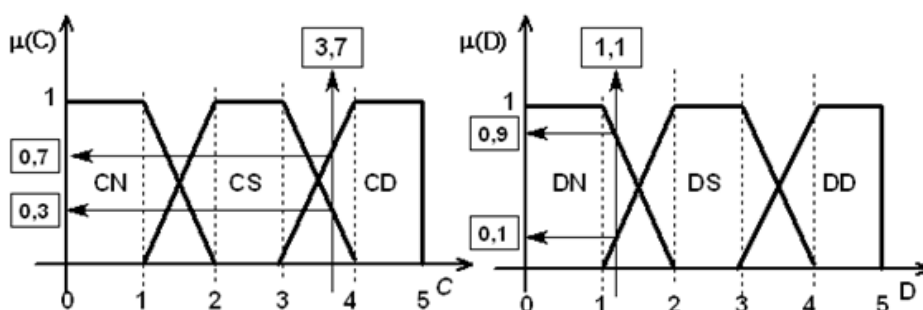
Stage 1.1

Fuzzification: a process of fuzzifying defuzzified input variables C — technical condition of the ship, D — the level of crew qualifications.

Tabela 5. Wartości lingwistyczne i terminy argumentów wejściowych C, D oraz zbioru wyjściowego R_{KK}

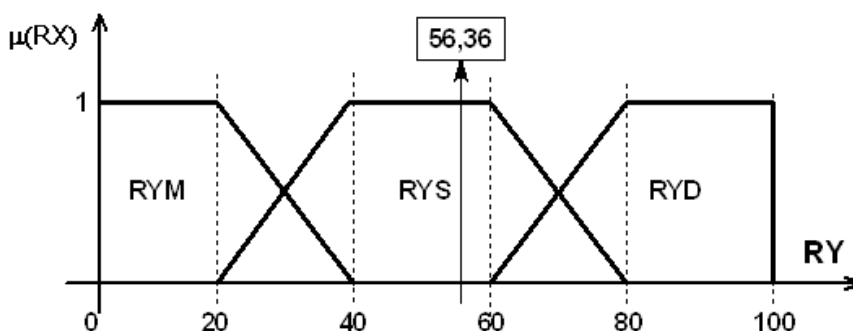
Table 5. Linguistic values and terms of input argument CD and of the initial set R_{KK}

Klasyfikacja statku (C) Ship classification (C) (0-5)	Niska Low $CM \leq 2$	Średnia Medium $1 \leq CS \leq 4$	Wysoka High $CD \geq 3$
Kwalifikacje załogi (D) Crew qualifications (D) (0-5)	Niskie Low $DM \leq 2$	Średnie Medium $1 \leq DS \leq 4$	Wysokie High $DD \geq 3$
Ryzyko klasyfikacyjno-kwalifikacyjne Classification-qualification related risk (0-100%)	Małe Low $RYM \leq 40$	Średnie Medium $20 \leq RYS \leq 80$	Duże High $RYD \geq 60$



Rys. 4. Schemat operacji rozmywania zmiennych C = 3,7 i D = 1,1

Fig. 4. A diagram of fuzzification operations of variables C = 3,7 and D = 1,1



Rys. 5. Struktura zbioru rozmytego ryzyka klasyfikacyjno-kwalifikacyjnego (R_{KK})

Fig. 5. The structure of the fuzzy set of classification-qualification related risk (R_{KK})

Etap 1.2

Definiowanie stopni przynależności $\{\mu_{CN}, \mu_{CS}, \mu_{CD}\}$ i $\{\mu_{DN}, \mu_{DS}, \mu_{DD}\}$ zmiennych wejściowych C i D do zbiorów rozmytych.

Stage 1.2

Defining membership degrees $\{\mu_{CN}, \mu_{CS}, \mu_{CD}\}$ and $\{\mu_{DN}, \mu_{DS}, \mu_{DD}\}$ of the input variables C and D in the fuzzy sets.

Tabela 6. Stopnie przynależności przykładowych wartości ostrych do zbiorów rozmytych C i D
 Table 6. Membership degrees of examples of fuzzified values in the fuzzy logic sets C and D

Zbiór rozmyty Fuzzy set	Stopnie przynależności Membership degrees		
C — klasyfikacja statku C — ship classification	$\mu_{CN}(3,7) = 0$	$\mu_{CS}(3,7) = 0,3$	$\mu_{CD}(1,6) = 0,7$
D — kwalifikacje załogi D — crew qualifications	$\mu_{DN}(1,1) = 0,9$	$\mu_{DS}(1,1) = 0,1$	$\mu_{DD}(1,1) = 0$

Etap 2.1

Inferencja: budowa bazy wiedzy eksperckiej (CxD), projektowanie logicznych implikacji i selekcja reguł aktywnych.

Stage 2.1

Inference: building an expert knowledge base (C x D), designing logical implications and selecting active rules.

Tabela 7. Macierz eksperckich reguł wnioskowania dla przesłanek C, D definiujących rozmyte zbiory ryzyka R_{KK}

Table 7. The matrix of expert inference rules for premises C, D defining the fuzzy sets of risk R_{KK}

Kwalifikacje załogi Crew qualifications (D)	Klasyfikacja statku (C) Ship classification		
	Niska 3 Low 3 (CM)	Średnia 2 Medium 2 (CS)	Wysoka High (CD)
Małe / Low (DM)	RYD	RYD	RYS
Średnie / Medium (DS)	RYD	RYS	RYM
Duże / High (DD)	RYS	RYM	RYM

Tabela 8. Eksperska baza aktywnych reguł logicznych dla ryzyka $RY = R_{KK}$

Table 8. The expert base of active logic rules for risk $RY = R_{KK}$

G12: IF (C=CS) AND (D=DM) THEN (R_{KK} =RYD) G13: IF (C=CS) AND (D=DS) THEN (R_{KK} =RYS) G22: IF (C=CD) AND (D=DM) THEN (R_{KK} =RYS) G23: IF (C=CD) AND (D=DS) THEN (R_{KK} =RYM)
--

Etap 2.2

Stosowanie operatorów logicznych Mamdani MIN/MAX.

Stage 2.2

Applying Mamdani logical operators MIN/MAX.

$$0,3/CS \wedge 0,9/DM = 0,3/RYD \quad (13.1)$$

$$0,3/CS \wedge 0,1/DS = 0,1/RYS \quad (13.2)$$

$$0,7/CD \wedge 0,9/DM = 0,7/RYS \quad (13.3)$$

$$0,7/CD \wedge 0,1/DS = 0,1/RYM \quad (13.4)$$

$$0,3/RYD \vee 0,1/RYS \vee 0,7/RYS \vee 0,1/RYM = 0,1/RYM \vee 0,7/RYS \vee 0,3/RYD. \quad (14)$$

Etap 3.

Defuzyfikacja: ostrzenie zbiorów rozmytych RYM, RYS, RYD.

Stage 3.

Defuzzification of the fuzzy sets RYM, RYS, RYD.

$$R_{KK} = \frac{0,1 \times \Omega_M\{\dots\} + 0,7 \times \Omega_S\{\dots\} + 0,3 \times \Omega_D\{\dots\}}{0,1 + 0,7 + 0,3} = 56,36. \quad (15)$$

gdzie:

$\Omega_M\{\dots\} = \{0,0,20,40\} = 15;$
 $\Omega_S\{\dots\} = \{20,40,60,80\} = 50;$
 $\Omega_D\{\dots\} = \{60,80,100,100\} = 85.$

where:

**WYZNACZANIE
WARTOŚCI WSKAŹNIKA Q_{PP}**

Wyjątkowo w celu wyznaczenia ostatniego parametru modelowanej szybkości statku — czynnika presji i prestiżu Q_{PP} — na wstępie posłużymy się uproszczoną metodą heurystyczną. Uprzednio należy zdefiniować terminy i krańcowe przedziały założonych zbiorów rozmytych: mały (QM), średni (QS) i duży (QD) modelujących kształtowanie się wskaźnika presji i prestiżu Q_{PP} w kategoriach zbiorów rozmytych (tabela 9.). W oparciu o opinię eksperta przyjmujemy *a priori* przykładową wartość wskaźnika presji i prestiżu jako Q_{PP} = 7,8.

**DETERMINING VALUES
OF COEFFICIENT Q_{PP}**

Exceptionally, in order to determine the last parameter of the modeled ship's speed — pressure and prestige coefficient Q_{PP} — we will use a simplified heuristic method. Prior to this it is necessary to define terms and the edge intervals of the assumed fuzzy sets: low (QM), medium (QS) and High (QD) modeling the pressure and prestige coefficient Q_{PP} in the categories of fuzzy sets (table 9). Using an expert's opinion we will *a priori* adopt an example of the value of pressure and prestige coefficient as Q_{PP} = 7.8.

Tabela 9. Wartości lingwistyczne i założone terminy zbiorów rozmytych wskaźnika presji i prestiżu Q_{PP}
 Table 9. Linguistic values and assumed terms of fuzzy sets of pressure and prestige Q_{PP}

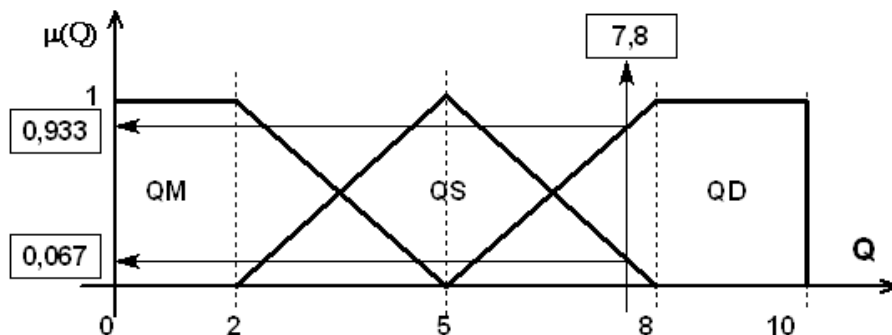
Wskaźnik presji i prestiżu (Q _{PP}) Pressure and prestige coefficient (Q _{PP}) (0–10)	Terminy zbiorów rozmytych wskaźnika Q _{PP} Terms of fuzzy sets of coefficient Q _{PP}		
	Mały Low	Średni Medium	Duży High
	Q _M ≤ 3	1 ≤ Q _S ≤ 6	Q _D ≥ 4

W celu wykorzystania wartości lingwistycznej Q_{PP} = 7,8 na gruncie teorii zbiorów rozmytych *Fuzzy* musimy poddać ją 2014 (LV)

In order to use the linguistic value Q_{PP} = 7.8 in the area of fuzzy sets we have to put it through a process of fuzzification.

procesowi fuzyfikacji. Proces rozmywania zmiennej $Q_{PP} = 7,8$ zgodnie z przyjętym systemem term (tabela 9.) obrazuje rysunek 6.

of the variable $Q_{PP} = 7.8$ in accordance with the adopted system of terms (table 9) is shown in figure 6.



Rys. 6. Schemat operacji rozmywania wskaźnika presji i prestiżu $Q_{PP} = 7,8$

Fig. 6. A diagram of fuzzification process of the pressure and prestige coefficient $Q_{PP} = 7.8$

Jak wynika z rysunku, ekspercka wartość wskaźnika presji i prestiżu $Q_{PP} = 7,8$ odpowiada przynależności w stopniu 0,067 do zbioru rozmytego $Q_{PP} = QS$ — „średni” oraz w stopniu 0,933 do zbioru $Q_{PP} = QD$ — „duży”. Do dalszego działania wielopoziomowego sterownika FLC niezbędne są tylko wartości funkcji przynależności $\mu_{QS}(7,8) = 0,3$ oraz $\mu_{QD}(7,8) = 0$ wyznaczone zgodnie z przyjętą strukturą term metodą trapezową i trójkątną.

As it follows from the figure, the expert value of the pressure and prestige $Q_{PP} = 7.8$ corresponds to the membership in the degree 0.067 in the fuzzy set $Q_{PP} = QS$ — ‘medium’ and in the degree 0.933 in the set $Q_{PP} = QD$ — ‘big’. Only the values of the membership function $\mu_{QS}(7.8) = 0.3$ and $\mu_{QD}(7.8) = 0$, determined in accordance with the adopted structure of terms, using the trapezoid and the triangle method, are needed for further performance of the multilevel FLC.

WYZNACZANIE BEZPIECZNEJ PRĘDKOŚCI STATKU V

Etap 1.1

Fuzyfikacja: proces rozmywania ostrych zmiennych wejściowych R_{NM} — ryzyka nawigacyjno-meteorologicznego, R_{KK} — ryzyka klasyfikacyjno-kwalifikacyjnego oraz Q_{PP} — wskaźnika presji i prestiżu rejsu.

DETERMINING SHIP'S SAFE SPEED V

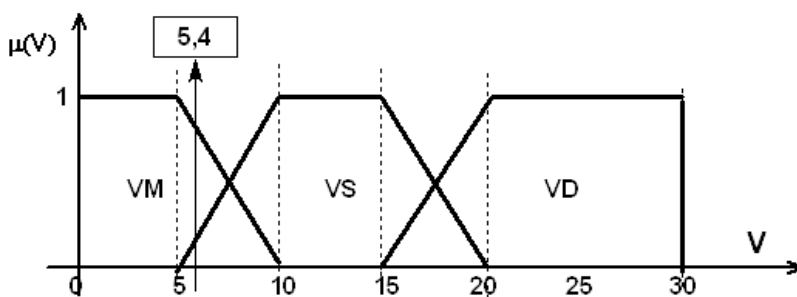
Stage 1.1

Fuzzification: a process of fuzzyfying defuzzified input variables of the navigation-meteorology related risk R_{NM} , of the classification-qualification related risk R_{KK} and of the voyage pressure and prestige coefficient Q_{PP} .

Tabela 10. Wartości lingwistyczne i termy argumentów wejściowych R_{NM} , R_{KK} , Q_{PP} oraz zbioru wyjściowego V

Table 10. Linguistic values and terms of the input arguments R_{NM} , R_{KK} , Q_{PP} in the output set V

Ryzyko nawigacyjno-meteorologiczne Navigation-meteorology related risk (0-100%)	Małe Low $R_{XM} \leq 40$	Średnie Medium $20 \leq R_{XS} \leq 80$	Duże Big $R_{XD} \geq 60$
Ryzyko klasyfikacyjno-kwalifikacyjne Classification-qualification related risk (0-100%)	Małe Low $R_{YM} \leq 40$	Średnie Medium $20 \leq R_{YS} \leq 80$	Duże Big $R_{YD} \geq 60$
Wskaźnik presji i prestiżu rejsu Voyage pressure and prestige coefficient (0-10)	Mały Low $Q_M \leq 5$	Średni Medium $2 \leq Q_S \leq 8$	Duży Big $Q_D \geq 5$
Bezpieczna prędkość statku Ship's safe speed (0-30)	Mała Low $V \leq 10$	Średnia Medium $5 \leq V \leq 20$	Duża Big $V \geq 15$



Rys. 7. Struktura i parametry wyjściowego zbioru rozmytego bezpiecznej prędkości V dla reguł jak w tabeli 12

Fig. 7. The structure and parameters of initial fuzzy set of the safe speed V for the rules as in the table 12

Etap 1.2

Definiowanie stopni przynależności $\{\mu_{RXM}, \mu_{RXS}, \mu_{RXD}\}$, $\{\mu_{RYM}, \mu_{RYS}, \mu_{RYD}\}$, $\{\mu_{QM}, \mu_{QS}, \mu_{QD}\}$ zmiennych wejściowych R_{NM} , R_{KK} i Q_{PP} do zbiorów rozmytych.

Stage 1.2

Defining membership degrees $\{\mu_{RXM}, \mu_{RXS}, \mu_{RXD}\}$, $\{\mu_{RYM}, \mu_{RYS}, \mu_{RYD}\}$, $\{\mu_{QM}, \mu_{QS}, \mu_{QD}\}$ of the input variables R_{NM} , R_{KK} and Q_{PP} in the fuzzy sets.

Tabela 11. Stopnie przynależności przykładowych wartości ostrych $R_{NM} = 76,25$, $R_{KK} = 56,36$, $Q_{PP} = 7,8$ do zbiorów rozmytych R_{NM} , R_{KK} , Q_{PP}

Table 11. Membership degrees of examples of defuzzified values $R_{NM} = 76.25$, $R_{KK} = 56.36$, $Q_{PP} = 7.8$ in the fuzzy sets R_{NM} , R_{KK} , Q_{PP}

Wejściowe zbiory rozmyte Input fuzzy sets	Stopnie przynależności / Membership degrees		
	Małe / Low	Średnie / Medium	Duże / High
R_{NM} — ryzyko nawigacyjno- -meteorologiczne R_{NM} — navigation- -meteorology related risk	$\mu_{RXM}(76,25) = 0$	$\mu_{RXS}(76,25) = 0,1875$	$\mu_{ARXD}(76,25) = 0,8125$

Wejściowe zbiory rozmyte Input fuzzy sets	Stopnie przynależności / Membership degrees		
	Małe / Low	Średnie / Medium	Duże / High
R_{KK} — ryzyko klasyfikacyjno- kwalifikacyjne R_{KK} — classification- qualification related risk	$\mu_{RYM}(56,36) = 0,$	$\mu_{RYS}(56,36) = 1,0$	$\mu_{RYD}(56,36) = 0$
Q_{PP} — wskaźnik presji i prestiżu rejsu Q_{PP} — pressure and prestige coefficient	$\mu_{QM}(7,8) = 0$	$\mu_{QS}(7,8) = 0,067$	$\mu_{QD}(7,8) = 0,933$

Etap 2.1

Inferencja: budowa bazy wiedzy eksperckiej ($R_{NM} \times R_{KK} \times Q_{PP}$), projektowanie logicznych implikacji i selekcja reguł aktywnych.

Stage 2.1

Inference: building an expert knowledge base ($R_{NM} \times R_{KK} \times Q_{PP}$), designing logical implications and selecting active rules.

Tabela 12. Eksperska baza aktywnych reguł logicznych dla prędkości bezpiecznej V

Table 12. Expert base of active logic rules for the safe speed V

IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VS) IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VS) IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VM) IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VM)
--

Etap 2.2

Stosowanie operatorów logicznych Mamdaniego MIN/MAX.

Stage 2.2

Applying Mamdani logic operators MIN/MAX.

$$0,1875/RXS \wedge 1.0/RYS \wedge 0,067/QS = 0,067/VS \quad (16.1)$$

$$0,1875/RXS \wedge 1.0/RYS \wedge 0,933/QD = 0,1875/VS \quad (16.2)$$

$$0,8125/RXD \wedge 1.0/RYS \wedge 0,067/QS = 0,067/VM \quad (16.3)$$

$$0,8125/RXD \wedge 1.0/RYS \wedge 0,933/QD = 0,8125/VM \quad (16.4)$$

$$0,067/VS \vee 0,1875/VS \vee 0,067/VM \vee 0,8125/VM = 0,1875/VS \vee 0,8125/VM. \quad (17)$$

Etap 3.

Defuzyfikacja: ostrzenie zbiorów rozmytych VS, VM.

Stage 3.

Defuzzification of the fuzzy sets VS, VM.

$$V^* = \frac{0,1875 \times \Omega_{VS}\{5,10,15,20\} + 0,8125 \times \Omega_{VM}\{0,0,5,10\}}{0,1875 + 0,8125} = 5,4. \quad (18)$$

gdzie:

where:

$$\Omega_{VM}\{0,0,5,10\} = 3,75;$$

$$\Omega_{VS}\{5,10,15,20\} = 12,5;$$

$$\Omega_{VD}\{15,20,30,30\} = 23,75.$$

WARIANTOWANIE DECYZJI EKSPERCKICH

Na zakończenie zostanie zaprezentowane funkcjonowanie modelowanego sterownika FLC(Titanic) w przypadku podejmowania różnych decyzji przez eksperta lub grupę ekspertów [13, 14]. W kolejnych wariantach (1–4) dla identycznych przesłanek (RX, RY, Q) ten sam ekspert lub grupa ekspertów będą stawali oddzielne konkluzje dotyczące zalecanej prędkości (V), co zostało zobrazowane w tabelach 13–16. Ze względu na powtarzalność procedur obliczeniowych realizowanych w blokach fuzyfikacji, inferencji i defuzyfikacji analizę tę ograniczymy do końcowego etapu działania sterownika FLC(Titanic), kiedy budowana jest baza reguł eksperckich. Analogicznie jak zaprezentowane powyżej, postępowanie proceduralne prowadzi w konsekwencji poprzez proces defuzyfikacji do generowania na wyjściu ostrzych wartości bezpiecznej prędkości RMS „Titanic” w krytycznych warunkach rejsu.

PREPARING VARIANTS OF EXPERT DECISIONS

Performance of the modeled FLC(Titanic) in the case of making various decisions by an expert or a group of experts [13, 14] will be presented in the final part of this paper. In the successive variants (14) for identical premises (RX, RY, Q) the same expert or a group of experts will draw separate conclusions relating to the recommended speed (V), which is illustrated in tables 13–16. Because of the repeatability of the calculation procedures realized in blocks of fuzzification, inference and defuzzification we will limit the analysis to the final stage of the FLC(Titanic) performance, when a base of expert rules is being built. Analogically as presented above, the procedural activity leads, as a consequence, through the defuzzification process, to generating, at the output, the defuzzified values for the safe speed for the RMS ‘Titanic’ during the critical conditions of the voyage.

Tabela 13. Wariant 1. — ekspercka baza aktywnych reguł logicznych do wyznaczania bezpiecznej prędkości V(1)

Table 13. Variant 1 — expert base of active logic rules used to determine safe speed V(1)

Wariant 1. / Variant 1

IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VD)
 IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VS)
 IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VS)
 IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VM)

$$V_1^* = \frac{0,067 \times \Omega_{VD}\{\dots\} + 0,1875 \times \Omega_{VS}\{\dots\} + 0,8125 \times \Omega_{VM}\{\dots\}}{0,067 + 0,1875 + 0,8125} = 6,6$$

Tabela 14. Wariant 2. — ekspercka baza aktywnych reguł logicznych do wyznaczania bezpiecznej prędkości V(2)

Table 14. Variant 2 — expert base of active logic rules used to determine safe speed V(2)

<p>Wariant 2. / Variant 2 IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VD) IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VD) IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VS) IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VM)</p>
--

$$V_2^* = \frac{0,1875 \times \Omega_{VD} \dots + 0,067 \times \Omega_{VS}\{\dots\} + 0,8125 \times \Omega_{VM}\{\dots\}}{0,1875 + 0,067 + 0,8125} = 7,81$$

Tabela 15. Wariant 3. — ekspercka baza aktywnych reguł logicznych do wyznaczania bezpiecznej prędkości V(3)

Table 15. Variant 3 — expert base of active logic rules used to determine safe speed V(3)

<p>Wariant 3. / Variant 3 IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VD) IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VD) IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VS) IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VS)</p>
--

$$V_3^* = \frac{0,1875 \times \Omega_{VD} \ 15,20,30,30 + 0,8125 \times \Omega_{VS}\{5,10,15,20\}}{0,1875 + 0,8125} = 10,16$$

Tabela 16. Wariant 4. — ekspercka baza aktywnych reguł logicznych do wyznaczania bezpiecznej prędkości V(4)

Table 16. Variant 4 — expert base of active logic rules used to determine safe speed V(4)

<p>Wariant 4. / Variant 4 IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VD) IF (RX=RXS) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VD) IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QS THEN (V=VD) IF (RX=RXD) AND (RY=RYS) AND Q=QD THEN (V=VD)</p>
--

$$V_4^* = \frac{0,8125 \times \Omega_{VD} \ 15,20,30,30}{0,8125} = 23,75$$

Czynnikiem merytorycznie różnicującym poszczególne warianty jest wyłącznie baza reguł eksperckich, a konkretnie zbiór reguł aktywnych (tabele 13–16), który uruchamia proces defuzyfikacji

The factor differentiating the particular variants is exclusively the base of expert rules, to be precise the set of active rules (tables 13–16), which starts the defuzzification process of fuzzy

zmiennych rozmytych do wartości ostrej (liczbowej). Przeprowadzone analizy i obliczenia dla czterech wariantów decyzji podejmowanych przez eksperta operującego bazą reguł logicznych jednoznacznie wskazują na praktyczną użyteczność teorii zbiorów rozmytych Zadeha oraz sterowników Mamdaniego do rozwiązywania skomplikowanych problemów sterowniczych nie tylko w sferze automatyki w naukach technicznych, ale także w innych obszarach związanych z podejmowaniem racjonalnych (optymalnych) decyzji.

WNIOSKI

Sterowniki rozmyte Mamdaniego wykorzystujące teorię zbiorów rozmytych A. L. Zadeha są obecnie użytkowane nie tylko w tradycyjnych zastosowaniach technicznych, ale coraz częściej w badaniach operacyjnych jako bardzo elastyczne narzędzia służące do znajdowania rozwiązań nawet bardzo skomplikowanych problemów bez konieczności matematycznego modelowania procesów fizycznych. Przykładem takiej aplikacji jest zaproponowana próba wykorzystania ich do wyznaczania bezpiecznej prędkości statku RMS „Titanic” w krytycznych warunkach dziewiczego rejsu 14 kwietnia 1912 roku na polu lodowym uwzględniająca bardzo dużo niewymiernych i rozmytych kryteriów oraz innych uwarunkowań trudnych do formalnego zapisania za pomocą ścisłych formuł matematycznych.

Punktem startowym procedury FLC(Titanic) jest budowa modelu logicznego determinującego zależność prędkości statku

variables to the defuzzified (numerical) value. The analyses and calculations performed for the four variants of decision making by the expert operating the base of logic rules unequivocally point to the practical usefulness of the Zadeh theory of fuzzy sets and the Mamdani controllers, in solving complicated control problems, not only in the area of automation in technical science but also in other fields relating to making rational (optimum) decisions.

REMARKS

The Mamdani fuzzy controllers using the A. L. Zadeh theory of fuzzy sets are now applied not only to traditional technological solutions but more and more often to operational investigations, as very flexible tools for finding solutions to even very complicated problems, without the necessity to mathematically model physical processes. The proposed attempt is an example of employing them to determine the safe speed for the RMS ‘Titanic’ during critical conditions of the maiden voyage on 14 April, 1912 in an ice field, taking into account many irrational and fuzzy criteria as well as other conditions difficult to write formally using strict mathematical formulas.

The starting point for the FLC(Titanic) procedure is building a logical model determining the dependence of the speed of the RMS ‘Titanic’ on the adopted variables, parameters and various situational limitations. As in

RMS „Titanic” od przyjętych zmiennych, parametrów i różnych ograniczeń sytuacyjnych. Jak każdy model także ten stanowi bardzo duże przybliżenie badanej rzeczywistości i absolutnie nie pretenduje do precyzyjnego opisu niezwykle złożonych uwarunkowań żeglugowych mających wpływ na bezpieczeństwo rejsu RMS „Titanic”. W przedstawionym modelu konceptualnym bezpieczna prędkość statku jest niejawną funkcją wielu zmiennych i stałych, których fizyczny mechanizm modelowania za pomocą formalnego aparatu matematycznego byłby niezwykle trudny i złożony, a przede wszystkim bardzo skomplikowany pod względem analityczno-obliczeniowym. W tym przypadku wystarczył ogólny model logiczny badanego procesu i heurystyczne decyzje eksperta zawarte w bazie wiedzy będącej podstawą budowania zbioru aktywnych reguł logicznych.

Procedurę modelowania bezpiecznej prędkości RMS „Titanic” przeprowadzono formalnie dla pięciu wariantów badawczych. Wyjściowy, najbardziej asekurancki w opinii eksperta, wariant podróży (tabela 12.) ograniczał prędkość statku na polu lodowym do minimalnej wartości 5,4 w. W kolejnych, coraz bardziej ryzykownych modyfikacjach eksperckiej bazy reguł logicznych zarządzającej prędkością statku (tabele 13–16), subiektywnie oceniana bezpieczna prędkość stopniowo rosła i przyjmowała następujące wartości: 6,6 w, 7,8 w, 10,1 w, aż do maksymalnej wartości 23,75 w. Aby symulować różnorodne uwarunkowania podróży

every model, this one also constitutes a big approximation to the investigated reality and in no way does it lay claim to precise description of the extremely complex navigation conditions having impact on the safety of the RMS ‘Titanic’. In the presented conceptual model the ship’s safe speed is an implicit function of many variables and constants, whose physical modeling mechanism with a formal mathematical apparatus would be extremely difficult and complex, and first of all it would be very complicated for analytic-calculation related reasons. In this case a general logic model of the investigating process and the expert’s heuristic decisions contained in the knowledge base used to build a set of active logic rules was sufficient.

The procedure for modeling the safe speed for the RMS Titanic was carried out for five investigation variants. The initial, the most cautious in the expert’s opinion, variant of the voyage (table 12) limited the speed of the ship in the ice field to the minimum value of 5.4 knots. In the successive, riskier and riskier expert modifications of the base of logical rules controlling the ship’s speed (tables 13–16), the subjectively evaluated safe speed gradually grew and had the following values: 6.6, 7.8, 10.1, reaching a maximum of 23.75 knots. In order to simulate various voyage conditions for the RMS ‘Titanic’ in this critical time in the Atlantic region only ‘soft’ condition instructions were employed, programming linguistically new limitations and challenges by means of logic expressions

RMS „Titanic” w tym newralgicznym czasie i rejonie Atlantyku operowano wyłącznie „miękkimi” instrukcjami warunkowymi, programując lingwistycznie nowe ograniczenia i wyzwania za pomocą wyrażeń logicznych zawartych w bazie reguł stanowiącej zasadniczy komponent bloku wnioskowania.

Warunkiem koniecznym wykorzystania rozmytych sterowników Mamdani do sterowania prędkością statku w krytycznych warunkach nawigacyjnych, przy założonej sprawności technicznej jednostki i określonym poziomie kwalifikacji załogi oraz dużej presji czasowej, była wysoka elastyczność i duża podatność aparatu zbiorów rozmytych na precyzowanie szczególnych uwarunkowań podróży morskiej. Warunkiem dostatecznym praktycznej użyteczności tej aplikacji jest ekspert lub grupa ekspercka — ich poziom kompetencji i profesjonalizmu. Wiedza i doświadczenie eksperta zostały wykorzystane do sformułowania strategii i szczegółowych wariantów rozwiązania całego zadania. W tym celu operował on zestawem logicznych instrukcji warunkowych zapisanych w bazie reguł będącej zasadniczym elementem bloku inferencji wykorzystywanego sterownika rozmytego FLC(Titanic). Kluczowym czynnikiem sukcesu zaprezentowanego podejścia jest więc wiedza i kompetencje eksperta, czyli *know-how* oraz sposób jej translacji dla potrzeb sterowanego modelu (zadania).

contained in the base of rules, being the basic component of the inference block.

The condition necessary for using the Mamdani fuzzy controllers to control the ship's speed under critical navigation conditions, for the assumed good technical condition of the vessel, specific crew qualifications and high time pressure, was high flexibility and high capability of the apparatus of fuzzy sets for the precise determining of particular conditions of the voyage. The sufficient condition relating to the usefulness of this application is an expert or a group of experts — the level of their competence and professionalism. The knowledge and experience of the expert were used to formulate the strategy and detailed variants of solutions to the whole task. For this purpose the expert operated a set of logical conditional instructions written down in the base of rules, being the basic element in the inference block of the FLC(Titanic) used. Therefore the key-factor to the success of the presented approach is the knowledge and competence of an expert, i.e. *know-how* and the way it is translated in relation to the needs of controlled model (task).

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Brown D. G., *The last log of the Titanic*, Maine International Marine, Camden 2001.
- [2] Driakov D., Hellendoorn H., Reinfrank M., *Wprowadzenie do sterowania rozmytego*, WNT, Warszawa 1996 [*Introduction to fuzzy control — available in the Polish*].
- [3] Ficoń K., *Sztuczna inteligencja. Nie tylko dla humanistów*, BEL Studio, Warszawa 2012 [*Artificial intelligence. Not only for humanists — available in the Polish*].
- [4] Ficoń K., *Zastosowanie rozmytych sterowników Mamdaniego do określania ryzyka wieloczynnikowego*, 'Zeszyty Naukowe AMW', 2013, No 3, pp. 65–88 [*Using Mamdani fuzzy controllers to calculate multifactor risk — available in the Polish*].
- [5] Gulley N., Rogerjang J. S.; *Fuzzy Logic Toolbox*, The Math Works, 1995.
- [6] Kacprzyk J., *Wieloetapowe sterowanie rozmyte*, WNT, Warszawa 2001. (Multi-stage fuzzy logic control – available in the Polish language)
- [7] Kaczmarek T. T., *Ryzyko i zarządzanie ryzykiem. Ujęcie interdyscyplinarne*, Difin, Warszawa 2005 [*Risk and risk management. Interdisciplinary approach — available in the Polish*].
- [8] Kisielewicz A., *Sztuczna inteligencja i logika. Podsumowanie przedsięwzięcia naukowego*, WNT, Warszawa 2011 [*Artificial intelligence and logic. Summary of a scientific Project — available in the Polish*].
- [9] Krystek R. (red.), *Zintegrowany system bezpieczeństwa transportu*, WKiŁ, Warszawa — Gdańsk 2009 [*An integrated maritime transport system — available in the Polish*].
- [10] Łachwa A., *Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji*, AOW Exit, Warszawa 2001 [*A fuzzy world of sets, figure, relations, facts, rules and decisions — available in the Polish*].
- [11] Mamdani E. H., *Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers*, 'International Journal of Man-Machine Studies', 1976, Vol. 8, issue 6, pp. 669–678.
- [12] Mamdani E. H., *Applications of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant*, 'Proceedings of IEE', 1974, Vol. 121, No 12, pp. 1585–1588.
- [13] Nowicki R. K., *Rozmyte systemy decyzyjne w zadaniach z ograniczoną wiedzą*, AOW Exit, Warszawa 2009 [*Fuzzy decision processes in tasks with limited knowledge — available in the Polish*].
- [14] Piegat A., *Modelowanie i sterowanie rozmyte*, AOW Exit, Warszawa 2003 [*Fuzzy modeling — available in the Polish*].
- [15] Rasiowa H., *Wstęp do matematyki współczesnej*, BM, t. 30, PWN, Warszawa 1979 [*Introduction to contemporary mathematics — available in the Polish*].
- [16] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, WN PWN, Warszawa 1997 [*Neuron networks, genetic algorithms and fuzzy systems — available in the Polish*].
- [17] Rutkowski L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, WN PWN, Warszawa 2006 [*Methods and techniques of artificial intelligence — available in the Polish*].
- [18] Takagi T., Sugeno M., *Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions*, 'Proceedings of IFAC', July 1983, pp. 55–60.
- [19] Zadeh L. A., *Fuzzy algorithm*, 'Information and Control', 1968, Vol. 12, pp. 94–102.
- [20] Zadeh L. A., *Fuzzy logic and approximate reasoning*, 'Synthese', 1975, Vol. 30, pp. 407–428.
- [21] Zadeh L. A., *Fuzzy sets*, 'Information and Control', 1965, Vol. 8, pp. 338–353.