Prof. dr hab. inż. Janusz Kacprzyk
Instytut Badań Systemowych PAN

NOWE KIERUNKI W LOGICE ROZMYTEJ

Paradygmat Obliczeń na Słowach

Przedstawiono w skrócie pewne nowe tendencje w szeroko rozumianej logice rozmytej, które – po pierwsze – pojawiły się w ostatnim czasie i są intensywnie promowane na świecie, m.in. we wspólnych książkach twórcy teorii zbiorów rozmytych, prof. Lotfiego A. Zadeha oraz autora [x, x], a – po drugie – są istotne dla szeroko rozumianej automatyki, podejmowania decyzji i dziedzin pokrewnych. Przede wszystkim, skupimy się na tzw. paradygmacie obliczeń na słowach, umożliwiającym formalne i algorytmiczne przetwarzanie określeń i wyrażeń lingwistycznych (które reprezentują percepcje ludzkie).

NEW DIRECTIONS IN FUZZY LOGIC

Paradigm of computing with words

Some new directions in broadly perceived fuzzy logic are briefly presented that have appeared in recent years and are considered to be promising. First, we present the so-called new paradigm of computing with words that appeared in the mid-1990s and is discussed in detail in the two volumes by Lotfi A. Zadeh, the founder of fuzzy sets theory and the author, Janusz Kacprzyk [x, x]. This paradigm advocates, and makes possible a direct use of natural language like expressions of concepts, values, relations, etc. that reflect human perceptions..

1. POWSTANIE, ROZWÓJ I ZASTOSOWANIA TEORII ZBIORÓW ROZMYTYCH

Jeśli spojrzymy na rozwój praktycznie wszystkich dziedzin wiedzy typu „twardego", czyli nauk ścisłych, przyrodniczych, technicznych itp., to właściwie odbywał się on według jednego schematu. Otóż, starano się rozpatrywane zadania coraz bardziej formalizować, a potem rozwiązywać tak, aby uzyskać najlepsze („optymalne") rozwiązania. Ten, słuszny zresztą, paradygmat polegał w istocie na stosowaniu narzędzi matematycznych, coraz bardziej zresztą złożonych i wyrafinowanych. Osiągnięto wiele sukcesów, czego przykładem może być np. nowoczesna teoria sterowania, którą wielu uważa za największe osiągnięcie matematyki stosowanej, opracowanie doskonałych konstrukcji typu kształtów płatów lotniczych, płyt podłogowych samochodów itp.

Jeżeli jednak spojrzymy na przykłady niewątpliwych sukcesów tego powyższego, tradycyjnego paradygmatu, to widzimy, że dotyczą one w zasadzie jedynie zadań bardzo ściśle określonych, w których postawienie zadania jest jasne (np. możliwie szybkie czy dokładne trafienie rakietą w cel, możliwie wytrzymała konstrukcja itp.), a przy tym są dostępne dane (np. parametry materiałów i elementów), a do tego są one do tego dokładnie określone. Na domiar złego, podejścia tego typu wymagają modelu matematycznego rozpatrywanego procesu, np. w postaci równań różniczkowych. Nie trzeba nikogo przekonywać, jak trudne i kosztowne może być takie wymaganie.

Niedostatki takiego tradycyjnego, „twardego" paradygmatu dostrzegano już od dawna. Po pierwsze, jasne było, że w olbrzymiej większości zagadnień występujących w praktyce, tak duże wymagania informacyjne, analityczne i obliczeniowe w sensie znajomości dokładnego modelu matematycznego, dostępności pełnych i precyzyjnych danych, wyznaczania „optymalnych" rozwiązań, są po prostu nierealistyczne, a przy tym zbyt kosztowne.

Po drugie, szybko zauważono, że w postępowaniu powyższego typu błędem jest chyba nie uwzględnianie faktu, że rozwiązywane zadanie nie jest czymś obiektywnym, wynikającym jedynie ze specyfiki problemu, ale we wszystkich praktycznie nietrywialnych przypadkach wynika z percepcji człowieka, który niejako „zamawia" rozwiązanie danego zadania. A jeśli zamawia, to stawia swoje wymagania, a potem formułuje swoje oceny np. jakości otrzymanych rozwiązań. Jasne jest, że jeżeli mamy tu do czynienia z człowiekiem jako istotnym elementem procesu formułowania, rozwiązywania i oceny wyników, to nie możemy się spodziewać tej „czystej" precyzji, racjonalności itp.

Na początku nie brano powyższego pod uwagę, co prowadziło często do porażek wielu analityków. Zresztą, nic w tym dziwnego, bo przecież do dyspozycji były tylko modele i techniki tradycyjnie, oparte na matematyce klasycznej, a więc ścisłej i „precyzyjnej".

W matematyce i logice klasycznej pojawiły się już dość wcześnie głosy, że ta „precyzja" nie pozwala na modelowanie zachowania i rozumowania człowieka, a przykłady (Russell, Łukasiewicz, Leśniewski itp.) można znaleźć np. w książce Kacprzyka [2] lub Zadeha i Kacprzyka [6]. Niestety, próby wprowadzenia pewnej „miękkości", czy „nieprecyzyjności" do klasycznych narzędzi matematycznych nie były zbyt udane, bo były one zbyt skomplikowane dla zastosowań.

Już na początku lat sześćdziesiątych, Lotfi A. Zadeh, slynny już wówczas specjalista w dziedzinie teorii sterowania i teorii systemów, w dość mało znanym dziś artykule, napisał następujące zdania (L.A. Zadeh, *From circuit theory to system theory*, Proceedings of the IRE, 1961):

> "... There is fairly wide gap between what might be regarded as 'animate' system theorists and 'inanimate' system theorists..., and it is not at all certain that this gap will be narrowed, much less closed, in the near future ...
> ... this gap reflects the fundamental inadequacy of conventional mathematics – the mathematics of precisely defined points, functions, sets, probability measures, etc. – for coping with the analysis of biological systems, and to deal effectively with such systems ...
> ... we need a radically different kind of mathematics of fuzzy or cloudly quantities ... Indeed, the need for such a mathematics is becoming increasingly apparent..."

Zadeh mówi więc, że istnieje poważna rozbieżność między systemami, w których człowiek odgrywa kluczowa rolę i systemami, w których tak nie jest. Ta rozbieżność wynika z nieprzystosowania matematyki konwencjonalnej, a więc opartej na dokładnie określonych punktach zbiorach, funkcjach miarach prawdopodobieństwa itp., do rozpatrywania systemów biologicznych (czyli z istotnym elementem ludzkim). Coraz wyraźniejsza jest więc potrzeba innego typu matematyki nieprecyzyjnych wielkości. Jest to już wyraźna zapowiedź teorii zbiorów rozmytych, którą Zadeh wprowadził w 1965 r. [5].

Sama teoria zbiorów rozmytych jest dość prosta. A mianowicie, tradycyjna teoria zbiorów przyjmuje, że pojęciem podstawowym jest „zbiór", który może albo zawierać pewne elementy, albo nie – a więc, przejście od przynależności do nieprzynależności elementu do zbioru jest skokowe. Można to przedstawić w postaci tzw. funkcji charakterystycznej $\varphi : X \to \{0,1\}$, która elementom pewnej przestrzeni rozważań przypisuje albo liczbę 1 (przynależność) albo 0 (nieprzynależność). Nietrudno zauważyć, że zbiór może służyć do reprezentacji pojęć „ostrych", czyli ściśle zdefiniowanych typu np. „liczba całkowita większa od 5 i mniejsza od 9".

Co jednak począć z powszechnie używanymi przez człowieka pojęciami nieostrymi typu „duża liczba", „wysoka temperatura" itp. W tych przypadkach nie można oczywiście ustalić precyzyjnej granicy między elementami należącymi do zbioru, a nie należącymi do niego, bo przecież przyjęcie, że np. do temperatury 80°C temperatura nie jest wysoka, a od 81°C temperatura jest już wysoka w ogóle nie oddaje rozumienia przez człowieka sensu takiego pojęcia. Zwróćmy tu uwagę, że w praktyce te nieostre pojęcia, właściwości itp. wynikają z użycia języka naturalnego.

Zadeh [5] wprowadził więc pojęcie *zbioru rozmytego*, który określił poprzez tzw. *funkcję przynależności* $\mu : X \to [0,1]$, która elementom pewnej przestrzeni rozważań przypisuje nie tylko liczby 0, dla całkowitej nieprzynależności, oraz 1, dla całkowitej przynależności, ale także liczy między 0 i 1, oznaczające częściową przynależność. Mamy więc aparat pozwalający określać pojęcia nieostre typu „wysoka temperatura"! Zadeh [5] wprowadził potem operacje na tak określonych zbiorach rozmytych, dodatkowe pojęcia itp., co pozwoliło na praktyczne wykorzystanie tego aparatu. W książce Kacprzyka [2] zawarto pełny przegląd tej teorii i jej wcześniejszych zastosowań.

Teoria zbiorów rozmytych spotkała się ze skrajnymi reakcjami. Z jednej strony, była duża i ciągle rosnąca grupa aktywnych badaczy na całym świecie. Z drugiej jednak strony, wielu znanych nawet naukowców wykazywało postawę wręcz wrogą, jak np. Kalman. Jednym z koronnych argumentów był brak „rzeczywistych" zastosowań, co może było w pewnym sensie prawdą, a innym argumentem było to, że nie potrzebna jest nowa teoria uwzględniająca nieprecyzyjność informacji, bo przecież np. mamy silny teoretycznie aparat probabilistyczny. Oczywiście, nie było to prawdą, bo teoria zbiorów rozmytych dotyczy innej postaci niedoskonałości informacji, związanej z nieprecyzyjnością języka naturalnego, a nie niepewnością typu probabilistycznego.

Przełom nastąpił w połowie lat osiemdziesiątych, gdy w Japonii liczne zespoły uniwersyteckie i z przemysłowych pokazały implementacje tzw. *sterowania rozmytego* (ang. fuzzy logic control, lub fuzzy control), np. do sterowanie wagonami metra w Sendai, pralkami, dzwigami portowymi, różnymi procesami przemysłowymi itp. Produkty z napisem *fuzzy logic control* można było kupić w każdym sklepie. Wtedy nastąpił tzw. *fuzzy boom*, czyli lawinowy rozwój zastosowań logiki rozmytej (teorii zbiorów rozmytych).

Istota sterowania rozmytego jest najogólniej następująca. Otóż, w tradycyjnym podejściu do sterowania, wychodzi się z modelu matematycznego sterowanego procesu, danego np. w postaci układu równań różniczkowych. Formułuje się wskaźnik jakości sterowania, odzwierciedlający formalnie cel sterowania, np. koszt (który trzeba zminimalizować). A potem, wyznacza się jakimiś metodami formalnymi najlepsze sterowania realizujące ten cel, przy pewnych innych ograniczeniach. Niestety, to podejście jest często nierealne. Po pierwsze, bardzo często model procesu jest nieznany lub jego budowa, a nawet tylko identyfikacja, jest zbyt trudna i kosztowna. Po drugie, takie proste sformalizowanie zadania poprzez optymalizację jednej (lub nawet kilku) funkcji celu może być nieadekwatne. Po trzecie wreszcie, jeżeli nawet założymy, że dysponujemy tymi dwoma powyższymi elementami, to rozwiązanie zadania (optymalizacyjnego) może być bardzo trudne.

Człowiek (np. doświadczony operator procesu) jednak sobie w takiej sytuacji radzi, nie znając przecież ani modelu, ani formalnego postawienia zadania, ani nie optymalizując. Zaproponowano więc, aby „wydobyć" od operatora (eksperta dziedzinowego) stosowane przez niego reguły sterowania i zapisać je w postaci tzw. reguł typu „jeżeli ... to ..." (IF – THEN). Oczywiście te reguły operator może sformułować w języku naturalnym, jak np.

Jeżeli „x jest *małe*" i „Δx jest *średnie*" to „Δy jest *duże*"

co należy rozumieć jako: jeżeli pewna zmienna x (np. temperatura) przyjmuje wartość *małą*, a jej zmiana Δx przyjmuje wartość średnią, to należy przyłożyć sterowanie (zmianę Δy) o wartości *duże*. Jasne jest, że ponieważ występuje tu język naturalny, więc określenia (wartości i relacje, czyli takie zdania) są nieprecyzyjne, czyli do ich reprezentacji można zastosować logikę rozmytą.

Okazało się, że takie sterowanie rozmyte działa bardzo dobrze i znalazło wiele zastosowań. Bardzo dobrym źródłem informacji jest tu książka Driankova, Hellendoorna i Reinfranka [1]. Oczywiście, ten prosty model został potem znacznie rozszerzony (por. np. Kacprzyk [3]).

Tak jak się najczęściej zdarza w przypadku wszystkich praktycznie nauk stosowanych, na początku nowe technologie są proponowane przez ośrodki naukowe, a potem – gdy te technologie staną się dostatecznie dojrzałe – „przejmują pałeczkę" praktycy (inżynierowie). Tak też stało się w przypadku sterowania rozmytego, które weszło do praktyki przemysłowej. Nauka musiała więc znaleźć obiekt swych dalszych zainteresowań. Wśród wielu nowych kierunków, omówimy tu nową propozycję Zadeha, która pojawiła się w połowie lat dziewięćdziesiątych.

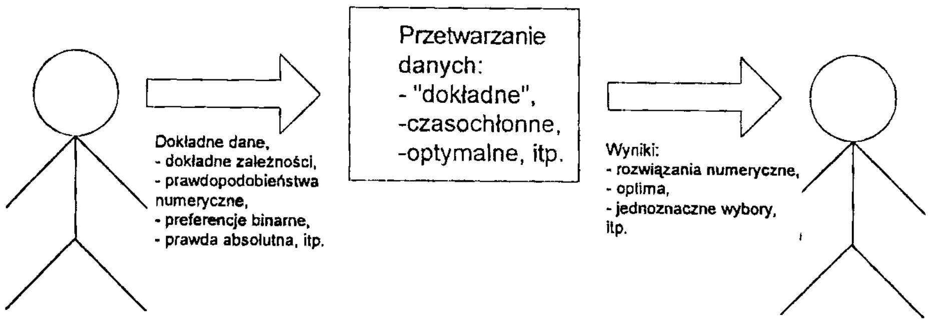
2. PARADYGMAT OBLICZEŃ NA SŁOWACH

Jak mogliśmy zauważyć w pkt. 1, teoria zbiorów rozmytych bardzo silnie odnosi się do języka naturalnego, który jest przecież jedynym w pełni naturalnym ludzkim sposobem komunikacji, dając przy tym aparat umożliwiający reprezentację nieprecyzyjności znaczeń, tak dla tego języka charakterystycznej. To samo dotyczy sztandarowego zastosowania teorii zbiorów rozmytych, czyli sterowania rozmytego.

Zadeh zaproponował więc w połowie lat dziewięćdziesiątych, aby przy formułowaniu i rozwiązywaniu zadań używać języka naturalnego w jeszcze bardziej bezpośredni s pełny sposób. Ta propozycja to nowy paradygmat, tzw. *paradygmat obliczeń na słowach.* Zyskał on sobie dużą popularność, a najpełniejszy przegląd aspektów teoretycznych i zastosowaniowych z nim związanych stanowią książki Zadeha i Kacprzyka [7, 8].

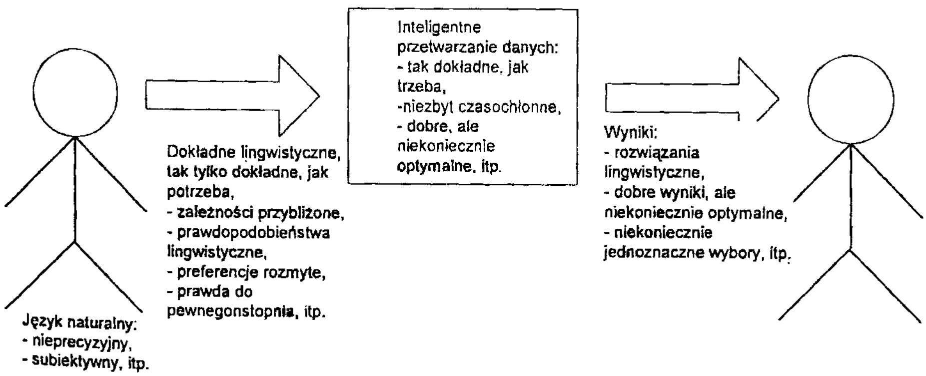
Dla naszych potrzeb istotę paradygmatu obliczeń na słowach można wytłumaczyć następująco. Tradycyjny paradygmat stosowany przy formułowaniu i rozwiązywaniu prawie wszystkich zadań z naszego obszaru zainteresowań można przedstawić jak na Rysunku 1.

Otóż, w praktycznie wszystkich nietrywialnych zadaniach, na wejściu procesu jest człowiek (np. klient, analityk, itp.), którego zadaniem jest podanie pewnych danych, parametrów, wyartykułowanie wymagań itp. Modele tradycyjne wymagają liczb, więc – mimo, że jedynym w pełni naturalnym środkiem komunikacji człowieka jest język naturalny – niejako „zmusza" się człowieka do podawania liczb, funkcji itp., a są one dla niego sztuczne! Te liczby, precyzyjne dane podlegają następnie przetwarzaniu i obróbce z użyciem tradycyjnego aparatu formalnego typu technik optymalizacyjnych, który jako rozwiązanie (dla człowieka!) podaje znów liczby, zależności matematyczne itp. A te są znów dla człowieka sztuczne, po przecież dla niego jedynie język naturalny jest właśnie naturalny. Tak więc, ten tradycyjny „paradygmat obliczeń na liczbach", o dużych wymaganiach informacyjnych i obliczeniowych, nie jest naturalny z punktu widzenia człowieka!



Rysunek 1. Tradycyjny paradygmat obliczeń na liczbach

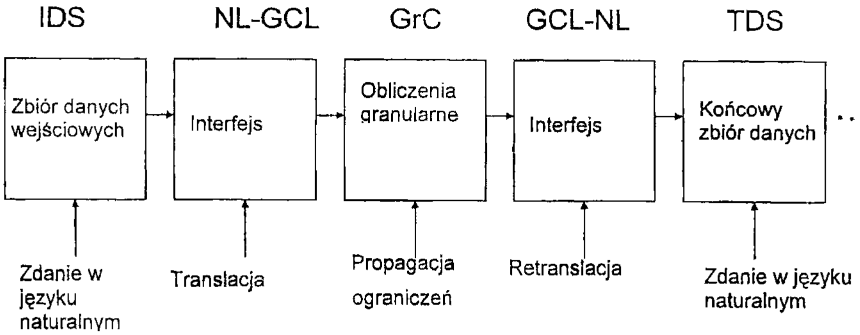
Ten tradycyjny paradygmat był oczywiście stosowany powszechnie od lat i to z dużym powodzeniem, ale przede wszystkim w zadaniach, w których człowiek nie odgrywał roli kluczowego elementu, jak np. przy optymalizaji konstrukcji, sterowaniu rakietami itp.



Rysunek 2. Nowy paradygmat obliczeń na słowach

Zadeh [x] zaproponował inny paradygmat, przedstawiony na Rysunku 2, w którym są znacznie osłabione powyższe wady. Należy go rozumieć następująco. Otóż, na wejściu jest znów człowiek. Nie zmuszamy go jednak na siłę do używanie liczb i innych precyzyjnych danych i zależności, ale pozwalamy mu na bezpośrednie użycie określeń w języku naturalnym wszędzie tam, gdzie to tylko jest możliwe. Do „inteligentnego" przetwarzania takich danych używać musimy specyficznych, bardziej „miękkich" środków, które mogą np. dawać wystarczająco dobre, choć niekoniecznie ściśle optymalne rozwiązania, ale za to w krótkim czasie. Te środki podają przy tym otrzymane wyniki w postaci bardziej naturalnej dla sposobu rozumienia ich przez człowieka, jak np. w postaci lingwistycznej, albo np. jako kilka możliwych wyborów o różnych stopniach dobroci. Ponieważ ten paradygmat jest bardziej zbliżony do specyfiki postrzegania, artykulacji i rozumowania człowieka, więc jest duża szansa, że pozwoli on na uzyskanie lepszych wyników w sytuacjach, gdy człowiek jest kluczowym elementem zadania, bo np. jego opinie są istotne, albo np. faktycznym kryterium jakości jest użyteczność danego rozwiązania dla człowieka-odbiorcy.

Nietrudno zauważyć, że jeżeli chcemy zaimplementować taki nowy paradygmat oparty na obliczeniach na słowach, to musimy dysponować narzędziami pozwalającymi na reprezentację i przetwarzanie nieprecyzyjnych informacji lingwistycznych. Taki właśnie aparat podaje Zadeh (patrz książki Zadeha i Kacprzyka [7, 8], w których można znaleźć szczegóły).



Rysunek 3. Schemat ideowy paradygmatu obliczeń na słowach

Najogólniej biorąc, Zadeh wprowadza tzw. doprecyzowany język naturalny (ang. precisiated natural language - PNL), reprezentując stwierdzenia werbalne typu „temperatura jest jest *wysoka*" jako ograniczenia (rozmyte, czyli nieprecyzyjne!) na wartości temperatury, zależności werbalne typu „jeżeli temperatura jest *niska*, to materiał jest *twardy*" jako pewne relacje rozmyte, a sposoby wyznaczania wartości wyjściowych (tu twardości materiału, np. *bardzo miękki*) na podstawie zależności werbalnych i wartości wielkości wejściowej (tu temperatury, np. *bardzo wysoka*), jako pewne schematy wnioskowania przybliżonego (por. książka Kacprzyka [2]). Schemat przepływu informacji paradygmatu obliczeń na słowach można przedstawić jak na Rysunku 3. Na wejściu mamy więc zbiór danych początkowych (IDS – ang. initial data set) zawierający jakieś zdania (stwierdzenia) w języku naturalnym (NL – ang. natural language, a właściwie w PNL), jest to translowane na uogólniony język ograniczeń

(GCL – ang. generalized constraint language), bo – jak już wspominaliśmy – stwierdzenia co do wartości jakichś wielkości są utożsamiane z ograniczeniami rozmytymi na te wartości. Potem, przetwarzanie tych ograniczeń, a więc przybliżone wnioskowanie (rozumowanie) odbywa się z użyciem tzw. obliczeń granularnych (GrC – ang. granular computing) – por. Pedrycz [x]. Potem następuje retranslacja otrzymanych wyników na zbiór danych końcowych (TDS – ang. terminal data set) będących stwierdzeniami w doprecyzowanym języku naturalnym.

Paradygmat obliczeń na słowach – w postaci jawnej lub nie – znalazł liczne zastosowania, m.in. w sterowaniu rozmytym, modelowaniu rozmytym, podejmowaniu decyzji, rozpoznawaniu obrazów, uczeniu maszynowym, bazach danych i wyszukiwaniu informacji itp.. Najpełniejszym źródłem informacji na ten temat jest drugi tom książki Zadeha i Kacprzyka [8].

W podejściu Zadeha, punktem wyjścia do obliczeń na słowach jest pojęcie *granuły*, która jest właściwie rozmytym zbiorem punktów o pewnym podobieństwie. Słowo, w, jest etykietą granuły, g, a g is denotacją w; często g i w są tak samo oznaczane (np. "młody"). W obliczeniach na słowach granuła, g, będąca denotacją słowa, w, jest traktowana jako ograniczenie rozmyte na zmienną. Kluczową rolę odgrywa oczywiście propagacja rozmytego ograniczenia od przesłanki do wniosku..

Danymi początkowymi mogą być stwierdzenia (ograniczenia) proste typu "X is R" lub warunkowe typu "if X is R then Y is S", przym czym możliwe są jeszcze dodatkowe elementy, odpowiadające bogactwu języka naturalnego, jak np. "*jest możliwe/prawdopodobne, że ...*", "*zwykle ...*" itd.

Te stwierdzenia odgrywają rolę przesłanek. Ich propagacja, będąca właściwie sposobem ich praktycznego użycia do formułowania i rozwiązywania danego zadania, sprowadza się do zastosowania pewnego schematu przybliżnowgo wnioskowania (rozumowania), a takich schematów wprowadza się bardzo wiele, jak np.:

- Reguła konjunkcyjna

$$\frac{\begin{array}{l} X \text{ is } A \\ X \text{ is } B \end{array}}{X \text{ is } A \cap B}$$

- Reguła dysjunkcyjna

$$\frac{\begin{array}{l} X \text{ is } A \\ X \text{ is } B \end{array}}{X \text{ is } A \cup B}$$

- Ugogólniony *modus ponens*

$$\frac{\begin{array}{l} X \text{ is } A \\ \text{IF } X \text{ is } B \text{ THEN } Y \text{ is } C \end{array}}{Y \text{ is } A \circ ((\neg B) \oplus C)}$$

- Reguła z kwantyfikatorami lingwistycznymi,

$$\frac{\begin{array}{l} \text{"}Q_1\ A\text{'s are } B\text{'s} \\ Q_2\ (A \text{ and } B)\text{'s are } C\text{'s} \end{array}}{(Q_1 \otimes Q_2)\ A\text{'s are } (B \text{ and } C)\text{'s}}$$

gdzie Q_1 i Q_2 są kwantyfikatorami lingwistycznymi (np. większość czy znacznie więcej niż połowa); A, B, i C są relacjami rozmytymi; a $Q_1 \otimes Q_2$ jest iloczynem Q_1 i Q_2 określonym w terminach arytmetyki rozmytej.

Mamy więc środki techniczne, które pozwalają na reprezentację dość szerokiego wachlarza określeń i relacji lingwistycznych, a potem na ich efektywne użycie. Po szczegóły odsyłamy czytelnika do wspomnianych już książek Zadeha i Kacprzyka [x,x].

ZAKOŃCZENIE

W pracy przedstawiliśmy istotę tzw. paradygmatu obliczeń na słowach, zaproponowanego w połowie lat dziewięćdziesiątych przez Zadeha. Wydaje się, że będzie on miał olbrzymie znaczenie dla dlalszego rozwoju logiki rozmytej i jej zastosowań. Zresztą, znaczenie tego paradygmatu może wyjść znacznie poza ten obszar, gdyż może on umożliwić formułowanie i rozwiązywanie całego szeregu nietrywialnych zadań praktycznych w sposób naturalny dla ich percepcji przez człowieka. A to może mieć duże znaczenie dla np. akceptacji rozwiązań i przez to ich impementowalności.

LITERATURA

[1]. Driankov D., H. Hellendoorn i M. Reinfrank, *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer-Verlag, Berlin, 1993 (tłumaczenie polskie: WNT, Warszawa, 1996).

[2]. Kacprzyk J., *Zbiory Rozmyte w Analizie Systemowej*. PWN, Warszawa, 1986.

[3]. Kacprzyk J., *Multistage Fuzzy Control*. Wiley, Chichester, 1997.

[4]. Pedrycz W., *Granular Computing: An Emerging Paradigm*. Physica-Verlag (Springer-Verlag), Heidelberg i Nowy Jork, 2001.

[5]. Zadeh L.A., *Fuzzy sets*. Information and Control 8, 1965, 338--353.

[6]. Zadeh L.A. i J. Kacprzyk (pod red.), *Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty*, Wiley, Nowy Jork, 1992.

[7]. Zadeh L.A. i J. Kacprzyk (pod red.), *Computing with Words in Information/Intelligent Systems. Part 1. Foundations*. Physica-Verlag (Springer-Verlag), Heidelberg i Nowy Jork, 1999.

[8]. Zadeh L.A. i J. Kacprzyk (pod red.), *Computing with Words in Information/Intelligent Systems. Part 2. Applications*, Physica-Verlag (Springer-Verlag), Heidelberg i Nowy Jork, 1999.