

Prof. Dr hab. inż. Iwan Leonowicz
Białoruski Narodowy Uniwersytet Techniczny
Dr inż. Sergiej Bogdanowicz
«BIEŁDORCENTR»
Mińsk
Republika Białoruś

NOWE ZASADY OPRACOWANIA SYSTEMÓW ZARZĄDZANIA STANEM NAWIERZCHNI

NEW PRINCIPLES OF DEVELOPMENT OF PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEMS

Streszczenie

Dane wyjściowe dla funkcjonowania systemu zarządzania stanem nawierzchni drogowych zapewnia diagnostyka dróg samochodowych. Przy stosowaniu diagnostyki wyróżnia się dwa rodzaje prac: badania instrumentalne i badania wizualne.

Postęp w rozwoju techniki doprowadził do tego, że pomiary instrumentalne podstawowych wskaźników dróg samochodowych stają się coraz dokładniejsze. Jednak koszt służącego do nich sprzętu jest bardzo wysoki, co często czyni wykorzystanie go niedostępnym dla służb drogowych. Jedynym realnym rodzajem badania w takim przypadku staje się badanie wizualne. Ale badanie takie posiada szereg wad, z których główną jest niska dokładność określenia charakterystyk ilościowych defektów. W celu przezwyciężenia tego problemu w ostatnich latach pojawiają się różne zaawansowane technologicznie wynalazki, u podstaw których leży zastosowanie zdjęć z cyfrowej kamery video, analiza komputerowa zapisu video oraz automatyczne lub półautomatyczne określenie rodzajów i rozmiarów defektów. W efekcie dokładność określenia zakresu defektów wzrasta, ale koszt sprzętu wzrasta jeszcze bardziej: cena najdoskonalszych zestawów technologicznych tego rodzaju sięga setek tysięcy euro. W ten sposób zbadanie stanu nawierzchni pod kątem uszkodzeń przechodzi z kategorii wizualnej do kategorii instrumentalnej i także staje się słabo dostępne.

Możliwym wyjściem w tej sytuacji jest rezygnacja z dokładnego ilościowego określenia rozmiaru defektów i przejście do jakościowej oceny stanu nawierzchni.

Wykorzystanie pojęcia zmiennej lingwistycznej i logiki rozmytej pozwala operować ocenami jakościowymi z takim samym powodzeniem, jak zwykłymi wskaźnikami liczbowymi.

W artykule wyjaśniono podstawowe zasady i przykłady zastosowania zmiennych lingwistycznych i logiki rozmytej przy opracowaniu systemu zarządzania stanem nawierzchni.

Abstract

Initial data for operation of a pavement management system are provided by diagnostics of highways. It is common practice to distinguish between two types of work when performing the diagnostics: instrumental inspection and visual inspection.

The progress in engineering resulted in greater accuracy of instrumental measurements of basic highway parameters. However, the cost of such equipment is very high and in many cases this makes its application by road administrations inaccessible. If this is the case, a single real type of inspection will be visual inspection. Though, such inspection has a number of drawbacks, the major of them being low level of accuracy in determining quality characteristics of defects. Various high-tech developments have appeared over recent years to overcome this drawback. They are based on use of digital video recording, computer-aided analysis of video images and automatic or semi-automatic determination of defects and their quantity. As a consequence, accuracy of determining defects quantity increases but so does the cost of equipment and even more: the price for the most advanced specimen of similar equipment come up to hundreds thousand euros. Thus, defect inspection of highway pavements transfers from the range of visual to the range of instrumental inspection and becomes hardly accessible as well.

The possible way out of this situation may lie in rejection of accurate quantitative determination of defect quantity and transition to the qualitative assessment of pavement condition.

Utilizing the concepts of a linguistic variable and fuzzy logic enables operation with qualitative assessments as successfully as with numeric indicators.

The article discusses basic principles and examples of utilizing linguistic variables and fuzzy logic in development of a pavement management system.

Wprowadzenie

Wpływ transportu i środowiska otaczającego prowadzi do pogorszenia jakości użytkowej dróg i ich stopniowej degradacji. W celu zapewnienia bezpiecznych i komfortowych warunków ruchu, drogi należy remontować. Cechą szczególną remontu dróg jest duże zużycie materiałów budowlanych i, w rezultacie, wysokie koszty.

W sytuacji ograniczonego finansowania robót drogowych problemem bardzo aktualnym staje się optymalny podział posiadanych środków. Zadanie to rozwiązywane jest przy wykorzystaniu systemów zarządzania stanem nawierzchni.

Obecnie istnieje na świecie bardzo wiele tego rodzaju systemów. Wszystkie systemy łączy jednak podobne podejście do problemu opracowania. Wykorzystanie logiki rozmytej przy opracowaniu systemu dla poziomu sieci pozwala uprościć wiele skomplikowanych algorytmów, a także obniżyć koszty gromadzenia danych wyjściowych.

Dane wyjściowe systemu zarządzania

Podstawowe dane wyjściowe dla działania systemu zarządzania stanem nawierzchni daje diagnostyka dróg samochodowych. Podczas realizacji diagnostyki przyjęto wyróżniać dwa rodzaje prac: badanie instrumentalne i badanie wizualne.

Przy badaniu instrumentalnym wykonywane są pomiary równości, trwałości, szorstkości. Postęp w dziedzinie elektroniki i techniki instrumentalnej doprowadził do tego, że pomiary instrumentalne wskaźników stanu drogi samochodowej stają się coraz dokładniejsze. Jednak koszty środków instrumentalnych diagnostyki dróg wynoszą dziesiątki i setki tysięcy euro, co czyni ich zastosowanie nie zawsze możliwym. Najbardziej dostępnym rodzajem badania w danym przypadku jest badanie wizualne.

Mimo swej pozornej prostoty, badanie wizualne jest najbardziej skomplikowanym i najtrudniejszym do wykonania rodzajem pracy. W szeregu przypadków skomplikowana okazuje się klasyfikacja defektu do tej czy innej grupy. A trudność pracy polega na konieczności określania rozmiaru defektów. Podczas gdy określenie rozmiaru defektu linowego nie stanowi szczególnego problemu, to już przy określeniu rozmiarów defektu, który posiada powierzchnię, należy wykonać w pamięci działanie matematyczne – mnożenie. Jeśli takie defekty zdarzają się na powierzchni dość często, to konieczność ciągłego mnożenia prowadzi do szybkiego zmęczenia aparatu myślowego. W rezultacie szybkość reakcji u osoby, wykonującej badanie, obniża się, pojawia się dążenie do zaokrąglania wszystkich rozmiarów do 5 lub 10, dokładność określenia rozmiarów znacznie się zmniejsza.

W celu zniwelowania niedostatków badania wizualnego w ostatnich latach pojawiają się rozmaite wysoko technologiczne wynalazki, u podstaw których leży wykorzystanie cyfrowych zdjęć video, analiza komputerowa obrazu video i automatyczne lub półautomatyczne określenie defektów i ich skali. W charakterze przykładu można przywołać laboratorium ARGUS lub nowy wynalazek firmy Greenwood Engineering – Pavement Surface Imaging.

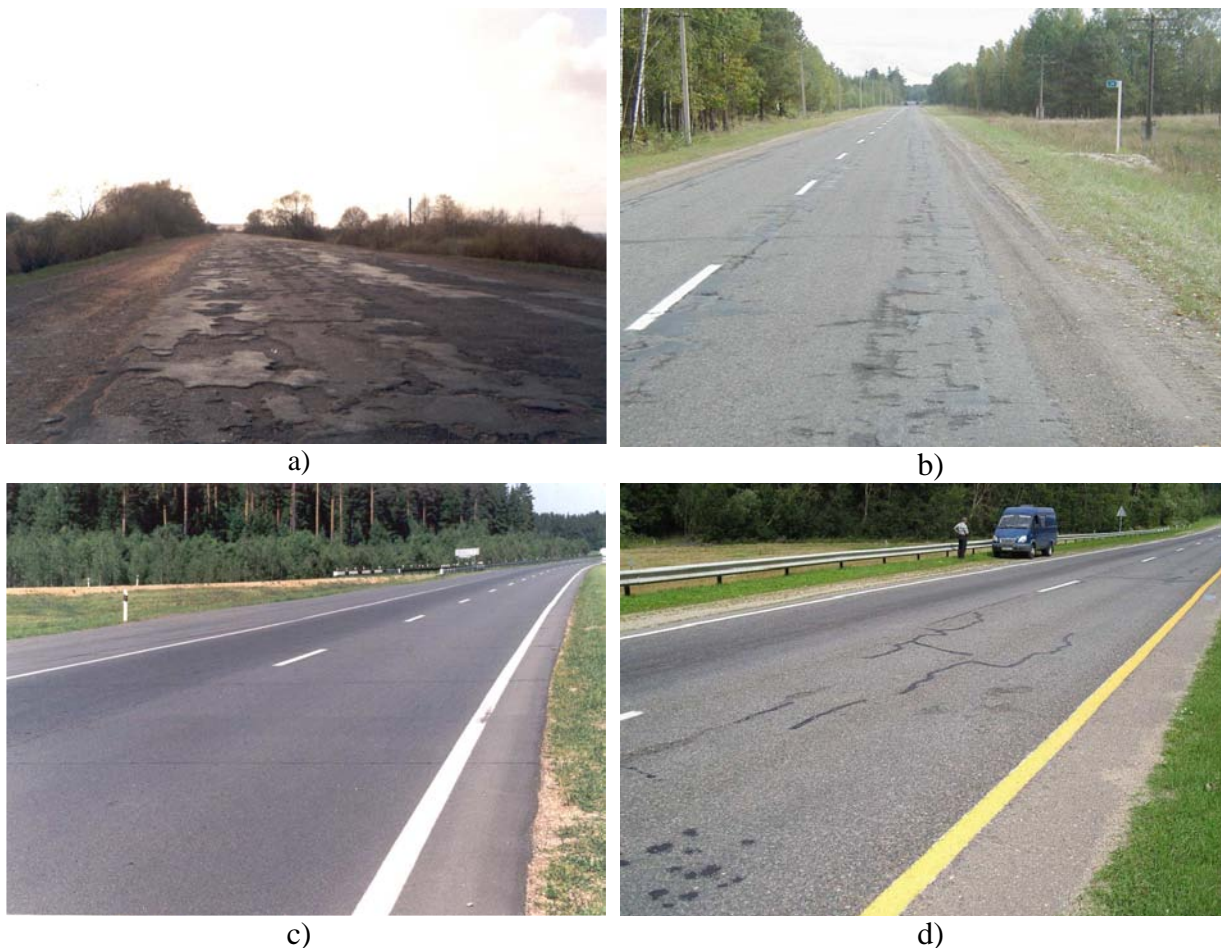
Wady i cechy charakterystyczne oceny wizualnej

Diagnostyka nie kończy się na wykonaniu pomiarów. Po nich następuje ocena stanu nawierzchni i podjęcie decyzji o konieczności podjęcia i rodzajach prac remontowych. Na tym etapie także występują trudności, związane z badaniem wizualnym. Podczas gdy przy opracowaniu i ocenie rezultatów badań instrumentalnych mamy do czynienia tylko z jednym wskaźnikiem, to w przypadku badania wizualnego trzeba się liczyć z dużą ilością rodzajów defektów. Charakteryzowanie nawierzchni za pomocą wielu różnych wskaźników jest trudniejsze. W celu rozwiązania problemu wprowadza się na przykład pojęcie zakresu defektu, który stanowi stosunek uszkodzonej powierzchni nawierzchni do ogólnej powierzchni nawierzchni na danym odcinku, wyrażony w procentach. Decyzja o rodzaju prac remontowych podejmowana jest w zależności od zakresu defektu. Na przykład przy zakresie defektu nawierzchni powyżej 3% konieczne jest wykonanie utrwalenia powierzchniowego, a przy zakresie defektu powyżej 5% – układanie warstwy asfaltowej. Poza wskaźnikiem zakresu defektu mogą być stosowane także inne wskaźniki, które różnymi metodami łączą w sobie kilka specyficznych rodzajów defektów.

Praca z jednym wskaźnikiem zamiast 10-15 różnych jest znacznie wygodniejsza, jednak wskaźnik zakresu defektu posiada szereg poważnych niedostatków. Nieokreślony jest sposób przejścia od defektów o charakterze linearnym do powierzchni defektu. Drugą nieokreśloną jest nierównoznaczność oddzielnych defektów. Na przykład w przypadku obecności 100 szczelin na całą szerokość nawierzchni na odcinku

drogi o długości 1 km zakres defektu wyniesie 5%. Przy obecności na takim samym odcinku 200 wybojów o powierzchni 1 m² każdy, zakres defektu wyniesie jedynie 2,6%. Jeżeli podejść do tego formalnie, to okaże się, że stan pierwszego odcinka jest gorszy. Jednak po pierwszym odcinku bez problemu można jeździć nie zmniejszając prędkości, a drugi okazuje się praktycznie nieprzejezdny. Ale jeżeli poddać oglądowi wizualnemu oba odcinki, to łatwo stwierdzić, że stan drugiego odcinka jest gorszy i wymaga on natychmiastowego remontu. To tylko jeden najprostszy przykład.

W charakterze innego przykładu rozpatrzmy rysunek 1. Na podstawie zdjęcia a) można od razu i jednoznacznie stwierdzić, że stan nawierzchni jest bardzo zły. W danym przypadku trudno nawet określić, jakie właściwie defekty występują.



Rys. 1. Stan nawierzchni: a) Bardzo zły; b) Zły; c) Bardzo dobry; d) Niezbyt dobry

Nawierzchnia, przedstawiona na zdjęciu b), wizualnie odbierana jest lepiej niż a). Jednak z uwzględnieniem znacznej ilości szczelin i łat, głębokiego wykruszenia, stan nawierzchni można scharakteryzować jako „zły”.

Nawierzchnia na zdjęciu c) praktycznie nie ma uszkodzeń. Stan można określić jako „bardzo dobry” lub nawet „idealny”. Dla bardziej szczegółowej oceny należy przeprowadzić porównanie z innymi przykładami stanu nawierzchni.

Na zdjęciu d) na nawierzchni występują oddzielne pęknięcia, zalane mastyką. Innych uszkodzeń nie ma. W porównaniu do odcinków na zdjęciach a)-c) stan można scharakteryzować jako „niezbyt dobry”.

Występuje tu paradoks: profesjonalista poddaje oglądowi odcinek drogi i z prawie stuprocentową pewnością rezultatu mówi o jego stanie i koniecznym rodzaju remontu, a przy diagnostyce tradycyjnej niezbędne jest wykonanie badania, następnie analizy na podstawie skomplikowanego algorytmu, a w efekcie prawidłowość rezultatu pozostaje wątpliwa.

Niedokładność myślenia i logika rozmyta

Wyjaśnienie paradoksu związane jest uwzględnieniem cech charakterystycznych ludzkiego myślenia. Zgodnie ze swoją naturą, dowolna ocena stanowi przybliżenie. W wielu przypadkach wystarczy bardzo przybliżona charakterystyka zestawu danych, ponieważ w większości podstawowych zadań, rozwiązywanych przez człowieka, nie jest wymagana wysoka dokładność. Mózg ludzki wykorzystuje dopuszczalność takiej niedokładności, kodując informację, „wystarczającą do rozwiązania”, elementami rozmytych zbiorów, które tylko w przybliżeniu opisują dane wyjściowe. Potok informacji, napływający do mózgu przez organy wzroku, słuchu, dotyku i inne, zwięża się w cienką strużkę informacji, niezbędnej do rozwiązania postawionego zadania z minimalnym stopniem dokładności. Jeżeli w procesie badania wizualnego stanu nawierzchni postawione zostanie zadanie nieokreślenia rozmiarów poszczególnych defektów, a oceniać stan nawierzchni w całości według pewnej skali jakościowej, to będziemy mieli do czynienia ze swego rodzaju „czarną skrzynką”, do którego wchodzi informacja wizualna, a wychodzi – ocena jakościowa. Sposób obróbki informacji wewnątrz „czarnej skrzynki” nie jest znany, możemy tylko snuć przypuszczenia na temat algorytmów obróbki.

Logicznie byłoby zapytać: czy warto narzucać przy badaniu wizualnym człowiekowi zadanie określenia rozmiarów defektu, z którym – jak wiadomo – nie jest on w stanie poradzić sobie dobrze? Czy też zlecić mu zadanie oceny jakościowej, które jest on zdolny wypełnić lepiej od komputera?

Odpowiedź na pytanie zależy od sposobu wykorzystania informacji diagnostyki wizualnej. Istnieją dwa podstawowe kierunki wykorzystania tej informacji. W pierwszym przypadku znaczenia poszczególnych defektów wykorzystywane są do prognozowania równości i dalszego wyznaczania remontów na podstawie tego wskaźnika. W przypadku drugim prognoza równości dokonywana jest jako funkcja czasu, a dane badania wizualnego wykorzystywane są jako pomocnicze, dookreślające, np. po przeliczeniu ich na wskaźnik zakresu defektu. Przy takim zastosowaniu danych nie istnieją żadne poważne argumenty, przemawiające na korzyść wykorzystania ilościowego wskaźnika „zakres defektu” i rezygnacji z oceny jakościowej. Jednak ocena jakościowa najczęściej spotyka się z negatywnym stosunkiem ze strony specjalistów-drogowców.

Wyjaśnić taką sytuację można w następujący sposób. Zasady myślenia naukowego i działalności inżynierskiej rozumienie każdego zjawiska utożsamiają z możliwością jego analizy ilościowej. Pozorna niemożność połączenia analizy jakościowej i ilościowej prowadzi do tego, że ta ostatnia uznawana jest za wadliwą, niedającą się połączyć z praktyką inżynierską.

Określenie „pozorna” zostało tu użyte nieprzypadkowo. Jeszcze na początku lat 70-tych ubiegłego wieku pojawiły się prace naukowe, które odkryły najszerze możliwości w dziedzinie operowania charakterystykami jakościowymi w taki sam sposób, jak można to robić ze zwykłymi zmiennymi liczbowymi. Związane są one z nazwiskiem amerykańskiego matematyka Lotfiiego Zadeha i zaproponowaną przez niego koncepcją zmiennej lingwistycznej i logiki rozmytej [1,2].

Wykorzystanie charakterystyk jakościowych pozwala z powodzeniem dokonywać analizy inżynierskiej w systemach zarządzania stanem nawierzchni.

Logika rozmyta jest jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków nowoczesnej teorii zarządzania. Na świecie co roku wydawane są setki książek i dziesiątki specjalistycznych czasopism, poświęconych zarówno teorii logiki rozmytej, jak i zagadnieniom jej zastosowania.

U podstaw logiki rozmytej leży teoria zbiorów rozmytych, gdzie funkcja przynależności elementu do zbioru nie jest binarna (tak / nie), lecz może przyjmować dowolną wartość w zakresie 0-1. Umożliwia to określenie pojęć, niedokładnych ze swej natury: „dobry”, „wysoki”, „słaby” itd. Logika rozmyta pozwala przeprowadzać na takich wielkościach cały szereg operacji logicznych: dysjunkcja, koniunkcja, negacja i in. Logika rozmyta umożliwia tworzenie z baz wiedzy systemów eksperckich nowego pokolenia, zdolnych do przechowywania i obróbki niedokładnych informacji.

W porównaniu z tradycyjnymi metodami analizy i podejściem hipotetycznym (prawdopodobnościowym), metody zarządzania rozmytego pozwalają szybko dokonywać analizy zadania i uzyskiwać rezultaty o wysokiej dokładności. Cechą charakterystyczną algorytmów rozwiązywania zadań metodami logiki rozmytej jest istnienie pewnego zestawu twierdzeń (reguł); każde twierdzenie składa się z całości zdarzeń (warunków) i rezultatów (wniosków).

Przykład zastosowania logiki rozmytej

Rozpatrzmy najprostszy przykład wykorzystania zmiennych rozmytych przy określaniu konieczności remontu odcinka drogi.

Decyzja o konieczności przeprowadzenia prac remontowych będzie opierać się na obliczalnym kryterium (P) dla każdego odcinka. Kryterium mierzone jest w procentach i określane na podstawie rozmytych (subiektywnych) ocen charakterystyk odcinka drogi. Jeżeli $P=100\%$, to odcinek wymaga remontu, jeżeli $P=0\%$ – remont nie jest konieczny.

Będziemy korzystać z następujących charakterystyk odcinka drogi:

Stan nawierzchni (zakres defektu)	Wzdłużna równość nawierzchni	Przekonanie o konieczności remontu (P)
Idealny (1)	Dobra (1)	Pełne (5)
Bardzo dobry (2)	Niezbyt dobra (2)	Średnie (4)
Dobry (3)	Zła (3)	Małe (3)
Niezbyt dobry (4)	Bardzo zła (4)	Bardzo małe (2)
Zły (5)		Brak (1)

Proces wnioskowania rozmytego składa się z pięciu etapów.

1. Określenie i interpretacja zmiennych wejściowych i ich granic.
2. Określenie i interpretacja zmiennych wyjściowych i ich granic.
3. Określenie funkcji przynależności dla każdej zmiennej wejściowej i wyjściowej.
4. Zestawienie bazy reguł, która będzie odpowiadać za operacje zarządzające.
5. Przejście od niedokładności do konkretnych wartości liczbowych.

W naszym przypadku istnieją 2 dane wejściowe.

Stan nawierzchni (zakres defektu 0%-100%):

Charakterystyka lingwistyczna	Wartość dolna	Wartość górna
Idealny	0	5
Bardzo dobry	3	10
Dobry	5	15
Niezbyt dobry	10	30
Zły	15	40

Równość nawierzchni (m/km):

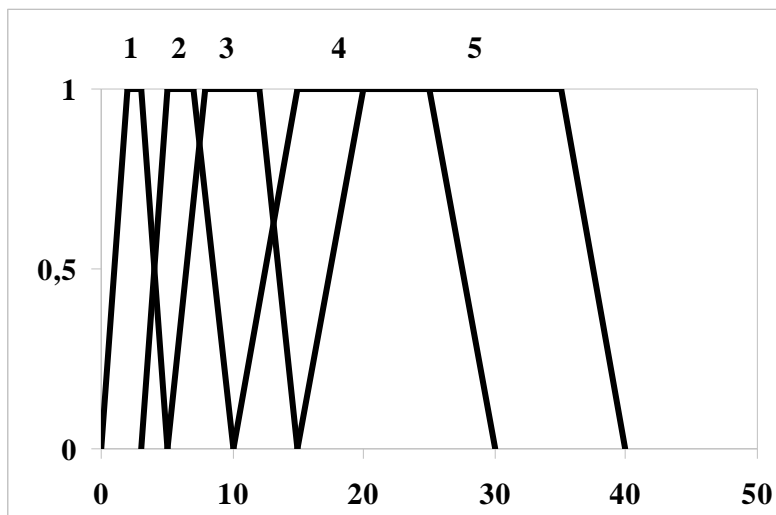
Charakterystyka lingwistyczna	Wartość dolna	Wartość górna
Dobra	2	4
Niezbyt dobra	3	6
Zła	4	8
Bardzo zła	6	12

Istnieje jedna zmienna wyjściowa.

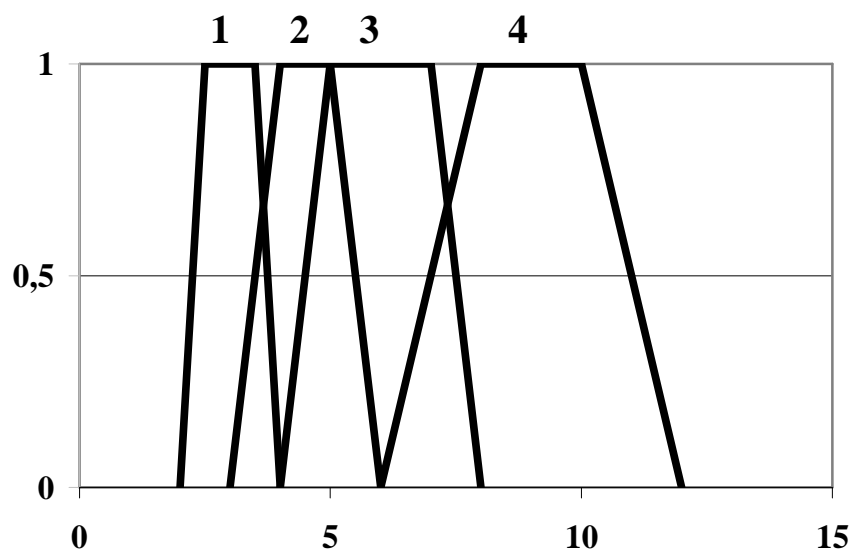
Charakterystyka przekonania o konieczności remontu P (0%-100%):

Charakterystyka lingwistyczna	Wartość dolna	Wartość górna
Pełne	80	100
Średnie	60	85
Małe	35	65
Bardzo małe	20	40
Brak	0	25

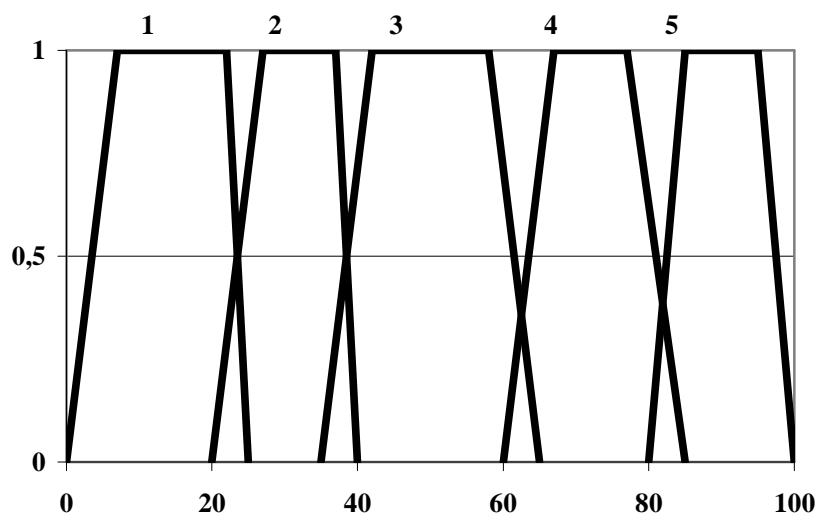
Graficznie przedstawimy funkcję przynależności dla zmiennych wejściowych (rys. 2, 3) i dla zmiennej wyjściowej (rys. 4). Wartości dolne i górne określają trapezoidalną funkcję przynależności dla każdej zmiennej wejściowej i wyjściowej.



Rys. 2. Funkcja przynależności dla oceny stanu nawierzchni



Rys. 3. Funkcja przynależności dla oceny równości nawierzchni



Rys. 4. Funkcja przynależności dla przekonania o konieczności remontu

Baza twierdzeń, odpowiadająca za operacje zarządzające, wygląda następująco:

	Równość	Dobra	Niezbyt dobra	Zła	Bardzo zła
Stan					
Idealny		Brak	Brak	Bardzo małe	Małe
Bardzo dobry		Brak	Brak	Małe	Średnie
Dobry		Brak	Bardzo małe	Średnie	Pełne
Niezbyt dobry		Bardzo małe	Średnie	Pełne	Pełne
Zły		Średnie	Średnie	Średnie	Pełne

Każda komórka bazy twierdzeń określana jest jako złożenie (logiczne I) wejść, żeby określić poszczególne wyjście.

Na przykład zaznaczona komórka oznacza:

Jeżeli (stan) = (niezbyt dobry) **I** (równość) = (bardzo zła)

To (przekonanie o konieczności remontu) = (pełne)

Rozpatrzmy przykład przejścia od niedokładności do konkretnych wartości liczbowych. Założymy, że zakres defektu nawierzchni = 12%, a równość = 5 m/km.

Konieczne jest określenie, jaka funkcja przynależności jest wykorzystywana i w jakim stopniu. Z grafików funkcji przynależności widać, że w danym przypadku wykorzystywane są 4 funkcje przynależności:

- Dobry stan
- Niezbyt dobry stan
- Niezbyt dobra równość
- Zła równość.

W bazie twierdzeń zaangażowane są 4 twierdzenia:

	Równość	Dobra	Niezbyt dobra	Zła	Bardzo zła
Stan					
Idealny		Brak	Brak	Bardzo małe	Małe
Bardzo dobry		Brak	Brak	Małe	Średnie
Dobry		Brak	Bardzo małe	Średnie	Pełne
Niezbyt dobry		Bardzo małe	Średnie	Pełne	Pełne
Zły		Średnie	Średnie	Pełne	Pełne

Zmieszamy znaczenia funkcji przynależności, wykorzystując logiczne „I”.

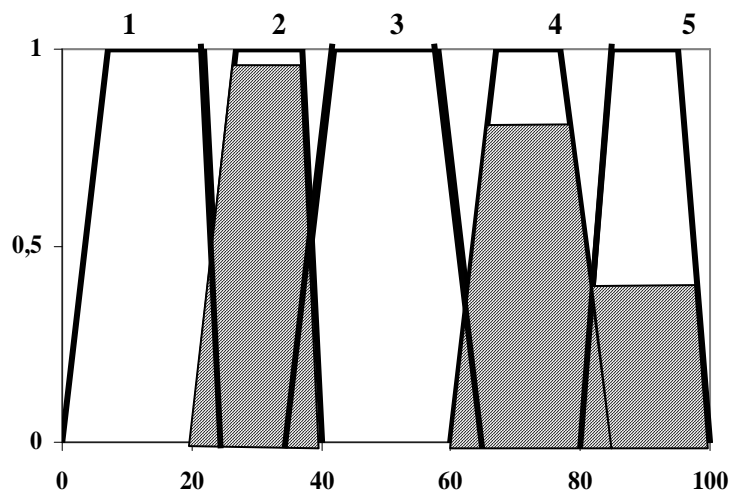
Twierdzenie 1. (F – dobry) I (F – niezbyt dobra) = min (0,95, 1) = 0,95

Twierdzenie 2. (F – dobry) I (F – zła) = min (0,95, 0,8) = 0,8

Twierdzenie 3. (F – niezbyt dobry) I (F – niezbyt dobra) = min (0,4, 1) = 0,4

Twierdzenie 4. (F – niezbyt dobra) I (F – zła) = min (0,4, 0,8) = 0,4

Otrzymane wielkości określają sferę przecięcia dla wartości wyjściowych. Sfery przecięcia pokazane są w diagramie funkcji przynależności dla pewności wyboru (Rys. 5).



Rys. 5. Sfera przecięcia wartości wyjściowych

Określmy średnią wartość funkcji przynależności według wzoru:

$$C = \frac{\sum X_i * \mu_A}{\sum \mu_A}, \quad (1)$$

gdzie μ_A – wartość funkcji przynależności według każdego z twierdzeń;

X_i – wartość kryterium P, odpowiadająca funkcji przynależności charakterystyki lingwistycznej.

Dla rozpatrywanego przykładu:

$$C = \frac{0.95 * 27 + 0.8 * 66 + 0.4 * 63 + 0.4 * 83}{0.95 + 0.8 + 0.4 + 0.4} = 54\%$$

W ten sposób, przy zakresie defektu nawierzchni 12% i równości 5 m/km oraz przyjętym systemie zmiennych i twierdzeń, wskaźnik przekonania o konieczności przeprowadzenia remontu wynosi 54%.

W analogiczny sposób można wykorzystać w procesie analizy nieograniczoną ilość wskaźników stanu nawierzchni. Przedstawione podejście jest szczególnie perspektywiczne dla dróg lokalnych, dla których wysoka dokładność obliczeń nie jest bardzo ważna.

Wnioski

Na podstawie przedstawionego materiału można wyciągnąć następujące podstawowe wnioski:

- Ocena wizualna stanu nawierzchni posiada szereg istotnych wad. Wykorzystanie oceny jakościowej pozwala ich uniknąć.
- Wykorzystanie zmiennych lingwistycznych i logiki rozmytej daje podstawę do wykorzystania oceny jakościowej stanu nawierzchni w analizie inżynierskiej.
- Wykorzystanie zmiennych lingwistycznych w systemie zarządzania stanem nawierzchni pozwala zmniejszyć koszt gromadzenia danych i uprościć algorytmy obliczeń.

Literatura

1. Zadeh L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes.- IEEE Transactions System, Man Cybernetics, SMC-3, 1973, 1, 28-44
2. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, Part I: Inf. Sci. 8, 199-249, 1975; Part II: Inf. Sci. 8, 301-357, 1975; Part III: Inf. Sci. 9, 43-80, 1975