

## WYKORZYSTANIE TECHNIK MODELOWANIA W METODYCE DIAGNOZOWANIA ERGONOMICZNEGO UKŁADU OPERATOR-MASZYNA-OTOCZENIE

### Streszczenie

Przedstawiono problemy diagnozowania ergonomicznego układu operator–pojazd–otoczenie. Podstawą sformułowanych założeń metodycznych procedur diagnozowania ergonomicznego były badania własne i przegląd literatury, w wyniku czego opracowano dwie autorskie metody oceny: *wagową*, *wagowo-rozmytą*. Określają one globalnym współczynnikiem diagnozy poziom ergonomicznej jakości układu. Podstawą proponowanych metod są badania ankietowo-ekspertowe, w wyniku których uzyskuje się cechy priorytetowe i ich wagi, charakteryzujące czynniki: ludzki, konstrukcyjno-techniczny i materialnego środowiska pracy oraz częściowe wskaźniki poziomu ergonomicznej jakości. Warunkiem zastosowania metody *wagowo-rozmytej* było opracowanie lingwistycznego modelu heurystycznego oceny (z wykorzystaniem implikacji w dziedzinie zbiorów rozmytych). Metodę *wagową* i *wagowo-rozmytą* zweryfikowano na przykładzie stanowisk pracy w lokomotywach elektrycznych, tworząc zbiór cech priorytetowych i ich wag dla badanej grupy pojazdów.

**Słowa kluczowe:** diagnoza ergonomiczna, układ operator - pojazd - otoczenie, modelowanie, zbiory rozmyte

### Wykaz oznaczeń

- $D(a_i)$  - odchylenie standardowe wagi  $a_i$   
 $a_i$  - średnia waga  $i$ -tej cechy  
 $a_{ij}$  - waga  $i$ -tej cechy nadana przez  $j$ -tego eksperta  
 $m$  - liczba ankiet, na podstawie której szacuje się wartość średnią  
 $Q_j$  - uogólniony wagowy współczynnik oceny  $j$ -tego czynnika  
 $a_i$  - waga  $i$ -tej cechy  
 $M_i$  - ocena  $i$ -tej cechy  
 $Q_1$  - uogólniony wagowy współczynnik oceny „czynnika ludzkiego”  
 $Q_2$  - uogólniony wagowy współczynnik oceny „czynnika konstrukcyjno-technicznego”  
 $Q_3$  - uogólniony wagowy współczynnik oceny „czynnika materialnego środowiska pracy”

## Wstęp

W procesie diagnozowania ergonomicznego najtrudniejszym elementem do oceny jest człowiek. W każdej analizie dotyczącej jego funkcjonowania w złożonych układach, uwzględniającej związki zachodzące między użytkownikiem, maszyną i otoczeniem, należy brać pod uwagę naturalną losowość procesów percepcyjnych człowieka [Evans, Karwowski1998] oraz ich silną zależność od różnych czynników. Zastosowanie technologii informatycznych ułatwia analizę omawianych zagadnień. Znaczącą rolę w tych badaniach odgrywają modele matematyczne, używane do procesów symulacji, dostarczając istotnych informacji zarówno na etapie kształtowania układu człowiek-maszyna-otoczenie, jak również podczas eksploatacji. Pojęcie „otoczenie” obejmuje czynniki fizyko-chemiczne występujące na stanowisku pracy i w artykule utożsamiane jest z pojęciem materialnego środowiska pracy. Metody wykorzystujące modelowanie i symulacje natrafiają na duże trudności, w przypadku, gdy wykraczają poza zagadnienia czysto geometryczne i mechaniczne. Pewnym sposobem przewyżczenia tych trudności jest modelowanie rozmyte (na bazie teorii zbiorów rozmytych). Modele te mogą odzwierciedlać działanie człowieka przy użyciu opisu słownego, sformułowanego przez eksperta (często modele rozmyte nazywane są modelami lingwistycznymi) [Yager 1995], [Zadeh 1975]. Opis działania człowieka przedstawiony w formie implikacji z uwzględnieniem zasad logiki rozmytej, z założenia uwzględnia brak "precyzji" w określeniu zachowań człowieka. Diagnozowanie ergonomiczne jest niezbędnym etapem modernizacji kabin pojazdów. Może być ono również narzędziem dla projektanta przy opracowywaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych.

## Założenia metodyczne diagnozowania ergonomicznego

Opracowane założenia metodyczne diagnozowania ergonomicznego dotyczą układu operator- maszyna-otoczenie. Pod pojęciem „maszyna” rozumiane są różnego rodzaju pojazdy, w tym również ciągniki oraz maszyny rolnicze sterowane przez operatora. Poniżej przedstawiono założenia dwóch autorskich metod oceny poziomu ergonomicznej jakości: *wagowej*, *wagowo-rozmytej* [Grabarek 2000, 2003].

- Opracowana metoda diagnozowania powinna mieć charakter uniwersalny, co pozwoliłoby zastosować ją w różnych rodzajach pojazdów.
- Diagnoza końcowa stanowiska pracy operatora obejmować będzie **czynniki**: ludzki, konstrukcyjno-techniczny, materialnego środowiska pracy (otoczenie), których ocena ma charakter jakościowy lub ilościowy.

- Diagnoza wyrażona będzie umownym wskaźnikiem, tzw. globalnym współczynnikiem diagnozy, umożliwiającym porównanie poziomu ergonomicznej jakości stanowisk pracy w pojazdach tego samego rodzaju.
  - Globalny współczynnik diagnozy wyznaczony będzie na podstawie uogólnionych współczynników wagowych określonych dla każdego czynnika.
  - Uogólnione współczynniki wagowe wyznaczone zostaną dla każdego czynnika wg poniższych zasad.
1. Udział czynników (ludzkiego, konstrukcyjno – technicznego, materialnego środowiska pracy) w sformułowaniu globalnego współczynnika diagnozy jest jednakowy (obecny stan wiedzy nie pozwala na racjonalne zróżnicowanie ich udziału; w literaturze znaleźć można tylko nieliczne badania dotyczące tego zagadnienia [Tytyk 1991, 2001]).
  2. Każdy czynnik opisany jest cechami wartościującymi jego poziom ergonomicznej jakości.
  3. Liczba i rodzaj cech opisujących poszczególne czynniki determinuje specyfika diagnozowanego stanowiska.
  4. Cechy nazwane priorytetowymi, jakościowo i ilościowo tworzą zbiór stosowany zarówno do oceny ustalonych czynników, jak i w formułowaniu końcowej diagnozy ergonomicznej.
  5. Różnicowanie cech każdego czynnika następuje przez nadanie im wag przez ekspertów.
  6. Cechy priorytetowe i przynależne im wagi określone na podstawie wyników badań ankietowo–ekspertowych.
  7. Wartości wag dla poszczególnych cech są wynikiem uśrednienia wartości uzyskanych z tych badań.
  8. Wagi są zmiennymi losowymi. Odchylenie standardowe wagi obliczane jest zgodnie z zależnością:

$$D(a_i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (a_i - a_{ij})^2}{m(m-1)}} \quad (1)$$

9. Każda cecha podlega ocenie zgodnie z określonym dla niej kryterium ergonomicznym.
10. Przyjęto następujący 4–stopniowy podział kryteriów ocen:
  - 2 - ocena niedostateczna** (stan cechy niedopuszczalny, powodujący niedopuszczalny pracy, stwarzający zagrożenie, dezorganizujący pracę),
  - 3 - ocena dostateczna** (stan cechy powodujący uciążliwość pracy, ale niestwarzający zagrożenia),

- 4 - **ocena dobra** (stan cechy stwarzający minimalną uciążliwość pracy, nie dający jednak poczucia komfortu pracy),
- 5 - **ocena bardzo dobra** (stan cechy nie budzący zastrzeżeń, dający poczucie komfortu).

11. Zaproponowano dwie metody określenia uogólnionych współczynników wagowych:

- W metodzie *wagowej* współczynniki te mają postać:

$$Q_j = \frac{\sum_{i=1}^n a_i M_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (2)$$

- W metodzie *wagowo-rozmytej* uogólnione współczynniki generowane będą z heurystycznego modelu lingwistycznego.

12. Zgodnie z przyjętymi kryteriami ocen, za nie odpowiadające wymaganiom ergonomicznym uzna się te stanowiska, na których chociaż jedna z cech uzyska ocenę niedostateczną (2). W takim przypadku zarówno uogólniony współczynnik wagowy jak i współczynnik globalnej diagnozy przyjmują wartość niedostateczną (2). Hipotetycznie ocena niedostateczna oznacza niedopuszczenie stanowiska do eksploatacji aż do momentu poprawienia istniejącego stanu cechy.

13. Dodatkowo na każdym stanowisku pracy należy ocenić te cechy, które mimo że decydują o uciążliwości pracy, nie mogą być zidentyfikowane subiektywnie przez ekspertów, ze względu na nieswoiste ich oddziaływanie. Dotyczy to: infradźwięków, ultradźwięków oraz pól elektromagnetycznych. Poziom cech zmierzonych dodatkowo nie może kształtować się poniżej wartości dopuszczalnych, w przeciwnym razie niezależnie od wartości  $Q_{glob}$  stanowisko nie powinno być dopuszczone do eksploatacji.

14. Końcowa postać globalnego współczynnika diagnozy ergonomicznej –  $Q_{glob}$  określona zostanie wzorem:

$$Q_{glob} = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^3 Q_j}{3} & \wedge_{i,j} M_{ij} \neq 2 \\ 2 & \vee_{i,j} M_{ij} = 2 \end{cases}$$

- Ocena większa lub równa dostatecznej oznacza, że poziom ergonomicznej jakości badanego stanowiska pracy mieści się w przedziale od dostatecznego do bardzo dobrego. Globalny współczynnik diagnozy służy nie tylko do porównania poziomu

ergonomicznej jakości kabiny operatora w różnych egzemplarzach badanego typu pojazdu, ale także do określenia kolejności działań modernizacyjnych w zależności od wagowych współczynników.

### **Metoda wagowo-rozmyta oceny ergonomicznej**

Zgodnie z założeniami, podstawą wyznaczenia uogólnionych współczynników wagowych metodą *wagowo-rozmytą* jest model lingwistyczny Takagi-Sugeno-Kanaga (TSK) [Yager, Filev 1975], wyrażony w postaci implikacji w obszarze logiki rozmytej. Ten sposób określenia uogólnionych współczynników wagowych pozwala na uwzględnienie w nich relacji zachodzących między ocenianymi cechami.

#### **□ Budowa heurystycznego modelu lingwistycznego oceny**

W budowie heurystycznego modelu lingwistycznego założono:

- Każdy czynnik scharakteryzowany został cechami priorytetowymi o odpowiednich wagach,
- Przyjęto 4-stopniową skalę ocen każdej cechy,
- Ocenę końcową nadawano według następującej skali stanów:

2,00	niedopuszczalny
3,00	dopuszczalny
3,25	trochę więcej niż dopuszczalny
3,50	średnio dopuszczalny
3,75	mniej niż dobry
4,00	dobry
4,25	trochę więcej niż dobry
4,50	średnio dobry
4,75	mniej niż bardzo dobry
5,00	bardzo dobry

Poniżej przedstawiono fragment ogólnego modelu lingwistycznego *wagowo-rozmytej* oceny ergonomicznej wyrażonego w postaci implikacji z wykorzystaniem zbiorów i logiki rozmytej:

.....

*Jeżeli* cecha 1 ma ocenę dobrą *i* cecha 2 ma ocenę dostateczną *i* cecha 3 ma ocenę dostateczną *i* .... *to* ocena końcowa czynnika (Q1) jest średnio dopuszczalna

.....

*Jeżeli* cecha 1 ma ocenę dobrą *i* cecha 2 ma ocenę dostateczną *i* cecha 3 ma ocenę dobrą *i* .... *to* ocena końcowa czynnika (Q 1) jest mniej niż dobra.....

□ **Implementacja numeryczna modelu lingwistycznego dla układu maszynista - lokomotywa elektryczna – otoczenie**

Model heurystyczny *wagowo-rozmytej* oceny ergonomicznej został implementowany numerycznie w środowisku Matlab\_Simulink ver. 6.0. Zdekomponowano go na trzy podsystemy:

- oceny cech czynnika ludzkiego (CZL),
- oceny cech czynnika konstrukcyjno-technicznego (CZK-T),
- oceny cech czynnika materialnego środowiska pracy (CZMŚP).

Oceny uzyskane z tych trzech podsystemów były podstawą określenia globalnego współczynnika diagnozy. Zgodnie z przyjętymi kryteriami ocen, za nieodpowiadające wymaganiom ergonomicznym uznano te układy, na których chociaż jedna z cech uzyska ocenę niedostateczną (2). W takim przypadku zarówno uogólniony współczynnik wagowy oceny z danego podsystemu, jak i współczynnik globalnej diagnozy przyjmował wartość niedostateczną (2). W budowie modelu wykorzystano wyniki badań ankietowo-ekspertowych, przeprowadzonych w wybranych typach lokomotyw elektrycznych obecnie eksploatowanych w Polsce. W tabeli 1 przedstawiono cechy i ich wagi dla badanej populacji układów maszynista – lokomotywa - otoczenie.

*Tabela 1. Cechy priorytetowe i ich wagi dla badanej populacji układów maszynista – lokomotywa - otoczenie*

*Table 1. Preferential traits and their weights for tested group of the driver-locomotive-material environment systems*

Rodzaj czynnika	Nazwa cechy priorytetowej	Waga Uśredniona
Czynnik ludzki (CZL)	Kondycja psychofizyczna	4,04
	Przystosowanie do pracy	4,36
	Obciążenie psychiczne	3,10
	Staż pracy	2,11
	Wysiłek fizyczny	1,42
Czynnik konstrukcyjno – techniczny (CZK-T)	Widoczność szlaku	4,72
	Konstrukcja fotela	3,12
	Widoczność urządzeń sterowniczych i sygnalizacyjnych	3,62
	Struktura przestrzenna	2,34
	Rozmieszczenie wyposażenia kabiny	1,21
Czynnik materialnego środowiska pracy (CZMŚP)	Hałas	4,76
	Drgania	3,82
	Mikroklimat	2,39
	Oświetlenie	2,70
	Zanieczyszczenia powietrza	1,34

Model heurystyczny *wagowo-rozmytej* oceny ergonomicznej stanowiska pracy maszynisty wykorzystuje trzy struktury rozmyte (wg schematu Takagi-Sugeno-Kanga), odpowiadające trzem grupom cech. Składowymi wyjściowymi modeli podsystemów są odpowiednio uogólnione

współczynniki wagowe dla CZL, CZK-T i CZMŚP, które wykorzystywane są do obliczenia globalnego współczynnika diagnozy ergonomicznej. W celu porównania uogólnionych współczynników wagowych i globalnego współczynnika diagnozy uzyskanych metodą wagową i wagowo-rozmytą jako dane wejściowe przyjęto oceny cząstkowe dla układów, w których badane były lokomotywy EP-09. Wszystkie uśrednione oceny cząstkowe przekroczyły w tym przypadku wartość 3. W wyniku otrzymano wartości współczynników przedstawione w tabeli 2.

Tablela 2. Zestawienie uogólnionych współczynników wagowych i globalnego współczynnika diagnozy dla układów maszynista - lokomotywa EP-09 -otoczenie uzyskanych dwiema metodami

Table 2. Comparison of generalized evaluation weight rates of the factors and global diagnosis coefficient for the driver-locomotive EP-09 – material environment systems, obtained by two methods

Rodzaj metody oceny	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_{glob}$
Wagowa	4,29	3,84	3,20	3,78
Wagowo-rozmyta	4,18	3,72	3,04	3,65

Zestawienie wykazuje różnice w wartościach odpowiednich współczynników uzyskanych w obu metodach. Wynikają one z odmiennych sposobów otrzymywania współczynników  $Q_j$ . W metodzie wagowej uogólnione współczynniki wagowe uzyskuje się ze wzoru (2), natomiast w wagowo-rozmytej generowane są z modelu lingwistycznego. Model ten w swojej budowie uwzględnia w ocenie relacje zachodzące między cechami w obrębie jednego czynnika, zarówno z punktu widzenia ocen cząstkowych, jak i wag poszczególnych cech. Stąd też ocena wagowo-rozmyta w większym stopniu odpowiada rzeczywistemu poziomowi ergonomicznemu.

### Podsumowanie

Przedstawiona metodyka diagnozowania ergonomicznego została zweryfikowana w badaniach układu maszynista-lokomotywa elektryczna-otoczenie [Grabarek 2003]. Uzyskane wyniki uzasadniają słuszność podjęcia próby jej implementacji w badaniu innych stanowisk operatorowych, jak np. układu operator-maszyna-otoczenie. Konieczne jest jednak przeprowadzenie analizy specyfiki podukładów: maszyna oraz otoczenie, w celu prawidłowego określenia cech priorytetowych.

### Bibliografia

Evans G.W., Karwowski W. 1998. A perspective on mathematical modelling in human factors. Applications of Fuzzy Set Theory In Human Factors, Elsevier

Grabarek I. 2000. *Inquiry Research of Experts as the Basis for the Ergonomic Evaluation of Working Places*. *ERGON – AXIA'2000*, *Proceedings of the Second International Conference on Ergonomics and Safety for Global Business Quality and Productivity*. Central Institute for Labour Protection, 19 – 21.05, Warsaw, pp. 387-390

Grabarek I. 2002. *Ergonomic Diagnosis of the Driver's Workplace in an Electric Locomotive*. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol.8, No. 2: 225-242

Grabarek I. 2003. *Diagnozowanie ergonomiczne układu operator-pojazd szynowy-otoczenie*. *Zeszyty Naukowe Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej*, 51, s. 189

Tytek E. 1991. *Metodologia projektowania ergonomicznego w budowie maszyn*. *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria Rozprawy, nr 252, Poznań*

Tytek E. 2001. *Projektowanie ergonomiczne*. PWN, Warszawa

Yager R.R., Filev D.P. 1995. *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*. WNT, Warszawa

Zadeh L. 1975. *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to approximate reasoning (part I and II)*. *Information Sciences*, 8

## **APPLICATION OF MODELLING TECHNIQUES IN ERGONOMIC DIAGNOSTICS METHODS OF THE OPERATOR – MACHINE – MATERIAL ENVIRONMENT SYSTEM**

### **Summary**

This paper concerns the problems of ergonomic diagnosis in operator – vehicle – environment systems. The author's own research and solutions derived from the literature of the subject served as a basis for formulating the methodical assumptions informing on ergonomic diagnosis procedures. Concerning the procedures author develops two evaluation methods of her own, referred to respectively as the weighted, weighted-fuzzy. These are designed to assess a system's ergonomic level using global diagnosis coefficients. In these two methods, questionnaire/expert based surveys are used to determine the priority features (and their weights) which characterize the human factor, the design/technological factor and the material work environment factor as well as individual ergonomic quality components. To use the weighted-fuzzy method, it was necessary to develop a linguistic heuristic evaluation model (using fuzzy set implications). The weighted and weighted-fuzzy methods were verified using the example of electric locomotives as a set of priority features was created and feature weights were assigned for the studied group of vehicles.

**Key words:** ergonomic diagnosis, operator–vehicle–environment system, modelling, fuzzy sets

*Recenzent – Tadeusz Juliszewski*