

Wykorzystanie zbiorów rozmytych w modelowaniu i symulacji wybranych działań maszynisty

W artykule przedstawiono wyniki zastosowania zbiorów rozmytych i logiki wielowartościowej w modelowaniu oddziaływania maszynisty na wybrane urządzenia sterownicze. Jako parametr charakteryzujący sprawność działania maszynisty przyjęto czas reakcji. Wyniki badań symulacyjnych uzyskano z zastosowania modelu Mamdani'ego i Takagi-Sugeno-Kanga. W modelowaniu uwzględniono wpływ cech charakteryzujących czynniki: ludzki, konstrukcyjno-techniczny i materialnego środowiska pracy na sprawność działania maszynisty i bezpieczeństwo jazdy.

1. Wstęp

Głównym problemem w każdym badaniu ergonomicznym jest umiejętność korzystania zarówno z wiedzy o technice jak i o człowieku oraz materialnym środowisku pracy. Analiza literatury wykazała stosunkowo małą liczbę prac poświęconych modelowaniu działań operatora w układzie operator-pojazd szynowy-otoczenie. Większość badań koncentruje się na modelowaniu i symulacji organizmu człowieka, traktowanego jako układ brył o określonej geometrii, połączonych elementami podatnymi lub więzami mechanicznymi. Tego rodzaju modele pozwalają określić strukturę wymiarową stanowisk pracy lub umożliwić analizę bezpieczeństwa pracy. Badania te na ogół mają charakter fragmentaryczny i nie ukazują całej złożoności działań ludzkich. Z drugiej strony brak jest praw ilościowych określających nie mechaniczne aspekty działania człowieka, które można by wykorzystać w ocenie ergonomicznej złożonych układów. W ostatnich latach pojawiły się trendy zmierzające do modelowania zachowań człowieka w systemach człowiek – maszyna – środowisko technikami heurystycznymi. Takie modele zintegrowane z uprzednio wymienionymi modelami mechanicznymi dają możliwość przewidywania skutków działania człowieka i w konsekwencji pozwalają na suboptymalizację np. z punktu widzenia zapewnienia dużej bezawaryjności systemu człowiek – maszyna – otoczenie [2, 4, 7].

2. Modelowanie i badania symulacyjne układu maszynista – lokomotywa – otoczenie z wykorzystaniem zbiorów rozmytych

Celem modelowania było określenie zależności jakie występują między wybranymi parametrami działania człowieka a warunkami w jakich przebiega jego praca, i w efekcie ich wpływem na proces sterowania pociągiem. Badania układu maszynista-lokomotywa elektryczna-otoczenie prowadzone były w dwóch etapach [1, 2,3] :

1. określenie wpływu czasu reakcji maszynisty na wydłużenie drogi hamowania pociągu i w konsekwencji możliwości przejechania przez lokomotywę przeszkody na torach. Do realizacji tego zadania zastosowano teorię zbiorów rozmytych z wykorzystaniem modelu Mamdani'ego. Przykład obliczeniowy dotyczył manewru nagłego hamowania, (awaryjnego).
2. kształtowanie się czasu reakcji oddziaływania maszynisty na przycisk czuwaka i SHP oraz na urządzenia sterownicze w różnych warunkach

pracy. Zależności te wykorzystano w diagnozowaniu ergonomicznym układu operator-pojazd szynowy-otoczenie i w efekcie sformułowano ocenę poziomu ergonomicznej jakości za pomocą tzw. metody rozmytej. Do realizacji tego zadania zastosowano teorię zbiorów rozmytych oraz model Takagi-Sugeno-Kanga.

Przyjęto uproszczony model układu mechanicznego lokomotywy [9], opisujący proces hamowania pociągu o zadanej masie całkowitej i stałą siłą hamowania. Analizowano drogę hamowania, której długość (a ściślej mówiąc położenie, w którym pociąg się zatrzyma) uzależniona została od momentu, w którym maszynista rozpocznie proces hamowania. Moment ten w dużym stopniu zależy od istniejących warunków pracy maszynisty. Budowa modeli Mamdani'ego i Takagi-Sugeno-Kanga wymagała zdefiniowania tzw. modelu lingwistycznego wyrażonego w postaci implikacji logicznych. Model ten określa czas reakcji maszynisty w funkcji szeregu cech (charakterystycznych dla czynnika ludzkiego, technicznego oraz materialnego środowiska pracy). Model lingwistyczny Mamdani'ego posiada poprzedniki i następniki rozmyte. Nie zawiera on jednak w postaci jawnej obiektywnej wiedzy o systemie, jeżeli taka wiedza mogła być wyrażona i/lub wcielona w ramy zbiorów rozmytych. Sugeno [8] i współpracownicy zasugerowali alternatywny sposób wnioskowania. Ich metoda wnioskowania /oznaczona również symbolem TSK/ jest związana z bazą reguł specjalnego formatu, który odznacza się następnikami typu funkcyjnego. W pracy następniki te we wszystkich przypadkach modeli TSK wyrażono w postaci związków liniowych.

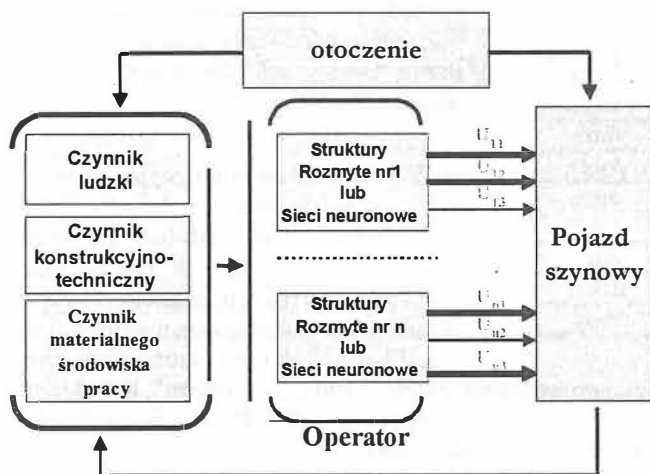
2.1. Założenia do budowy modeli opartych na metodach heurystycznych

Analizie poddano układ przedstawiony na rys. 1.

W budowie modeli założono, że [1, 2]:

1. modelowaną „maszyną” jest pojazd szynowy (lokomotywa),
2. w kompleksowym modelu zachowanie lokomotywy określone jest poprzez typowe równania mechaniki dla danego obiektu z uwzględnieniem układu sterowania,
3. przedmiotem modelowania mogą być różnorodne działania operatora w pojeździe (np. oddziaływanie na urządzenia sterownicze),
4. jednym z istotnych parametrów charakteryzujących działanie operatora jest czas jego reakcji, który decyduje o zachowaniu całego układu operator – pojazd szynowy – otoczenie,

5. oddziaływanie operatora na pojazd poprzez odpowiednie urządzenia scharakteryzowane jest trzelementowym wektorem U_i ,
6. wartości wektora U_i są funkcją czynnika ludzkiego, konstrukcyjno – technicznego oraz materialnego środowiska pracy.



Rys.1. Schemat analizowanego układu

Maszynista może oddziaływać na lokomotywę poprzez n-czynności typowych dla analizowanej przez model sytuacji (np. dla sytuacji hamowania maszynista oddziałuje na pojazd szynowy poprzez ruch nastawnika jazdy, itd.). Oddziaływanie na lokomotywę dla danej i-tej czynności scharakteryzowane jest trzelementowym wektorem:

$$U_i = [u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}]^T$$

gdzie:

- u_{i1} - czas odbioru informacji, u_{i3} - czas wykonania czynności,
 u_{i2} - czas podjęcia decyzji, T – transpozycja.

Sygnały u_{i1} , u_{i2} i u_{i3} traktowane są jako zmienne losowe o zadanej wartości średniej i danym rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa:

$$u_{ij} = u_{ij}(\bar{u}_{ij}, \sigma_{ij}) \quad j = 1, 2, 3 \quad i = 1, 2, \dots$$

W budowie modelu wykorzystano dane z badań eksperymentalnych prowadzonych w Wojskowym Instytucie Medycyny Lotniczej [6]. Uzyskane wyniki miały rozkład normalny, stąd też w pracy założono taki sam rozkład dla zmiennych losowych, jednoznacznie określony przez podanie wartości średniej \bar{u}_{ij} oraz odchylenia standardowego

σ_{ij} (σ_{ij}^2 - wariancji). Zmienne losowe tworzone były przez generator liczb losowych o zadanym rozkładzie. Istotną trudnością było określenie wartości składowych wektora $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}]^T$. Przyjęto założenie, że wartości tego wektora są funkcją trzech składników:

$$U_i = F(\bar{C}, \bar{M}, \bar{S})$$

gdzie:

- \bar{C} - wektor czynnika ludzkiego, \bar{M} - wektor czynnika konstrukcyjno-technicznego,
 \bar{S} - wektor czynnika materialnego środowiska pracy (otoczenia).

Liczba składowych wektora \bar{C} jest bardzo duża. To między innymi: kondycja psychofizyczna, wydatek energetyczny, obciążenie psychiczne, przystosowanie do pracy (doświadczenie i wykształcenie). Z kolei wektor \bar{M} określają takie komponenty jak stan techniczny pojazdu, stopień automatyzacji, widoczność szlaku, konstrukcja fotela, itd.

Wektor \bar{S} determinowany jest np. przez hałas, drgania mechaniczne, mikroklimat.

W modelowaniu metodami heurystycznymi poszczególnym czynnikom należy przyporządkować wartości liczbowe będące "miarą" danego czynnika. Czynnikiem mierzalnym można przypisać zmierzoną wartość danej wielkości. Ze względu na efektywność numeryczną algorytmów, wygodnie jest standaryzować wartości wszystkich występujących w modelu wielkości. Czas reakcji standaryzowano zgodnie ze wzorem:

$$x_s = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

gdzie:

- x_s - zmienna standaryzowana
 x_{\min} - minimalna wartość zmiennej rzeczywistej,
 x - bieżąca wartość zmiennej rzeczywistej,
 x_{\max} - maksymalna wartość zmiennej rzeczywistej.

Przy określaniu wartości składowych czasów (minimalnych i maksymalnych) wykorzystano badania eksperymentalne WIML [6].

Z podanych równań wynika, że przejście odwrotne (ze zmiennych standaryzowanych do rzeczywistych) jest jednoznacznie określone. W przypadku zmiennych niemierzalnych, z punktu widzenia zastosowanej metody, istnieje konieczność przyporządkowania danej cesze miary z zakresu $<0,1>$. Miara ta określa subiektywną ocenę "eksperta" dotyczącą poziomu danej cechy. Dobrym przykładem ilustrującym to zagadnienie jest czynnik "monotonia".

2.2. Założenia heurystycznego modelu lingwistycznego wybranych czasów reakcji

Heurystyczne modele lingwistyczne oparte zostały na następujących założeniach metodologicznych:

1. Wybór cech mających wpływ na działanie maszynisty oraz przypisanie im określonych stanów.

Zakres zmian wartości poszczególnych cech, w analizowanych trzech modelach: odbioru informacji, podejmowania decyzji i wykonania czynności zawiera tabela 1.

Poszczególne podprzedziały przedziału $<0,1>$ odpowiadają różnym poziomom danej cechy. Poziomom tym przypisano tzw. funkcje przynależności. W modelach funkcje przynależności określono jako krzywe gaussowskie

Lp	Cecha	Poziom cechy		
		Wartość z zakresu < 0, 1 >		
		0	0,5	1
1.	Monotonia	duża	średnia	mała
2.	Hałas	uciążliwy		nieuciążliwy
3.	Ilość informacji	mała		duża
4.	Widoczność szlaku	zła		dobra
5.	Widoczność USyg	zła		dobra
6.	Przystosowanie do pracy	małe		duże
7.	Stan psychofizyczny	zły		dobry
8.	Stopień trudności podejmowanych decyzji	mały	średni	duży
9.	Powtarzalność decyzji	mała		duża
10.	Pora pracy	noc		dzień
11.	Opór urządzeń sterowniczych	mały	średni	duży

Inne postaci funkcji przynależności (np. funkcje trójkątne) nie wpływały zasadniczo na wartości wyników. Przy tym samym poziomie kwantyzacji, porównywano funkcje: gaussowską, trójkątną i trapezową, o parametrach minimalizujących między nimi błąd średniokwadratowy. Różnice w wynikach nie przekraczały 5%. Istotniejsze znaczenie ma liczba poziomów kwantyzacji dla zmiennych wejściowych i wyjściowych.

2. Uzależnienie czasu reakcji na etapie:

- odbioru informacji - od: monotonii, wielkości informacji, widoczności USyg lub widoczności szlaku, hałasu, przystosowania do pracy, stanu psychofizycznego;
- podejmowania decyzji - od: stopnia trudności podejmowania decyzji, powtarzalności decyzji, przystosowania do pracy, dobowego czasu pracy;
- wykonywania czynności - od: przystosowania do pracy, stanu psychofizycznego, oporu urządzeń sterowniczych.

1. Określenie tendencji w kształtowaniu się czasu reakcji jako wypadkowej wpływu poszczególnych cech (czas reakcji jako parametr wyjściowy mógł przyjmować siedem poziomów).

Modele heurystyczne: Mamdani'ego i TSK zostały implementowane numerycznie w środowisku Matlab_Simulink ver. 6.0. Zostały one zdekomponowane na trzy podsystemy do symulacji:

- czasu odbioru informacji (w tym podsystemie został wyodrębniony dodatkowy podsystem do symulacji poziomu monotonii),
- czasu podejmowania decyzji (w tym podsystemie wyodrębniono podsystem do symulacji poziomu stopnia trudności podejmowania decyzji),
- czasu wykonania czynności.

Przykładowy fragment modelu procesu wykonania czynności ma następującą postać:

„.....Jeżeli opór US jest duży i przystosowanie do pracy jest duże i stan psychofizyczny jest zły to czas reakcji jest duży. Jeżeli opór US jest duży i przystosowanie do pracy jest małe i stan psychofizyczny jest dobry to czas reakcji jest średni duży. Jeżeli opór US jest duży i przystosowanie do pracy jest małe i stan psychofizyczny jest zły to czas reakcji jest duży”

W ten sam sposób zbudowano modele procesu odbioru informacji i podejmowania decyzji.

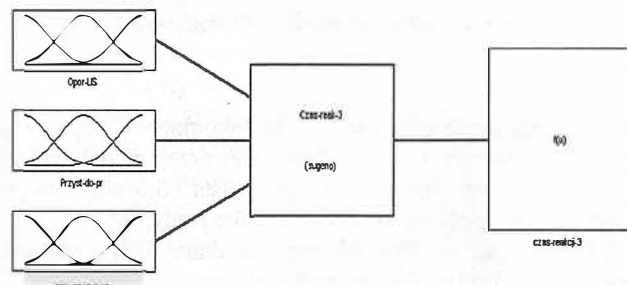
2.3. Analiza modelu TSK do symulacji czasu wykonania czynności

Poniżej przedstawiono kolejne etapy budowy modelu. Liczba funkcji przynależności odpowiada liczbie przyjętych stopni kwantyzacji dla danego sygnału wejściowego (Tab. 1).

3. Wyniki badań symulacyjnych

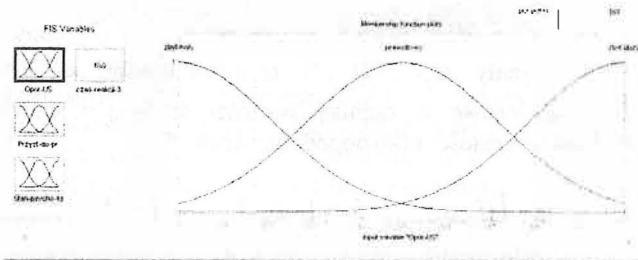
Przedstawione wybrane wyniki badań symulacyjnych odnoszą się do obu zbudowanych modeli. W trakcie pracy dokonano weryfikacji jakościowej modeli, natomiast trudniejszym problemem jest weryfikacja ilościowa, która wymaga

przeprowadzenia eksperymentu „czynnego” lub „biernego”, co na chwilę obecną w naszych warunkach jest niemożliwe do zrealizowania.



Rys.2. Model TSK do symulacji czasu wykonania czynności

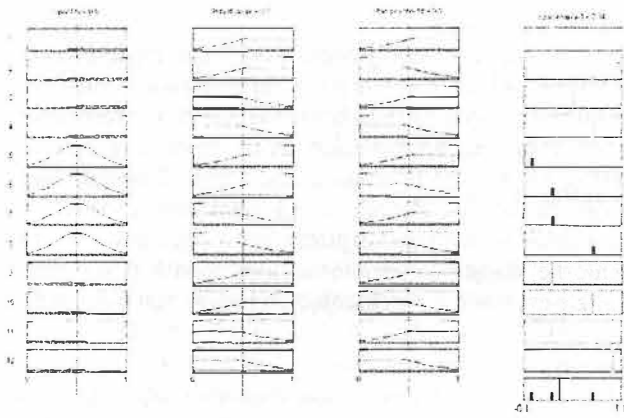
a)



b)



Rys.3. a) przykładowe funkcje przynależności dla cechy "Opór urządzeń sterowniczych" b) poziomy czas wykonania czynności dla modelu TSK



Rys.4. Wizualizacja reguł implikacyjnych czasu wykonania czynności w funkcji parametrów: opór urządzeń sterowniczych, przystosowanie do pracy oraz stan psychofizyczny

3.1 Model Mamdani'ego

Analizowano proces hamowania awaryjnego lokomotywy i modelowanie destrukcyjnego wpływu wybranych cech na czas reakcji maszynisty. Droga hamowania uzależniona była od: prędkości początkowej pojazdu, siły hamowania (te parametry definiują drogę hamowania z punktu widzenia praw mechaniki) oraz czasu rozpoczęcia manewru hamowania. Założono, że przeszkoda zauważona została przez maszynistę nagle. Poniżej przedstawiono jedynie wpływ czasu wykonania czynności na wydłużenie drogi hamowania, przy zmianie poziomu cechy *przystosowanie do pracy*.

Przypadek 1 (warunki pracy prawidłowe, bez zakłóceń):

- Opór urządzeń sterowniczych OUS (średni)
- Przystosowanie do pracy PP (duże)
- Kondycja psychofizyczna KF (dobra)

Przypadek 2 (warunki pracy z zakłóceniami – małe przystosowanie do pracy):

- Opór urządzeń sterowniczych OUS (średni)
- Przystosowanie do pracy PP (małe)
- Kondycja psychofizyczna KF (dobra)

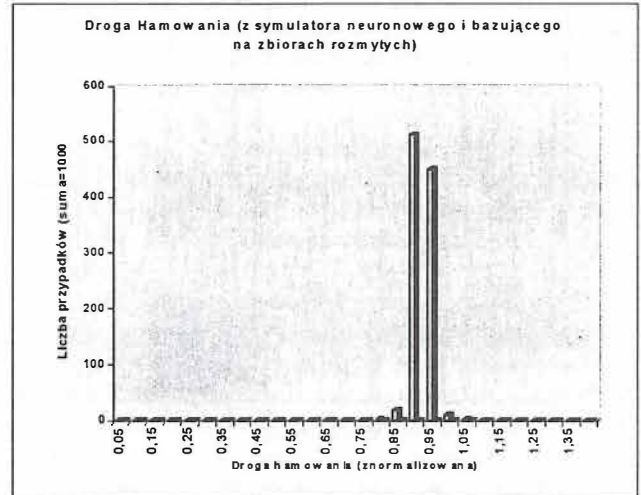
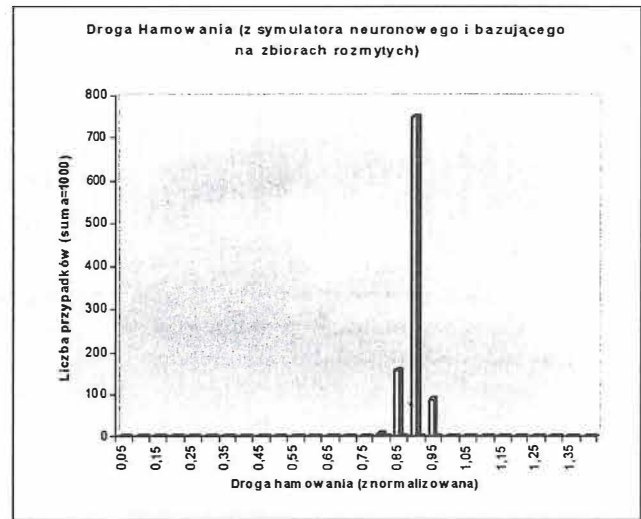
W każdym przypadku przeprowadzono 1000 symulacji (rys. 5 i 6). Małe przystosowanie do pracy w drugim przypadku wpłynęło na wydłużenie czasu reakcji a tym samym - drogi hamowania. W efekcie miały miejsce sytuacje przejechania punktu oznaczonego na rys. 6 jedyneką, czyli zderzenie z przeszkodą lub przejechanie punktu oznaczonego sygnalizatorem „stój”.

3.2 Model Takagi-Sugeno-Kanga

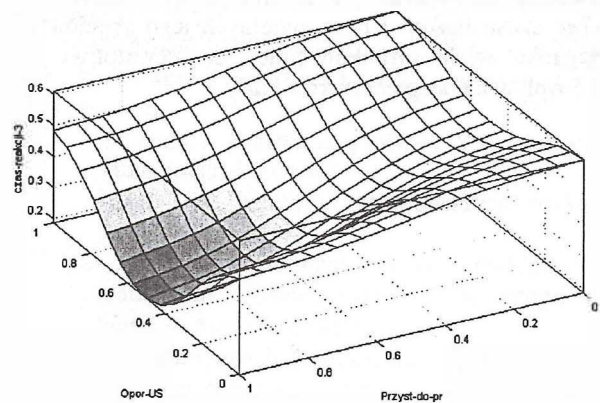
Badania symulacyjne pozwoliły na uzyskanie płaszczyzn czasów reakcji, których kształt uzależniony jest od poziomu cech ergonomicznych. Rysunek 7 przedstawia czas wykonania czynności w funkcji parametrów: opór urządzeń sterowniczych i przystosowanie do pracy.

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki symulacji czasu reakcji oddziaływania maszynisty na urządzenia sterownicze dla :

- Przypadku 1- złe warunki pracy (analizowane cechy mają charakter destrukcyjny),
- Przypadku 2- optymalne warunki pracy (cechy przyjmują wartości optymalne).



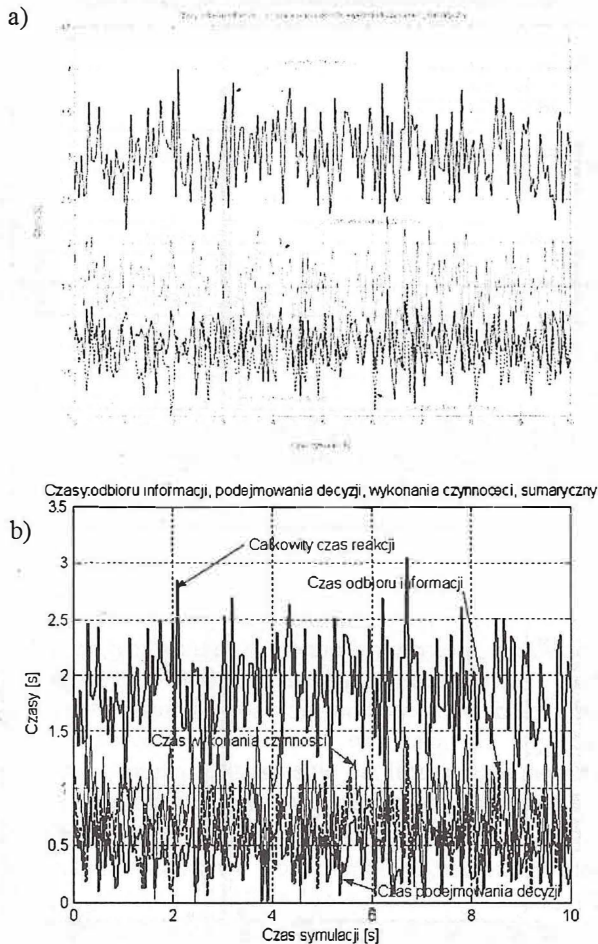
Rys. 5 Wyniki symulacji komputerowych (przypadek 1)
Rys. 6 Wyniki symulacji komputerowych (przypadek 2)
(liczba 1 na osi poziomej oznacza umiejscowienie przeszkody lub sygnalizatora „stój”)



Rys.7 Czas wykonania czynności w funkcji parametrów: opór urządzeń sterowniczych i przystosowanie do pracy

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki symulacji czasu reakcji oddziaływania maszynisty na urządzenia sterownicze dla :

- Przypadku 1- złe warunki pracy (analizowane cechy mają charakter destrukcyjny),
- Przypadku 2- optymalne warunki pracy (cechy przyjmują wartości optymalne).



Rys. 8 a) przypadek 1- przebieg rzeczywisty (z uwzględnieniem losowości) czasów reakcji (oddziaływanie na US) b) przypadek 2- przebieg rzeczywisty (z uwzględnieniem losowości) czasów reakcji (oddziaływanie na US)

Analizując oba wykresy stwierdzono wzrost wartości całkowitego czasu reakcji i poszczególnych jego składowych w przypadku złych warunków pracy, co niewątpliwie może mieć wpływ na bezpieczeństwo jazdy.

4. Uwagi końcowe

W pracy przedstawiono koncepcje modelowania i symulacji układu maszynista – lokomotywa – otoczenie. Analizowano wybrane działania maszynisty w procesie pracy. W tym celu zastosowano teorię zbiorów rozmytych, wykorzystując modele Mamdaniego i TSK. Rezultaty zastosowanych metod i technik modelowania mogą znaleźć zastosowanie w analizie bezpieczeństwa pojazdów, w ergonomicznej diagnozie operatorskich stanowisk pracy oraz w analizie czynników zwiększających bezpieczeństwo jazdy.

Literatura

- [1] Grabarek I., *Diagnostowanie ergonomiczne układu operator–pojazd szynowy–otoczenie. Zeszyty Naukowe Wydziału Transportu Politechniki Warszawskiej, zeszyt 51, Warszawa, 2003.*
- [2] Grabarek I., *Modelling and Simulation of the Driver's Activity in the Man-Machine-Environment System. Archives of Transport, Vol.14, issue 1, 2001.*
- [3] Grabarek I., Choromański W., *Fuzzy Logic in Modeling of Human Factor of Driver – Locomotive – Environment System., in Proceedings of LASTED International Conference MODELING and SIMULATION 2001, 2001, in press;*
- [4] Parasuraman R., *Designing automation for human use: empirical studies and quantitative models. Ergonomics, 2000.vol. 43, No.7.*
- [5] Salvendy G., *Handbook of Human Factors and Ergonomics. John Wiley @ Sons. 1997.*
- [6] Szczechura J., Maciejczyk J., Skibniewski F., Kwarecki K., *Prognostic value of some psychological measures for candidate in air training. Applied Military Psychology Symposium, Lisbon-Portugal, 1995.*
- [7] Yager R.R., Filev D.P., *Essential of Fuzzy Modeling and Control. John Wiley @ Sons, Inc. 1994.*
- [8] Zadeh, L., *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to approximate reasoning. (part I and II), Information Sciences 8, 1975.*
- [9] Grant No 4 P05 D 05311 - *Opracowanie systemu komputerowego do diagnostowania, symulacji i suboptymalizacji układu człowiek – stanowisko pracy w obszarze zagadnień ergonomicznych. Praca sponsorowana przez KBN, 1999.*