

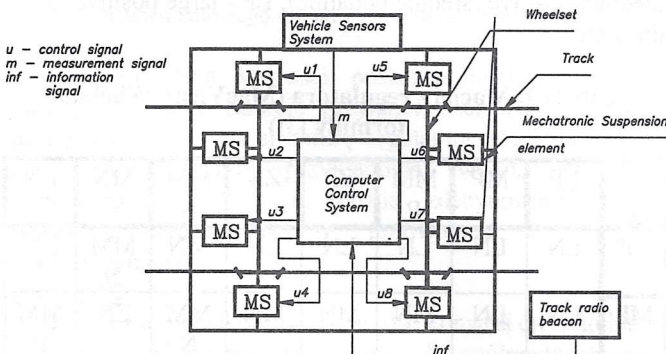
Mechatroniczne zawieszenia pojazdów szynowych

Przedmiotem rozważań w niniejszym artykule są niekonwencjonalne rozwiązania pojazdów szynowych w zakresie tzw. zawieszenia poprzecznego. Niekonwencjonalność polega na syntezie adaptacyjnego zawieszenia poprzecznego przewyżniającego konflikt (w stosunku do rozwiązań konwencjonalnych) między tzw. statecznością w ruchu po torze prostym a sterownością w ruchu po torze zakrzywionym. Tzw. rozwiązania mechatroniczne integrują elektroniczne układy pomiarowe i sterujące z mechanicznymi układami wykonawczymi.

1. WSTĘP

Przegląd różnego typu niekonwencjonalnych rozwiązań pojazdów szynowych z aktywnym czy półaktywnym zawieszeniem poprzecznym znaleźć można między innymi w pracy [2]. Spośród wielu analizowanych tam rozwiązań konstrukcyjnych i metod syntezy sterowania w niniejszym artykule autorzy chcieliby skupić się na rozwiązaniach polegających przede wszystkim na adaptacji parametrów tzw. zawieszenia poprzecznego do aktualnych warunków ruchu oraz sterowania kątem nabiegania. Do syntezy sterowania regulatora analitycznego zastosowana zostanie technika zbiorów rozmytych. Została ona omówiona między innymi w pracach [3,4]. Możliwość zastosowania jej do sterowania zawieszeniami adaptacyjnymi została zaprezentowana w pracy [1]. Na początku omówimy koncepcję konstrukcji. Została przedstawiona na rysunku 1. Przy czym poczynione zostały następujące istotne założenia:

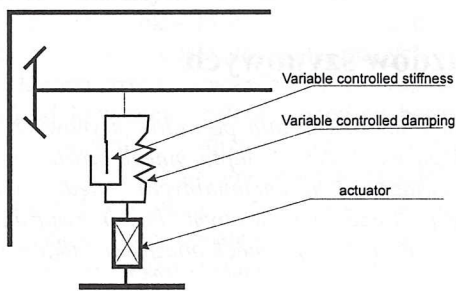
1. Aktywne zawieszenie w płaszczyźnie poprzecznej winno wspomagać a nie zastępować "naturalny" system sterowania kreowany przez siły w obszarze kontaktu koła z szyną
2. Elementy w zawieszeniach aktywnych winne być tak skonstruowane by umożliwić lokalnie syntezę regulatora "podobnego" do regulatora PID
3. Dane wejściowe do systemu sterującego winny pochodzić zarówno z systemu pomiarowego wózka kolejowego jak i z zewnętrznych urządzeń nawigacyjnych (tzw "inteligentny tor")
4. System winien umożliwiać realizację różnych algorytmów sterowania



Rys.1 Pojazd szynowy z zawieszeniem mechatronicznym (z pracy [1,2]) - MS - mechatronic suspension (zawieszenie mechatroniczne)
-Track-radio-bacon - nadajnik torowy

Postulat pierwszy wiąże się z pewnym założeniem aksjomatycznym przyjętym przez autora na bazie wieloletnich doświadczeń, że w pojazdach szynowych nie ma sensu całkowicie zastępować swoisty mechanizmu regulacji nadążnej jaki jest kreowany przez oddziaływanie profilowanego koła z główką szyny. Należy jedynie stworzyć warunki by mechanizm ten mógł działać optymalnie dla danych warunków ruchu. Przyjęcie takiego założenia w konsekwencji nakłada mniejsze wymagania energetyczne na system sterujący oraz zwiększa bezpieczeństwo układu (w warunkach awarii co najwyżej parametry zawieszenia będą nieoptymalne). Postulat drugi ma istotne znaczenie w przypadku jazdy po łuku czy zestawów kołowych z niezależnie obracającymi się kołami. Otóż klasyczne zawieszenie składające się z elementu tłumiącego i sprężystego w istocie realizuje algorytm sterowania PD. Podobnie przy syntezy sterowania układu liniowego z kwadratowym wskaźnikiem jakości gdzie równanie regulatora analitycznego uzyskujemy poprzez rozwiązanie równania Ricatiego uzyskujemy w istocie sterowanie klasy PD. W sterowaniu tego typu statyczny błąd sterowania nie jest równy zeru. Dla ruchu po łuku czy ruchu zestawu kołowego z niezależnie obracającymi się kołami ten statyczny błąd regulacji może być znaczący i istotnie wpływać np na zużycie obrobki kół. Jego eliminacja jest możliwa poprzez wprowadzenie elementu całkującego. Postulat trzeci wynika z faktu, iż w porównaniu z innymi środkami transportu większość parametrów drogi w transporcie kolejowym wzdłuż której porusza się pojazd wykonując siłą rzeczy "małe" drgania wokół położenia równowagi są doskonale znane i nie ma sensu wyposażać pojazd w złożone układy pomiarowe identyfikujące te parametry. Jednym z podstawowych parametrów geometrycznych jest np. krzywizna toru. Informacja o nim może być przekazywana przez zewnętrzny układ nawigacyjny. Postulat ostatni wynika z faktu, że dla układów nieliniowych oraz opisujących ich nieliniowych modeli matematycznych (a z takimi układami i modelami mamy do czynienia w przypadku pojazdów szynowych) nie ma ogólnych metod syntezy sterowania w tym sterowania optymalnego (w tym drugim przypadku już samo zdefiniowanie funkcji celu jest zadaniem problematycznym). A zatem ciekawą ideą jest posiadanie "zunifikowanego" elementu zawieszenia i zmiana jego własności poprzez zmianę algorytmu sterowania.

Przykładowa struktura takiego zunifikowanego elementu pokazana jest na rysunku 2.



Rys. 2 Zunifikowany mechatroniczny element zawieszenia – MS (z pracy [1]) -actuator - siłownik - w pracy ten element traktowany będzie jako w zasadzie serwomechanizm położenia (np. elektrohydrauliczny)

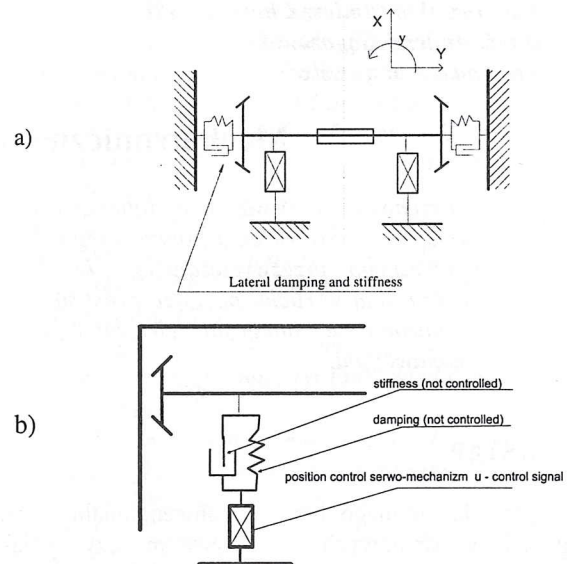
Element tłumiący o zmiennych parametrach reprezentuje człon adaptacyjny o działaniu różniczkowym. Element sprężysty z kolei reprezentuje adaptacyjny człon o działaniu proporcjonalnym. Serwomechanizm położenia wprowadza z kolei do układu działanie całkujące.

2. METODA SYNTEZY REGULATORA ANALITYCZNEGO

W artykule autorzy proponują metodę syntezy regulatora analitycznego w oparciu o modelowanie heurystyczne bazujące na logice i zbiorach rozmytych. W inspirującej pracy [4] na temat modelowania i sterowania I.Zadeh (twórca zbiorów i logiki rozmytej) wprowadził pomysł sformułowania algorytmów sterowania za pomocą reguł logicznych i zbiorów rozmytych. Podstawa tzw. regulatorów rozmytych jest ściśle związana ze zbiorem lingwistycznych reguł sterowania reprezentowanych przez odpowiednie implikacje. Źródłem tych reguł jest wiedza ekspertów (jakkolwiek ich pozyskiwanie może być procesem matematycznie sformalizowanym). Wspomniane implikacje wiążą aktualny stan procesu ze sterowaniem, które powinno zostać podjęte w celu osiągnięcia konkretnego celu. Pierwsze prace dotyczące sterowania rozmytego pochodziły od Mamdaniego. [3]. Trzeba powiedzieć, że algorytmy sterowania lingwistycznego były błyskotliwym uogólnieniem ludzkich doświadczeń w stosowaniu reguł lingwistycznych. i zostały z powodzeniem zastosowane do sterowania złożonymi systemami technicznymi. Poniżej postaramy się przedstawić koncepcje syntezy regulatora rozmytego dla trzech wariantów konstrukcji pojazdu szynowego lub wybranych jego elementów. We wszystkich przypadkach zastosowana zostanie koncepcja Mamdaniego.

Przykład 1

Analizujemy ruch zestawu kołowego jak na rysunku 3a). Jest to zestaw z niezależnie obracającymi się kołami.. Mamy trzy sygnały sterujące: u_1 (kąt obrotu zamocowania elementów podatnych) K_x oraz C_x (między parametrami z modelu K_ψ oraz C_ψ istnieje prosta zależność:). Wyjście układu scharakteryzowane jest przez jeden parametr a mianowicie y - poprzeczne przemieszczenie zestawu kołowego.) oraz przyrost błędu Δy . Analizujemy ruch z prędkością $v=50$ [m/s].



Rys. 3 a) Analizowany model zestawu kołowego b)Element zawieszenia mechatronicznego (sterowany tylko kątem nabiegania).

Z systemu otrzymujemy dwie informacje wyjściowe: y - poprzeczne przemieszczenie zestawu kołowego oraz jego przyrost Δy . Przypomnijmy, że dla układu konwencjonalnego na skutek redukcji sił stycznych wzdłużnych mechanizm centrowania został zaburzony i zestaw bardzo „powoli” wracał do położenia zalecanego (tzn. w ruchu po torze prostym jest to położenie centralne względem środkowej linii toru. Do algorytmu sterowania zastosowano następujące reguły lingwistyczne wyrażone w postaci:

$$\text{If is LP and } \Delta y \text{ is LP then } u \text{ is LN} \quad (1)$$

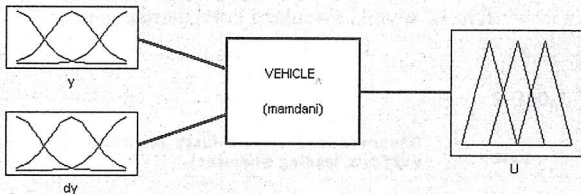
Przy czym skorzystano z pewnych sformalizowanych metod syntezy regulatora analitycznego opracowanego przez MacVicar'a Whelan'a na gruncie teorii regulatorów rozmytych [3]. Macierz regulatora przedstawiona została w tabeli 1 gdzie przyjęto następujące oznaczenia (zgodnie z pracą [3]):

LN - great negative (duży ujemny) ;MN - medium negative (średni ujemny) ;MMN - small negative (mały ujemny); ZN - zero negative („zero ujemne”); ZP - zero positive („zero dodatnie”); MMP - small positive (małe dodatnie); MP - medium positive (średnie dodatnie); LP - large positive (duże dodatnie”

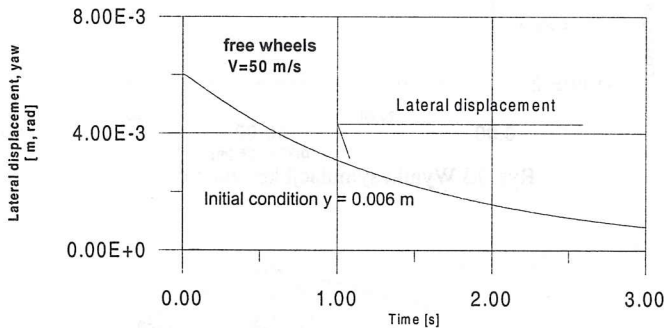
Tabela 1. Macierz regulatora (MacVicar-Whelana formuły [3])

| $\Delta y \setminus y$ | LP | MP | MM | ZP | ZN | MM | MN | LN |
|------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| LP | LN | LN | LN | LN | LN | MN | MM | ZN |
| MP | LN | LN | MN | MN | MN | MM | ZN | MM |
| M | LN | MN | MM | MM | MM | ZN | MM | MP |
| MP | | | N | N | N | | P | |

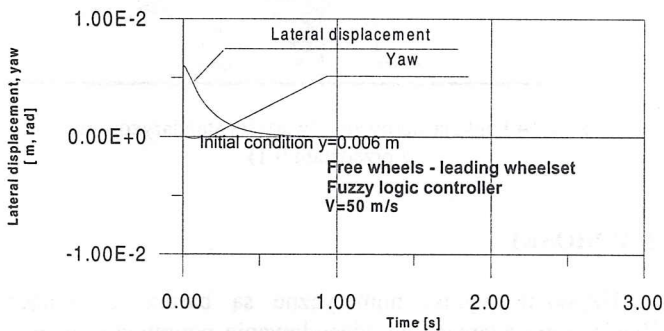
| | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|----|
| ZP | LN | MN | MM N | ZN | ZP | MM P | MP | LP |
| ZN | LN | MN | MM N | ZN | ZP | MM P | MP | LP |
| M MN | MN N | MM N | ZP | MM P | MM P | MM P | MP | LP |
| MN | MM N | ZP | MM P | MP | MP | MP | LP | LP |
| LN | ZP | MP | MP | LP | LP | LP | LP | LP |



Rys. 4 Ogólna struktura regulatora analitycznego Mamdaniego



Rys. 5 Symulacje komputerowe (z pracy autora [1]) yaw-obrót zestawu kołowego wokół osi OZ; y - poprzeczne przemieszczenie zestawu kołowego /układ konwencjonalny/



Rys.6 Symulacje komputerowe (z pracy autora [59a]) yaw-obrót zestawu kołowego wokół osi OZ; y - poprzeczne przemieszczenie zestawu kołowego /układ z regulatorem rozmytym/

Dla określenia wartości poszczególnych parametrów przyjęto trójkątne funkcje przynależności. Na rysunku 4 przedstawiono ogólną strukturę regulatora Mamdaniego zaś na rysunkach 5-6 przykładowe wyniki symulacji komputerowej. Zauważyć można zdecydowanie lepsze własności dynamiczne w porównaniu z układem konwencjonalnym

Przykład 2

Klasyknie niejako podejście do konstrukcji regulatora rozmytego realizującego sprzężenie od współrzędnych stanu (zaprezentowane w przykładzie poprzednim) w praktyce może być kosztowne i nie zawsze uzasadnione. Obecnie postaramy się zmienić „filozofię” sterowania. Przy

założeniu sformułowanym poprzednio, że powinniśmy tylko wspomóc mechanizm prowadzący zestaw a kreowany przez siły kontaktowe w obszarze koło szyna, możemy zrealizować zgoła odmienny algorytm działania. Reguły lingwistyczne przyjmą następującą formę:

Jeżeli v jest duże i krzywizna jest mała to k jest duże i c jest duże i u jest o

Jeżeli v jest średnie i krzywizna jest mała to k jest średnie i c jest średnie i u jest o

Jeżeli v jest małe i krzywizna jest mała to

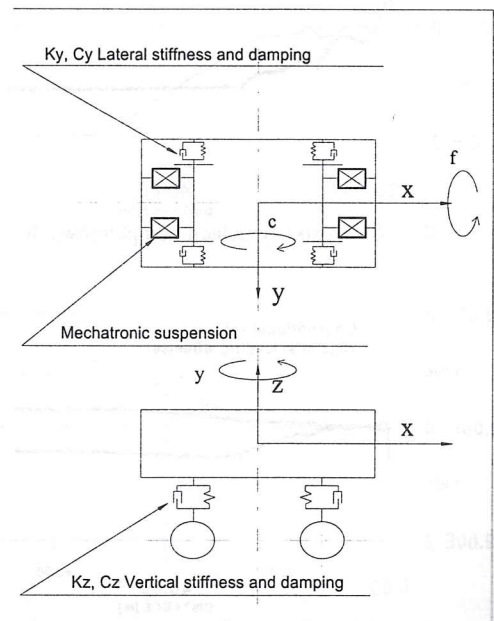
.....

Jeżeli krzywizna jest średnia to k jest średnie i c jest średnie i u jest średnie

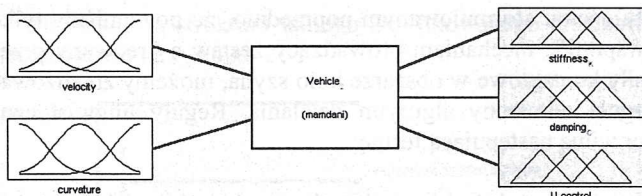
Jeżeli krzywizna jest duża to k jest średnie i c jest średnie a u jest duże

(gdzie: u-przemieszczenie elementu wykonawczego serwomechanizmu położenia, v-prędkość pojazdu, k,c współczynnik sztywności i tłumienia)

Podobnie jak poprzednio sygnały wejściowe (a ściślej mówiąc poprzedniki *antecedent* i następni *consequent*) implikacji podanych powyżej są elementami zbiorów rozmytych. Założono możliwość zmienności c_x . Tym razem model został wygenerowany automatycznie przy pomocy opracowanego przez W. Choromańskiego i K. Zboińskiego programu ULYSSES[2]. Na rysunku 7 przedstawiono model nominalny pojazdu. Symulowano ruch na torze składającym się z trzech stref: tor prosty 10m, krzywa przejściowa cykloidalna 15 m i łuk kołowy 40 m. Prędkość v=22m/s. Klasykne zestawy kołowe. Strukturę regulatora i zastosowane reguły lingwistyczne przedstawiono na rysunkach 8 i 9. Na rysunkach 10-14 przedstawiono wyniki symulacji komputerowych w porównaniu z wynikami uzyskanymi z modelu konwencjonalnego bez sterowania.



Rys. 7 Model nominalny pojazdu

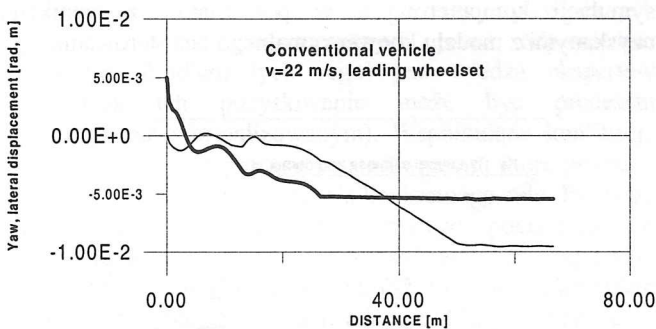


Rys. 8 Struktura regulatora Mamdaniego

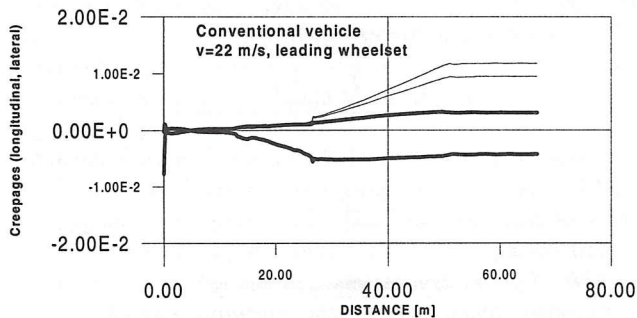
Widzimy zdecydowane polepszenie własności dynamicznych pojazdu. realizować algorytmy "bezpieczne" to znaczy takie, które zapobiegać mogą skutkom ewentualnych sytuacji awaryjnych.

1. If (velocity is small) and (curvature is great) then (stiffness_K is medium) (1)
2. If (velocity is small) and (curvature is great) then (damping_C is medium) (1)
3. If (velocity is small) and (curvature is great) then (U-control is great) (1)
4. If (velocity is medium) and (curvature is great) then (stiffness_K is medium) (1)
5. If (velocity is medium) and (curvature is great) then (damping_C is medium) (1)
6. If (velocity is medium) and (curvature is great) then (U-control is great) (1)
7. If (velocity is great) and (curvature is great) then (stiffness_K is great) (1)
8. If (velocity is great) and (curvature is great) then (damping_C is great) (1)
9. If (velocity is great) and (curvature is great) then (U-control is great) (1)
10. If (velocity is small) and (curvature is medium) then (stiffness_K is medium) (1)
11. If (velocity is small) and (curvature is medium) then (damping_C is medium) (1)
12. If (velocity is small) and (curvature is medium) then (U-control is medium) (1)
13. If (velocity is medium) and (curvature is medium) then (stiffness_K is medium) (1)
14. If (velocity is medium) and (curvature is medium) then (damping_C is medium) (1)
15. If (velocity is medium) and (curvature is medium) then (U-control is medium) (1)
16. If (velocity is great) and (curvature is medium) then (stiffness_K is medium) (1)
17. If (velocity is great) and (curvature is medium) then (damping_C is medium) (1)
18. If (velocity is great) and (curvature is medium) then (U-control is medium) (1)
19. If (velocity is small) and (curvature is small) then (stiffness_K is small) (1)
20. If (velocity is small) and (curvature is small) then (damping_C is small) (1)
21. If (velocity is small) and (curvature is small) then (U-control is small) (1)
22. If (velocity is medium) and (curvature is small) then (stiffness_K is medium) (1)
23. If (velocity is medium) and (curvature is small) then (damping_C is medium) (1)
24. If (velocity is medium) and (curvature is small) then (U-control is small) (1)
25. If (velocity is great) and (curvature is small) then (stiffness_K is great) (1)
26. If (velocity is great) and (curvature is small) then (damping_C is medium) (1)
27. If (velocity is great) and (curvature is small) then (U-control is small) (1)

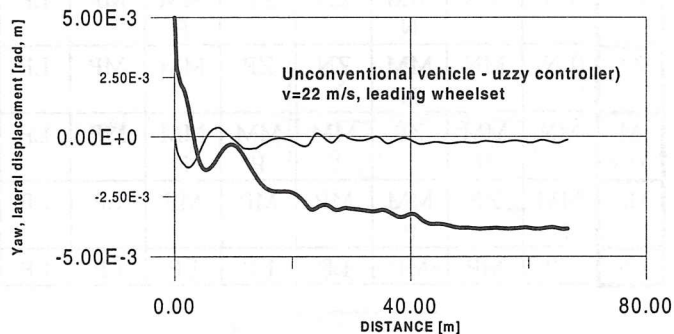
Rys. 9 Zastosowane reguły lingwistyczne



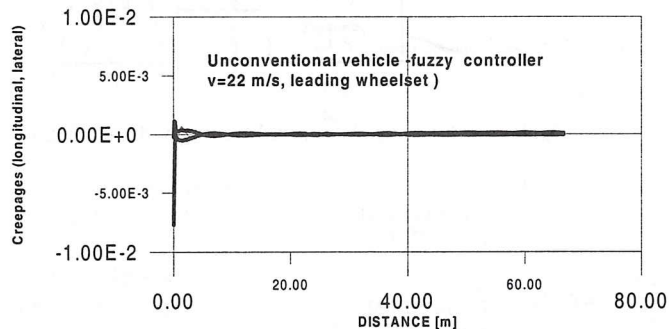
Rys. 10 Wyniki symulacji komputerowych



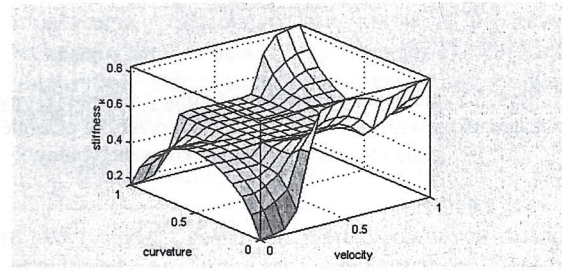
Rys. 11 Wyniki symulacji komputerowych



Rys. 12 Wyniki symulacji komputerowych



Rys. 13 Wyniki symulacji komputerowych



Rys. 14 Funkcja sterowania (wartości standaryzowane z przedziału 0-1)

3. WNIOSKI

Uzyskane wyniki numeryczne są bardzo obiecujące. Zawieszenie adaptacyjne zdecydowanie poprawia dynamikę pojazdu szynowego. Na zakończenie należy ustosunkować się do kwestii co jest źródłem reguł określających zachowanie się regulatora analitycznego (patrz rysunek 9). Otóż w niektórych przypadkach (niestety w większości odnosi się to do przypadków liniowych) budowa reguł sterowania może być sformalizowana (jak w przykładzie 1). W przypadku jednak modeli liniowych mamy inne efektywne metody syntezy praw sterowania. W przypadku układów nieliniowych należy posiłkować się wiedzą ekspertów czy jak mówił sam L.Zadech [4] zdrowym rozsądkiem. Jest to jednak czasami przy dużym doświadczeniu projektanta metoda nadzwyczaj efektywna i skuteczna.

4. LITERATURA

- [1] W. Choromański, "Mechatronic Suspension of Railway Vehicles - Focus on Lateral Dynamics", Vehicle Systems Dynamics, Swets @ Zeitlinger Publishers, Vol 25, 1997,
- [2] W. Choromański, "Symulacja i optymalizacja w dynamice pojazdów szynowych" *Prace Naukowe - Transport, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej* 1999,
- [3] R.R.Yager, D.P.Filev, „Podstawy modelowania i sterowania rozmytego”, WNT, 1995, John Wiley @ Sons, Inc. 1994
- [4] L.Zadeh "The Concept of a Linguistic Variable and its Application to approximate reasoning" (part I and II), *Information Sciences* 8, 1975,