

Włodzimierz CHOROMAŃSKI

ZASTOSOWANIE TEORII ZBIORÓW ROZMYTYCH DO SYNTEZY STEROWANIA INNOWACYJNYCH POJAZDÓW SZYNOWYCH

Streszczenie. W pracy autor przedstawia oryginalną koncepcję zastosowania teorii zbiorów rozmytych do syntezy regulatora analitycznego sterującego parametrami tzw. mechatronicznego zawieszenia innowacyjnych pojazdów szynowych. Obok metod badawczych przedstawione zostały wyniki badań symulacyjnych.

APPLICATION OF FUZZY SETS THEORY FOR INNOVATIVE RAILWAY-VEHICLE CONTROL SYNTHESIS

Summary. This work presents an original method of fuzzy sets theory application for synthesis of analytical controller for railway-vehicles suspension elements. This control is used to improve lateral dynamics of vehicle, specially to increase to velocity of stable motion and reduces the wear process on curves.

1. WSTĘP

Jednym z podstawowych zagadnień związanych z dynamiką pojazdów szynowych w tzw. płaszczyźnie poprzecznej jest zagadnienie sterowalności i stateczności ruchu. Przy czym pojęcia te mają inne znaczenie niż klasyczne rozumienie ich w teorii sterowania czy teorii stateczności. Utrata stateczności w dynamice pojazdów szynowych utożsamiana jest z pojawieniem się przy dużych prędkościach znacznych oscylacji zestawów kołowych. Zjawisko to nazywane jest różnie: wężykowaniem, generacją drgań samowzbudnych, pojawieniem się cyklu granicznego. Dobrze tłumaczy je współczesna teoria zjawisk kontaktowych i jest ono dobrze zidentyfikowane w badaniach symulacyjnych modeli nieliniowych. Pojęcie stateczności nie zawsze (zwłaszcza dla modeli nieliniowych) tożsame jest z pojęciem stateczności w sensie Lapunowa. Wydaje się, że definicje stateczności stochastycznej czy technicznej są tu bardziej odpowiednie [3]. Z kolei termin sterowalność odnosi się do radialnego prowadzenia zestawów kołowych w ruchu po torze zakrzywionym (a zatem znaczenie jego jest odmienne od jego znaczenia w teorii sterowania). Od dawna wzrasta zainteresowanie pojazdami nazywanymi często pojazdami „niekonwencjonalnymi” czy „innowacyjnymi”. Terminy te celowo ujęte zostały w cudzysłów, gdyż rozgraniczenie pojazd konwencjonalny i niekonwencjonalny jest

podziałem niejednoznacznym. Poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych związane jest przede wszystkim z faktem, iż istnieje konflikt między statecznością a wspomnianą sterowalnością pojazdu. W tradycyjnych konstrukcjach, zmieniając wartości parametrów w ten sposób, by np. zwiększyć prędkość statecznego ruchu pojazdu, pogarszamy jego sterowalność. Większość nowych rozwiązań stara się wyeliminować ten konflikt. Przy czym część z nich polega na nowym kształtowaniu zawiesznień w płaszczyźnie poprzecznej (cała gama rozwiązań tzw. wózków radialnych - znakomicie scharakteryzowana w pracy [4]) czy nowej konstrukcji zestawów kołowych (zestawy z niezależnie obracającymi się kołami, czy z pochylanymi półosiami [3]). Stosunkowo bardzo niedawno pojawiły się prace i badania dotyczące konstrukcji pojazdów z układami sterowania. Nowe konstrukcje nazywane są często pojazdami mechatronicznymi czy pojazdami wyposażonymi w tzw. zawieszzenia „elektroniczne”. W zasadzie pojazdy tego typu są aktualnie obecne bardziej w sferze intensywnych badań naukowych i eksperymentów laboratoryjnych niż stosowanych w praktyce rozwiązaniach konstrukcyjnych. W przekonaniu autora czynnikami warunkującymi ich zastosowanie są:

- rozwiązanie szeregu problemów natury badawczej z zakresu dynamiki i teorii sterowania,
- złożone zagadnienia związane z praktyczną implementacją proponowanych rozwiązań,
- analiza niezawodności i trwałości proponowanych nowych rozwiązań w porównaniu z rozwiązaniami konwencjonalnymi,
- rachunek ekonomiczny kosztów wdrożeń nowych rozwiązań i spodziewanych korzyści.

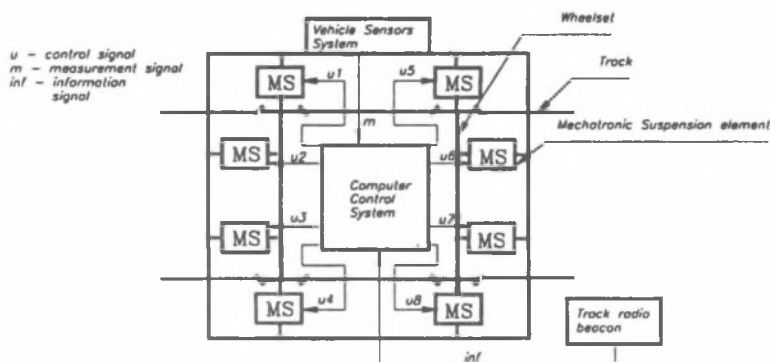
Wydaje się, że szczególnie w przypadkach wymogu spełnienia postulatów: ruchu z dużymi prędkościami oraz ruchu po torach zakrzywionych o małym promieniu, jak również spełnienia wymogów karty UIC 515 nowe rozwiązania mogą być szczególnie ciekawe i interesujące. W pracy zaprezentowano pewną prostą koncepcję takich pojazdów wraz z algorytmem syntezy regulatora analitycznego bazującego na teorii zbiorów rozmytych.

2.CHARAKTERYSTYKA ZAWIESZENIA

Spośród wielu analizowanych poprzednio rozwiązań konstrukcyjnych i metod syntezy sterowania w niniejszym rozdziale autor chciałby skupić się na rozwiązaniach polegających przede wszystkim na adaptacji parametrów tzw. zawieszania poprzecznego do aktualnych warunków ruchu oraz sterowania kątem nabiegania. Tym razem do syntezy sterowania regulatora analitycznego zastosowana zostanie technika zbiorów rozmytych [5, 6]. Została ona scharakteryzowana w rozdziale [1,3] i stanowi niejako pewne uogólnienie dotychczas stosowanych metod i doświadczeń. Na początku omówmy koncepcję konstrukcji. Idea jej 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 winny 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.

Postulat pierwszy wiąże się z pewnym założeniem aksjomatycznym przyjętym przez autora na bazie wieloletnich doświadczeń, że w pojazdach szynowych nie ma sensu całkowicie zastępować swoistego mechanizmu regulacji nadajnej, jaki jest kreowany przez oddziaływanie profilowanego koła z główką szyny.

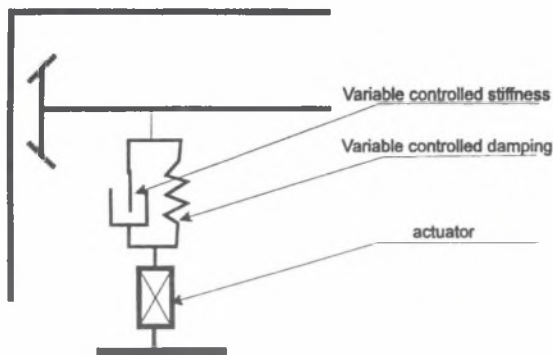


Rys. 1. Pojazd szynowy z zawieszeniem mechatronicznym (z pracy autora [2]: MS element zawieszenia mechatronicznego, Track-radio-bacon - nadajnik torowy

Fig. 1. Rail vehicle with mechatronic suspension [2]

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 Ricatego, otrzymujemy 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 obręczy 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, jest doskonale znana i nie ma sensu wyposażać pojazdu 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 je 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. 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.



Rys. 2. Zunifikowany mechatroniczny element zawieszenia: (actuator - siłownik - w pracy element ten traktowany jest raczej jako serwo mechanizm położenia, np. elektrohydrauliczny)

Fig.2. Unified mechatronic element of suspension (in this work actuator is treated as position servo)

2.1. Metoda syntezy regulatora analitycznego

Nawet w przypadku rozwiązania zadania sterowania optymalnego dla modelu liniowego przy założeniu całkowitej sterowalności i obserwowalności badanego układu (zadanie jest wprawdzie bardzo dobrze określone z punktu widzenia matematycznego i numerycznych algorytmów) pojawiają się kłopoty związane z interpretacją pewnych stałych, które należy przyjmować. I tak, dobór współczynników wag we współczynniku jakości przy wykorzystaniu do analizy problemu równania Riccatiego jest w zasadzie wyborem dość arbitralnym, który to wybór z kolei istotnie determinuje rozwiązanie zadania [3]. W wielu publikacjach macierz wag przyjmowana jest jako macierz diagonalna o wartościach równych jeden na diagonalu, co w większości przypadków nie ma żadnego uzasadnienia technicznego. Przy syntezy sterowania dla rzeczywistego obiektu sytuacja jest wielokrotnie bardziej złożona. Nie mamy dokładnego modelu, ani nie jesteśmy w stanie dokładnie zidentyfikować jego parametrów. Mamy często jednak bogatą wiedzę z doświadczeń bądź z wielu symulacji komputerowych. W inspirującej pracy [5] 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 [6]. 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 dwuosobowego pojazdu szynowego zgodnie z koncepcją Mamdaniego.

Przykład obliczeniowy

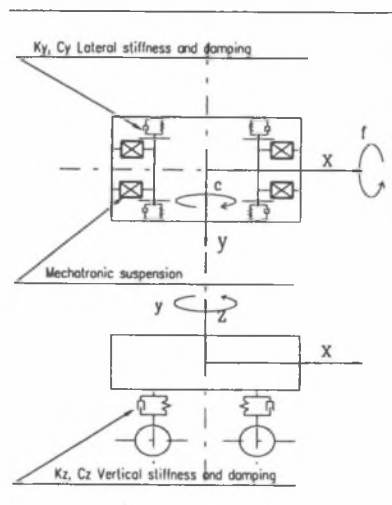
Klasyczne niejako podejście do konstrukcji regulatora rozmytego realizującego sprzężenie od współrzędnych stanu (zaprezentowane W ZASTOSOWANIU DO POJAZDÓW SZYNOWYCH W PRACY [3]) w praktyce może być kosztowne i nie zawsze uzasadnione. Obecnie postaramy się zmienić „filozofię” sterowania. Przy założeniu sformułowanym poprzednio, że powinniśmy tylko wspomóc mechanizm prowadzący zestaw, a kreowany przez siły kontaktowe w obszarze koło-szyna, możemy zrealizować zgoła odmienny algorytm działania (w porównaniu do typowych algorytmów bazujących na sprzężeniu zwrotnym od współrzędnych stanu). 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

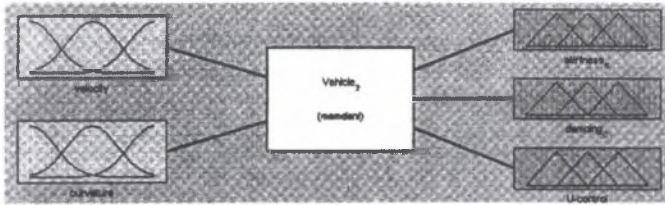
.....
 Jeżeli krzywizna jest średnia, to k jest średnie i c jest średnie, i u jest średnie.

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 - współczynniki sztywności i tłumienia).

Sygnaly wejściowe (a ściśle mówiąc poprzedniki *antecedent*) i następniki (*consequent*) implikacji podanych powyżej są elementami zbiorów rozmytych. Założono możliwość zmienności parametrów zawieszenia oraz możliwość sterowania kątem nabiegania. Symulowano ruch na torze składającym się z trzech stref: tor prosty 10 m, krzywa przejściowa cykloidalna 15 m i łuk kołowy 40 m. Model nominalny pojazdu przedstawiono na rysunku 3 (model matematyczny zawarty został w pracy [3]). Założono prędkość $v=22$ m/s. Strukturę regulatora podano na rysunku 4.



Rys. 3. Model nominalny pojazdu
 Fig.3. Nominal model of vehicle

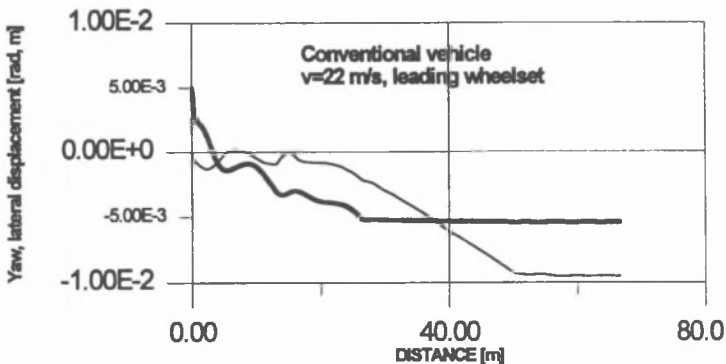


Rys. 4. Struktura regulatora Mamdaniego
Fig.4. The structure of Mandani's regulator

Na rysunku 5 przedstawiono zbiór implikacji determinujących działanie regulatora bazującego na koncepcji Mamdaniego.

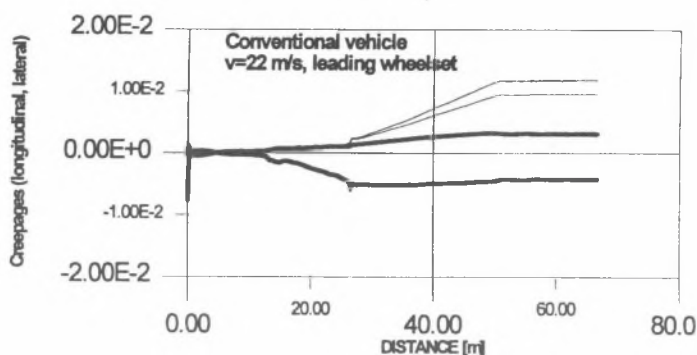
1. If (velocity is small) and (curvature is great) then (stiffness_K is medium) (1)
2. If (velocity is small) and (curvature is great) then (damping_C is medium) (1)
3. If (velocity is small) and (curvature is great) then (U-control is great) (1)
4. If (velocity is medium) and (curvature is great) then (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. 5. Zastosowane lingwistyczne reguły sterowania
Fig.5. Linguistic application of steering rule

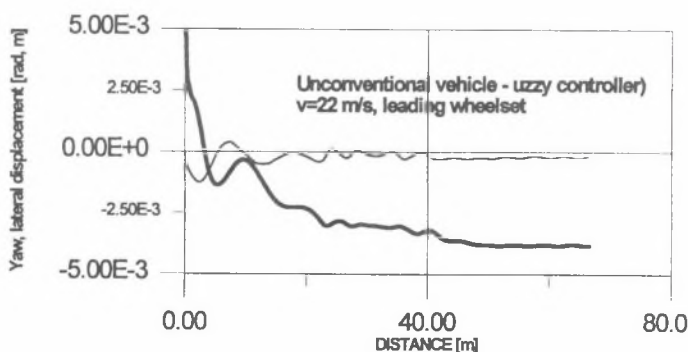


Rys. 6. Wyniki symulacji - pojazd konwencjonalny, poprzeczne przemieszczenie i kąt obrotu wokół osi pionowej zestawu prowadzącego

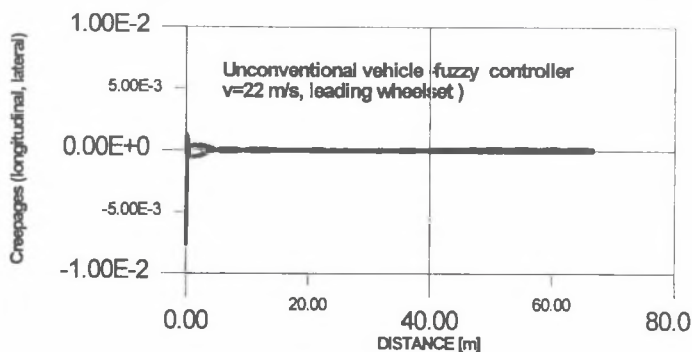
Fig.6. Results of simulation - conventional vehicle, lateral displacement and rotation angle of leading wheelset



Rys. 7. Wyniki symulacji: zestaw prowadzący - poślizgi
 Fig.7. Results of simulation: leading wheelset - slippage

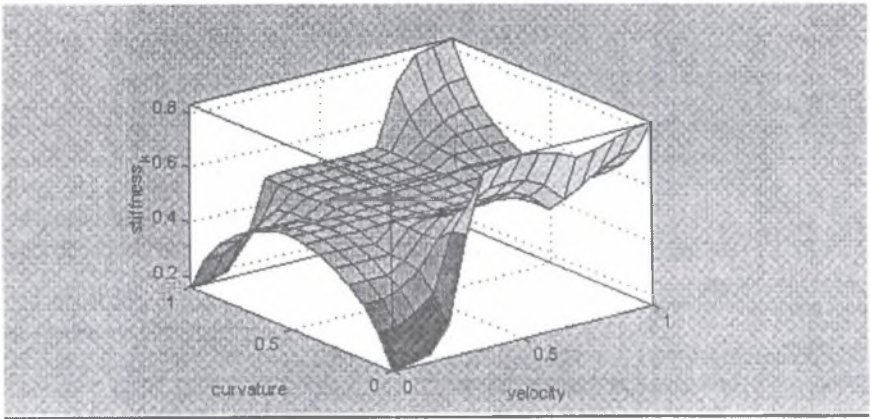


Rys. 8. Wyniki symulacji: pojazd innowacyjny, przemieszczenie poprzeczne i kąt obrotu zestawu prowadzącego
 Fig. 8. Results of simulation: innovation vehicle, lateral displacement and rotation angle of leading wheelset

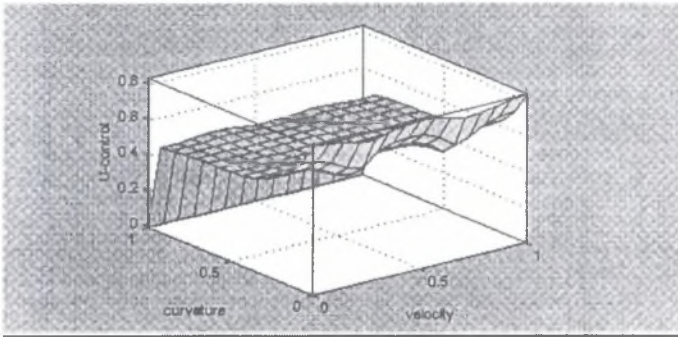


Rys. 9. Wyniki symulacji: pojazd innowacyjny, zestaw prowadzący, poślizgi
 Fig.9. Results of simulation innovation vehicle, leading wheelset, slippage

Z kolei rysunki 6-11 przedstawiają wyniki badań symulacyjnych. Wyniki dotyczące pojazdu innowacyjnego zestawiono z przykładowymi wynikami (rysunki 6-7) odnoszącymi się do pojazdu wyposażonego w zawieszenie konwencjonalne. Polepszenie własności dynamicznych jest zdecydowane. Szczególnie jest to widoczne w zachowaniu zestawu prowadzącego (poziom przemieszczeń translacyjnych i rotacyjnych oraz poziom poślizgów).



Rys. 10. Funkcje sterowania (wartości standaryzowane z przedziału $\langle 0,1 \rangle$)
 Fig.10. Steering functions (standarized values $\langle 0,1 \rangle$)



Rys. 11. Funkcje sterowania (wartości standaryzowane z przedziału $\langle 0,1 \rangle$)
 Fig.11. Steering functions (standarized values $\langle 0,1 \rangle$)

3. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono oryginalną metodę syntezy regulatora analitycznego do sterowania parametrami zawieszenia pojazdu szynowego w płaszczyźnie poprzecznej. Metoda bazuje na teorii zbiorów rozmytych i koncepcji Mamdaniego. Porównawcze komputerowe badania symulacyjne pojazdu konwencjonalnego i innowacyjnego wyposażonego we wspomniany układ sterowania wykazują zdecydowanie lepsze własności tego ostatniego (zwłaszcza dla ruchu po torze zakrzywionym).

LITERATURA

1. Choromański W.: Application of Neural Network for Intelligent Wheelset and Railway Vehicles Suspension Designs, Proceedings of 14 th IAVSD Symposium, Ann Arbor, USA, 1995.
2. Choromański W.: Mechatronic Suspension of Railway Vehicles - Focus on Lateral Dynamics, proceedings of 15 Sympozjum IAVSD, Budapest, Hungary 1997.
3. Choromański W.: Modelowanie i symulacyjne badania komputerowe innowacyjnych pojazdów szynowych, Raport z realizacji grantu KBN nr 580/T12/96/10, Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 1998.
4. Gąsowski W., Marciniak Z.: Konstrukcje oraz modele wózków i układów zawiesznień wagonów i lokomotyw przeznaczonych do jazdy z dużymi prędkościami, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1993.
5. Zadeh L.: The Concept of a Linguistic Variable and its Application to approximate reasoning, /part I and John Wiley @ Sons, Inc. 1994.
6. Yager R.R., Filev D.P.: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego, WNT, Warszawa 1995.

Recenzent: Dr hab.inż. Janusz Dyduch
Prof. Politechniki Radomskiej

Abstract

The research subject in this work are models of the railway bogies with the so-called mechatronic suspension. The author presents concepts of the railway bogies construction in which the suspension parameters are controlled electronically by the computer control unit. The main purpose of the control is to stabilise the motion of the railway vehicle on the straight track and to ensure good guiding features on the curved track. In the case of a classic solution for the railway bogies a simultaneous fulfilment of both requirements imposes a contradictory requirements on the suspension parameters. It seems that a mechatronic suspension which has adaptively changeable parameters can overcome these difficulties. Fuzzy controllers are proposed by the author to the synthesis of the control unit.