

Układ sterowania rozmytego do likwidacji poślizgu przy hamowaniu

W artykule przedstawiono układ likwidacji poślizgu przy hamowaniu wykorzystujący sterowanie rozmyte. Omówiono model matematyczny hamowanego zestawu kołowego z położeniem szczególnego nacisku na część nieliniową. Opisano zadania układu likwidacji poślizgu i zaproponowano rozmyty regulator typu Mamdaniego z wykorzystaniem zmodyfikowanej bazy reguł Mac Vicara-Whelana. Zaprezentowano wyniki symulacji działania układu. Przedstawiono wnioski oraz zaproponowano następne kroki prowadzące do ulepszenia działania układu.

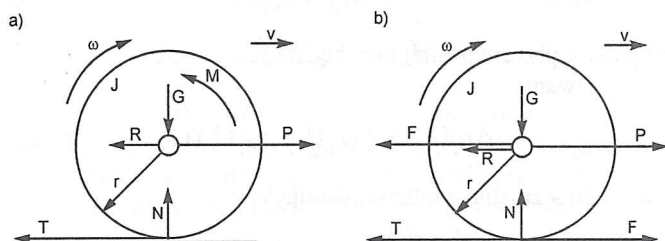
1. WSTĘP

Jeżeli moment hamujący zestaw kołowy przekroczy wartość dopuszczalną ograniczoną istniejącymi warunkami przyczepności, zestaw wpada w poślizg. Jeżeli nie przeprowadzone zostaną czynności zaradcze, w krótkim czasie koła zestawu zostają zablokowane. Zablokowanie kół ma dwie zasadnicze negatywne konsekwencje. Po pierwsze, w momencie, gdy koło zostaje zablokowane siła hamowania ustala się na stałym, niskim poziomie. Uniemożliwia to skuteczne zahamowanie pojazdu szynowego. Po drugie, pojazd pozostaje w ruchu, więc zablokowane koło ślizga się po szynie, a w konsekwencji dochodzi do powstania płaskich miejsc na powierzchni tocznej kół. Płaskie miejsca obniżają parametry jazdy pojazdu i zwiększają poziom drgań i hałasu [5], ale przede wszystkim poślizgi kół zmniejszają bezpieczeństwo, ponieważ mogą prowadzić do pęknięcia kół i w konsekwencji do wykolejenia pociągu. Problem poślizgu przy hamowaniu staje się ważniejszy w przypadku pojazdów szynowych poruszających się z dużymi prędkościami, ponieważ wówczas współczynnik przyczepności kół jest niższy i zwiększa się prawdopodobieństwo wpadnięcia kół w poślizg, a w konsekwencji tego zdarzenia istnieje większe prawdopodobieństwo ich uszkodzenia.

W związku z powyższym nowoczesne pojazdy szynowe wyposażane są w układy przeciwoślizgowe mające na celu ochronę kół przed poślizgiem oraz zapewnienie możliwie najwyższej w danych warunkach poślizgu siły hamowania.

2. MATEMATYCZNY MODEL UKŁADU KOŁO-SZYNA

Na rys. 1a przedstawiono uproszczony rozkład sił i momentów dla hamowanego zestawu kołowego [1, 7, 10]. Moment hamujący M można przedstawić jako parę sił F , działających na ramieniu r (rys. 1b).



Rys. 1. Uproszczony model hamowanego zestawu kołowego

gdzie: M – moment hamujący zestaw kołowy, G – obciążenie zestawu kołowego, T – siła hamująca oddziałująca na tor, P – siła bezwładności części pojazdu przypadająca na zestaw kołowy, N – reakcja pionowa toru, R – opory ruchu pojazdu w przeliczeniu na zestaw kołowy, J – moment bezwładności zestawu kołowego, r – promień koła, v – prędkość postępową pojazdu, ω – prędkość kątowa koła.

Matematyczny model hamowanego zestawu kołowego, składa się z poniższych równań:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T \cdot r - M \quad (1)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -T - R \quad (2)$$

$$s = v - \omega \cdot r \quad (3)$$

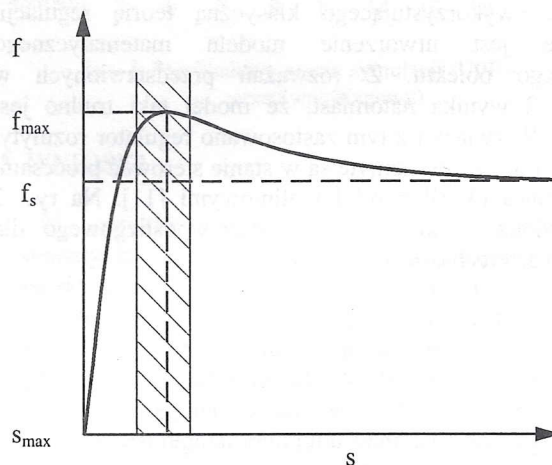
gdzie: s – poślizg bezwzględny koła po szynie.

Siła przyczepności dana jest poniższym wzorem:

$$T_{\max} = f \cdot G \quad (4)$$

gdzie: f – wartość współczynnika przyczepności.

Przebieg współczynnika przyczepności f w funkcji poślizgu s przedstawiono na rys. 2 [4].



Rys. 2. Przebieg współczynnika przyczepności f w funkcji poślizgu s

Podczas hamowania bez poślizgu zawsze występuje mikroślizg koła względem szyny, niezbędny do wytworzenia sił hamowania. Jeżeli siła hamowania przekroczy maksymalną dopuszczalną w danych warunkach przyczepności wartość, daną wzorem (4), nastąpi zerwanie przyczepności pomiędzy kołem i szyną i rozpocznie się proces makroślizgu koła. Od chwili rozpoczęcia poślizgu współczynnik przyczepności koło-szyna szybko maleje w sposób silnie nieliniowy, aż do osiągnięcia przy zablokowaniu koła wartości f_s równej wartości współczynnika tarcia, który jest o wiele mniejszy od współczynnika przyczepności.

Wartość f_{max} uzależniona jest od aktualnych warunków przyczepności, zależy również w nieliniowy sposób od prędkości pojazdu. Przedziały wartości najczęściej występujących współczynników przyczepności można uzyskać jedynie na podstawie badań statystycznych. Uzyskane wyniki zależą od wielu czynników, przykładowo od konstrukcji taboru wykorzystywanego do badań i warunków klimatycznych i mają charakter stochastyczny. Na podstawie wyników publikowanych badań [2, 3, 6, 9] można powiedzieć, że wartość tego współczynnika zmienia się od 0,26 dla szyn suchych do 0,049 dla szyn mokrych. Jednocześnie wartość współczynnika może w bardzo krótkim czasie ulec bardzo dużej, nieprzewidywalnej zmianie, ponieważ zmienić się może radykalnie stan torów (np. lokalne zabrudzenia).

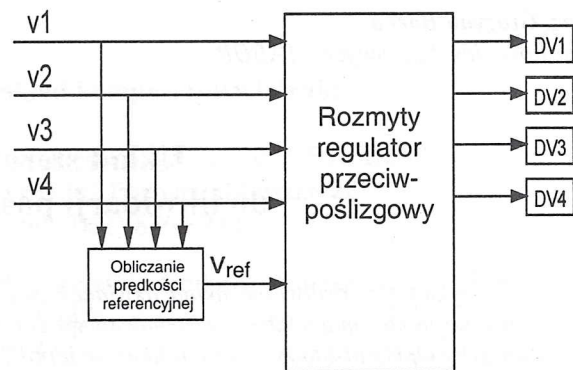
3. UKŁAD PRZECIWPOŚLIZGOWY

3.1. Wstęp

Po rozpoczęciu poślizgu przyczepność może zostać odzyskana poprzez zmniejszenie momentu hamującego, co z kolei może zostać dokonane poprzez zmniejszenie ciśnienia w cylindrach hamulcowych poprzez zawory upustowe. Zawory te są sterowane przez układ przeciwpoślizgowy i umożliwiają zmniejszanie, zwiększanie i utrzymywanie na dowolnym stałym poziomie ciśnienia sprężonego powietrza w cylindrach każdego zestawu kołowego.

3.2. Regulator konwencjonalny i regulator rozmyty

Do poprawnego zaprojektowania konwencjonalnego regulatora, wykorzystującego klasyczną teorię regulacji, konieczne jest utworzenie modelu matematycznego sterowanego obiektu. Z rozważań przedstawionych w rozdziale 2 wynika natomiast, że model taki trudno jest stworzyć. W związku z tym zastosowano regulator rozmyty, ponieważ regulatory rozmyte są w stanie sterować procesami nie do końca określonymi i nieliniowymi [11]. Na rys. 3 przedstawiono strukturę układu przeciwpoślizgowego dla pojazdu o czterech osiach.



Rys. 3. Struktura rozmytego regulatora przeciwpoślizgowego

gdzie: $v1...v4$ – obwodowe prędkości kół, $DV1...DV4$ – zawory upustowe, v_{ref} – prędkość referencyjna pojazdu)

Regulator rozmyty posiada n identycznych torów obliczeniowych, gdzie n – liczba osi pojazdu. Wielkościami regulowanymi są prędkości zestawów kołowych. W związku z tym na wejścia regulatora przeciwpoślizgowego podawane są sygnały niosące informację o prędkości każdego zestawu kołowego: $v1, v2, v3, v4$. Do wykrycia poślizgu niezbędna jest również znajomość rzeczywistej prędkości pojazdu, ta zaś ze względu na koszty nie jest na ogół mierzona. W związku z tym prędkość pojazdu (zwana prędkością referencyjną) obliczana jest w osobnym bloku na podstawie wyników pomiaru prędkości obrotowych wszystkich osi. Jest to złożone zagadnienie stanowiące oddzielny problem. Do dalszych rozważań dotyczących regulatora rozmytego przyjęto, że rzeczywista prędkość pojazdu jest znana. Na podstawie sygnałów $v1...v4$ uzyskuje się sygnały uchybu regulacji dla chwili pomiaru k :

$$e_i(k) = v_{ref}(k) - v_i(k) \quad (5)$$

gdzie: $i=1..4$

Następnie oblicza się wartości zmiany uchybu. Ponieważ:

$$\Delta e_i(k) = e_i(k) - e_i(k-1) \quad (6)$$

więc:

$$\Delta e_i(k) = v_{ref}(k) - v_{ref}(k-1) + v_i(k-1) - v_i(k) \quad (7)$$

Ze względu na dużą bezwładność pojazdu można pominąć zmiany prędkości referencyjnej w przeciągu okresu próbkowania, zatem można przyjąć:

$$\Delta e_i(k) = v_i(k-1) - v_i(k) \quad (8)$$

$$\text{a zatem:} \quad \Delta e_i(k) \equiv a_i(k) \quad (9)$$

Regulator przeciwpoślizgowy będzie realizował odwzorowanie:

$$\Delta u_i(k) = f(e_i(k), \Delta e_i(k)) \quad (10)$$

gdzie: Δu – zmiana wielkości sterującej.

Jak zostało wcześniej powiedziane, wielkością sterującą jest zmiana ciśnienia w cylindrach hamulcowych. Ze względu na praktyczną realizację zadania, wyjściem regulatora są sygnały sterujące zaworami upustowymi. Powodują one wzrost lub spadek ciśnienia o wartość zależną od poprzedniej wartości ciśnienia, czasu trwania sygnału, czasu zwłoki w działaniu zaworów oraz stałej czasowej zaworów.

3.3. Projektowanie rozmytego układu przeciwpoślizgowego

W celu określenia zmiennych lingwistycznych i bazy reguł korzysta się z istniejącej wiedzy o wymaganym sposobie działania regulatora (wiedza eksperta). Dwie zasadnicze informacje dotyczące zadań regulatora i wpływające z nich wnioski można przedstawić następująco:

Wartość uchybu $e(k)$

Regulator przeciwpoślizgowy ma za zadanie tak sterować zaworami upustowymi, by pojazd zahamować ze skutecznością największą możliwą w istniejących warunkach przyczepności, jednocześnie nie dopuszczając do makropoślizgu zestawów kołowych. Z rys. 2 wynika, że skuteczność hamowania będzie największa, jeżeli występować będzie określony mikropoślizg. Ze wzorów (3) i (5) wynika, że:

$$s = e(k) \quad (11)$$

W związku z tym regulator powinien utrzymywać wartości uchybu w zadanych granicach od $s1$ do $s2$, gdzie $s1$ i $s2$ są określonymi wartościami mikropoślizgu.

Wartość zmiany uchybu

Podczas normalnego hamowania służbowego pojazd szynowy ma opóźnienie hamowania nie przekraczające wartości którą oznaczymy jako $a1$. W związku z tym regulator powinien utrzymywać wartość przyspieszenia $a \equiv \Delta e(k)$ w granicach $0..a1$.

Do projektowania regulatora rozmytego przyjęto strukturę Mamdaniego. Wartości lingwistyczne zmiennych regulatora $e(k)$, $\Delta e(k)$ oraz $u(k)$, zdefiniowane na tym etapie przy pomocy zbiorów nierozmytych, określone są w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości lingwistyczne zmiennych $e(k)$, $\Delta e(k)$ oraz $u(k)$

$e(k)$		$\Delta e(k)$		$u(k)$	
PS	$s1 > e(k) > 0$	PL	$\Delta e(k) > a5$	PL	P3
Z	$s2 > e(k) > s1$	PM	$a5 > \Delta e(k) > a4$	PM	P2
NS	$s3 > e(k) > s2$	PS	$a4 > \Delta e(k) > 0$	PS	P1
NM	$s4 > e(k) > s3$	Z	$0 > \Delta e(k) > a1$	Z	H
NL	$s5 > e(k)$	NS	$a1 > \Delta e(k) > a2$	NS	U1
		NM	$a2 > \Delta e(k) > a3$	NM	U2
		NL	$a3 > \Delta e(k)$	NL	U3

gdzie: $a1..a5$ – wartości progowe przyspieszenia, $s1..s5$ – wartości progowe poślizgu, $P1, P2, P3$ – gradienty zwiększania ciśnienia, $U1, U2, U3$ – gradienty zmniejszania ciśnienia, wartości lingwistyczne: PL – duży dodatni, PM – średni dodatni, PS – mały dodatni, Z – zero, NS – mały ujemny, NM – średni ujemny, NL – duży ujemny

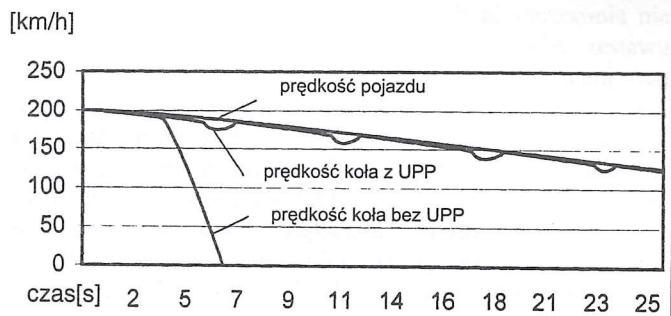
Jako prototyp bazy reguł przyjęto bazę reguł Mac Vicara-Whelana w której występuje tylko jedna wartość lingwistyczna $Z=„zero”$ [11], zmodyfikowana w celu dostosowania do potrzeb układu przeciwpoślizgowego (tabela 2). Modyfikacja bazy reguł wynika z faktu, że podstawowym zadaniem regulatora jest realizowanie skutecznego hamowania. Dlatego też moment hamujący powinien być zmniejszany tak niewiele, jak tylko możliwe, a gdy wartości $e(k)$ i $\Delta e(k)$ znajdują się w określonych zakresach, powinien być na powrót zwiększany.

Tabela 2. Zmodyfikowana baza reguł Mac Vicara-Whelana

$e(k)$	\rightarrow	PS	Z	NS	NM	NL
$\Delta e(k)$		PL	NL	NM	NS	Z
\downarrow		PM	NM	NS	Z	PS
		PS	NS	Z	PS	PM
		Z	NS	PS	PM	PL
		NS	Z	PS	PM	PL
		NM	PS	PM	PL	PL
		NL	PM	PL	PL	PL

4. WYNIKI SYMULACJI

W celu weryfikacji algorytmu zaprojektowanego rozmytego regulatora przeciwpoślizgowego, przeprowadzono szereg komputerowych symulacji jego działania. Do zamodelowania pojazdu wykorzystano programowy model hamowanego zestawu kołowego. Całość została oprogramowana w języku C++. Symulacje przeprowadzono dla różnych danych wejściowych, np. prędkości początkowej, parametrów pojazdu oraz wielkości i sposobu zmian przyczepności. Na rys. 4 przedstawiono przykładowy przebieg prędkości dla pełnego hamowania pojazdu.



Rys. 4. Przykładowy wynik symulacji (UPP – układ przeciwpoślizgowy)

5. WNIOSKI

W artykule przedstawiono uproszczony model matematyczny hamowanego zestawu kołowego oraz analizę zjawiska poślizgu. Wobec tego, że zjawisko to jest silnie nieliniowe, projektowanie regulatora wykorzystującego konwencjonalne prawa sterownia nie zapewni wystarczającej poprawności działania układu. Wobec tego zaproponowano zastosowanie regulatora rozmytego. Regulator przedstawiony w artykule jest regulatorem typu Mamdaniego i wykorzystuje zmodyfikowaną bazę reguł Mac Vicara-Whelana. Do modyfikacji bazy reguł oraz do zdefiniowania zmiennych

lingwistycznych zastosowano wiedzę ekspercką dotyczącą sposobu likwidacji poślizgu przy hamowaniu. Wartości lingwistyczne zmiennych wejściowych i wyjściowych natomiast zostały określone przy pomocy zbiorów nierozmytych. Na podstawie otrzymanych wyników symulacji komputerowej stwierdzono, że zaprojektowany rozmyty układ likwidacji poślizgu, pomimo bardzo prostej struktury poprawnie realizuje swoją funkcję dla stochastycznie zmiennych parametrów przyczepności.

Przedstawiony w artykule prototypowy układ stanie się na następnym etapie prac podstawą opracowania kolejnych wariantów układu wykorzystujących w pełnym zakresie teorię zbiorów rozmytych [11]. Na tym etapie określone zostaną rozmyte funkcje przynależności wartości lingwistycznych, ustalone zostaną interpretacje operatorów rozmytych, strategia wnioskowania oraz sposób defuzyfikacji. Tak otrzymany układ przeciwpoślizgowy zostanie następnie, na podstawie wyników symulacji komputerowej oraz badań na obiekcie rzeczywistym, zoptymalizowany w celu osiągnięcia maksymalnej skuteczności hamowania.

Wyniki symulacji zostały uzyskane przy założeniu że znana jest rzeczywista prędkość pojazdu. W praktyce prędkość pojazdu będzie określana na podstawie pomierzonych prędkości kątowych osi. W sytuacji, gdy wszystkie osie wpadną w poślizg, prędkość pojazdu będzie znana z pewnym przybliżeniem. Istotnym zagadnieniem będzie więc w przyszłości zbadanie wrażliwości algorytmu regulatora przeciwpoślizgowego na uchyb wyznaczonej prędkości referencyjnej wobec prędkości rzeczywistej pojazdu.

Literatura

- [1] Caldara S., Garcia Rivera M., Poma G.: *Software implementation of an anti-skidding control system for traction electrical drives based on fuzzy-identification techniques. Symposium on Power Electronics, Industrial Drives, Power Quality, Traction Systems, Capri, 1996, s. C3-19 – C3-25*
- [2] Gärtner E.: *Kraftschluß zwischen Rad und Schiene. Schienenfahrzeuge 1976, nr 12, s. 417–420*
- [3] Gruszczyński J.: *Eksplatacja pojazdów trakcyjnych. WKŁ, Warszawa, 1977*
- [4] Klein R.: *Antilock-braking system and vehicle speed estimation using fuzzy logic. 1st Embedded Computing Conference, Paris, 1996*
- [5] Kumagai N.: *In search of mechanism of wheel skid and wheel flat occurrence. Japanese Railway Engineering, 1992, nr 116, s. 16–20*
- [6] Plewako S.: *Podstawy trakcji elektrycznej. WKŁ, Warszawa, 1969*
- [7] Podolski J., Kacprzak J., Mysłek J.: *Zasady trakcji elektrycznej. WKŁ, Warszawa, 1980*
- [8] Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L.: *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. PWN, Warszawa, 1997*
- [9] Saumweber E.: *Leistungsgrenzen kombinierter Bremssysteme. ZEV-Glas., 1963, Ann. 98, 1974, nr 7/8, s. 259–265*
- [10] Ünsal C., Kachroo P.: (1999) *Sliding mode measurement feedback control for antilock braking systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology 1999, str. 271–281*
- [11] Yager R.R., Filev D.P.: *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. WNT, Warszawa, 1995*