

Mikroprocesorowy układ wykrywania i likwidacji poślizgu przy hamowaniu

W artykule przedstawiono matematyczny model zestawu kołowego oraz omówiono zjawisko poślizgu przy hamowaniu. Przedstawiono budowę oraz działanie mikroprocesorowego układu wykrywania i likwidacji poślizgu kół przy hamowaniu. Omówiono sposób pomiaru prędkości obrotowej kół oraz sposób obliczania ich przyspieszeń. Opisano zadania układu likwidacji poślizgu. Zaprezentowano wyniki symulacji działania układu.

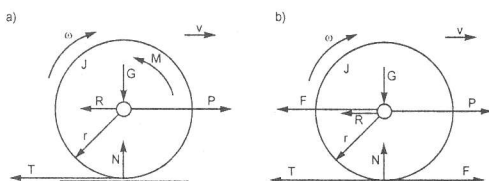
1. Wprowadzenie

Jeżeli moment hamujący zestaw kołowy przekroczy wartość dopuszczalną ograniczoną istniejącymi warunkami przyczepności, zestaw wpada w poślizg. Jeżeli nie zostaną przeprowadzone 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, w konsekwencji czego dochodzi do powstania „płaskich miejsc” na powierzchni tocznej kół. Płaskie miejsca obniżają parametry jazdy pojazdu i zwiększają poziom drgań i hałasu [9], 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 zestawu kołowego

Na rys. 1a przedstawiono uproszczony rozkład sił i momentów dla hamowanego zestawu kołowego [5, 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 opisany jest poniższymi równaniami:

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

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

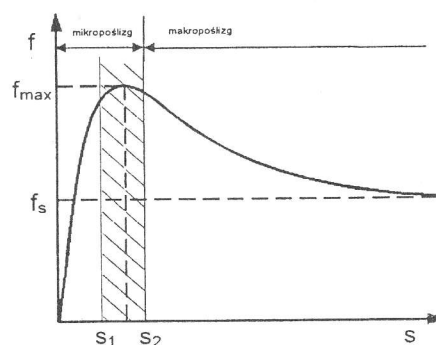
$$s = \frac{v - \omega \cdot r}{v} \quad (3)$$

Siła przyczepności (hamowania) dana jest poniższym wzorem:

$$T = f \cdot G \quad (4)$$

gdzie: s – poślizg względny koła po szynie,
 f – wartość współczynnika przyczepności,
 m – masa.

Przebieg współczynnika przyczepności f w funkcji poślizgu względnego s przedstawiono na rys. 2 [8].



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 wartość maksymalną, dopuszczalną w danych warunkach przyczepności, nastąpi zerwanie przyczepności pomiędzy kołem i szyną i rozpocznie się proces makropoślizgu koła.

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. Na podstawie wyników publikowanych badań, mających charakter stochastyczny [6, 7, 11] można powiedzieć, że wartość tego współczynnika zmienia się od 0,26 dla szyn suchych do 0,049 dla szyn mokrych.

3. Budowa układu przeciwoślizgowego

Układ przeciwoślizgowy przedstawiony jest poglądowo na rys.3 i składa się z następujących elementów:

1. sterownik mikroprocesorowy,
2. panel operatorski,
3. czujniki prędkości (CP),
4. koła zębate (KZ),
5. zawory przeciwoślizgowe (ZPP),
6. cylindry hamulcowe,
7. klocki hamulcowe.

Sterownik mikroprocesorowy jest podstawową jednostką logiczną, która na podstawie pomiaru prędkości obrotowej każdej osi pojazdu wykrywa poślizg odpowiedniego zestawu kołowego. Wartości chwilowe prędkości kół mierzone są na podstawie sygnałów z czujników prędkości. Czujnik prędkości (CP) wraz z współpracującym kołem zębatym (KZ) umocowany jest w maźnicy każdej osi wózka [4]. Po

wykryciu poślizgu przez sterownik mikroprocesorowy generowane są sygnały wyjściowe na cewki zaworów przeciwoślizgowych (ZPP). Każdy zawór wyposażony jest w dwie cewki sterujące: blokującą (ZB) i upuszczającą (ZU), które upuszczają powietrze z cylindrów hamulcowych (przez co zmniejszają siłę hamującą), utrzymują na stałym poziomie wartość ciśnienia lub napełniają cylindry hamulcowe (przez co zwiększają siłę hamującą). Stany pracy zaworów przeciwoślizgowych pokazane są w tabeli 1. Zespół przeciwoślizgowy składa się z czterech zaworów przeciwoślizgowych (jeden zawór na każdą oś). Każdy zawór przeciwoślizgowy steruje dwoma cylindrami hamującymi. Natomiast każdy z cylindrów hamujących zmniejsza lub zwiększa nacisk klocków hamulcowych jednego koła. Panel operatorski wyświetla informacje sterujące i diagnostyczne związane z poślizgiem.

Stany pracy zaworów przeciwoślizgowych

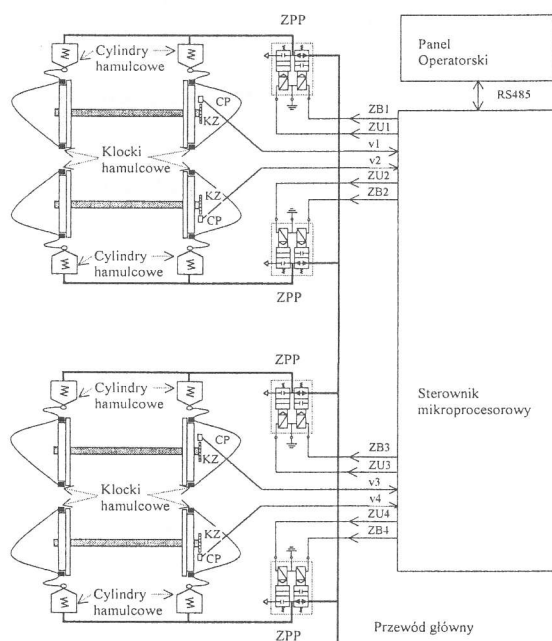
Tabela 1.

Lp.	ZU	ZB	stan zaworu
1	0	0	normalne napełnianie cylindrów
2	1	1	odcięcie zasilania powietrza i odpowietrzanie cylindrów
3	0	1	odcięcie zasilania powietrza i zamknięcie cylindra z ciśnieniem
4	1	0	stan zabroniony

gdzie: 0 - oznacza brak napięcia,

1 - podanie napięcia na cewkę zaworu

Brak zasilania obu cewek (sygnały 0;0) oznacza normalne połączenie między zbiornikiem a cylindrem hamulcowym, natomiast zasilanie tylko cewki upuszczającej jest zabronione.

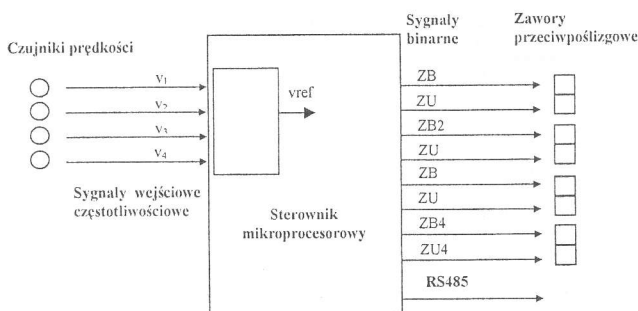


Rys.3. Schemat poglądowy układu przeciwoślizgowego dla lokomotywy 4-osiowej

4. Budowa sterownika mikroprocesorowego

Do sterowania układem przeciwpoślizgowym przedstawionym na rys.3 można zastosować sterownik mikroprocesorowy PLC składający się z układu 4 wejść częstotliwościowych, układu 8 wyjść cyfrowych oraz wyjścia RS485 (ewentualnie Profibus DP, CAN itp.) do połączenia z panelem operatorskim. Bardzo ważne jest, aby sterownik mikroprocesorowy miał możliwość pomiaru czasu trwania wejściowego impulsu częstotliwościowego z dużą dokładnością.

Dodatkowo (opcjonalnie) sterownik mikroprocesorowy może zawierać układ wejść cyfrowych i dodatkowe wyjścia cyfrowe w przypadku realizowania innych funkcji. Schemat blokowy sterownika mikroprocesorowego przedstawiony jest na rys.4.



Rys.4. Schemat blokowy sterownika mikroprocesorowego

Planuje się, że przedstawiony układ przeciwpoślizgowy zostanie zastosowany w modyfikowanej lokomotywie ET-22 [1]. Ponieważ lokomotywa ET-22 jest lokomotywą 6-cio osiową, to zmianie ulegnie jedynie pomiar prędkości, który będzie realizowany z 6 osi (a nie jak w rozważanym modelu z 4 osi). Ilość zaworów przeciwpoślizgowych nie ulegnie zmianie. Każdy cylinder hamulcowy działa na klocki hamulcowe jednego koła i dodatkowo na połowę klocków hamulcowych środkowego koła. Algorytm likwidacji poślizgu powinien uwzględniać dodatkowo poślizg kół z osi środkowej wózka. Jednak prawdopodobieństwo tego poślizgu jest bardzo małe.

5. Metody pomiaru prędkości i przyspieszenia

Przy określaniu poślizgu bardzo ważne są dokładne pomiary prędkości i przyspieszenia zestawów kołowych [12,13,14]. Do rozważań można przyjąć, że zostanie zastosowany czujnik prędkości dający około 100 impulsów na 1 obrót koła, którego średnica wynosi 1,25 m, (w przypadku zastosowania innego czujnika należy zmienić czasy pomiarów dla uzyskania zbliżonych wartości błędów). Dla porównania można obliczyć błędy jakie powstaną przy pomiarach prędkości i przyspieszenia metodą częstotliwościową i czasową. Zakładając czas pomiaru prędkości T_v , to czas pomiaru przyspieszenia T_a będzie dwukrotnie większy (w czasie pomiaru przyspieszenia zostanie dokonany dwukrotny pomiar prędkości).

W tabeli 2 przedstawione są błędy metody pomiaru prędkości i przyspieszenia metodą częstotliwościową dla różnych czasów pomiaru. Metoda częstotliwościowa polega

na zliczaniu impulsów z czujnika prędkości $v_{1,(2,3,4)}$ w stałym okresie pomiarowym T_v . Błędy kwantyzacji pomiaru prędkości Δv_k i przyspieszenia Δa_k określone są wzorami (5) i (6):

$$\Delta v_k = \frac{1}{f_o \cdot T_v} \text{ [km/h]} \quad (5)$$

$$\Delta a_k = \frac{2}{3,6 \cdot f_o \cdot T_a^2} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (6)$$

gdzie:

f_o – częstotliwość odpowiadająca prędkości 1 km/h; przy założeniach przedstawionych wyżej $f_o = 7,077$ [Hz],

T_v – czas pomiaru prędkości [s],

T_a – czas pomiaru przyspieszenia [s], ($T_a = 2 \cdot T_v$).

Błędy kwantyzacji prędkości i przyspieszenia metodą częstotliwościową.

Tabela 2.

Błąd kwantyzacji	T_v [s]		
	0,04	0,16	1,00
Δv_k [km/h]	3,53	0,88	0,14
Δa_k [m/s ²]	49,0	3,07	0,08

W tabeli 3 przedstawione są błędy kwantyzacji pomiaru prędkości i przyspieszenia metodą czasową. Metoda czasowa polega na pomiarze czasu przejazdu stałego odcinka drogi l , który określany jest na podstawie sygnału uzyskanego z czujnika prędkości $v_{1,(2,3,4)}$. Do pomiaru czasu należy użyć generatora kwarcowego o częstotliwości wzorcowej F minimum 1MHz (dla wyższej częstotliwości wzorca czasu błędy będą mniejsze). Liczba impulsów K zliczona podczas przejazdu stałego odcinka drogi l w czasie T_v jest określona wzorem (7).

$$K = F \cdot T_v \quad (7)$$

gdzie: F - częstotliwość wzorcowa [Hz]

T_v - czas pomiaru [s]

Liczba K jest proporcjonalna do czasu pomiaru T_v . Błędy kwantyzacji pomiaru prędkości Δv_k i przyspieszenia Δa_k określone są wzorami (8) i (9):

$$\Delta v_k = \frac{3,6 \cdot l \cdot F}{K \cdot (K + 1)} \text{ [km/h]} \quad (8)$$

$$\Delta a_k = \frac{2 \cdot l \cdot F^2}{K \cdot (K^2 - 1)} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (9)$$

gdzie: l – droga [m]

F - częstotliwość wzorcowa [Hz]

K – liczba zliczonych impulsów

Błędy kwantyzacji prędkości i przyspieszenia metodą czasową.

Tabela 3.

Błąd kwantyzacji	T _v [s] dla v=150 km/h		
	0,02	0,04	0,16
K[-]	20 000	40 000	160 000
l [m]	0,83	1,67	6,67
Δv _k [km/h]	0,008	0,004	0,0009
Δa _k [m/s ²]	0,21	0,052	0,0033

Dla obydwu metod pomiaru prędkości i przyspieszenia występuje taki sam błąd metody związany z dynamicznymi zmianami parametrów mierzonych w czasie pomiaru. Błąd metody wynika z tego, że pomiar przeprowadzony jest w określonym odstępie czasu, a więc w chwili zakończenia pomiaru otrzymuje się wartość średnią a nie wartość chwilową. W tabeli 4 przedstawione są błędy metody pomiaru prędkości i przyspieszenia dla różnych czasów pomiaru. Błędy te określone są wzorami (10) i (11):

$$\Delta v_m = 1,8 \cdot a \cdot T_v \quad [km/h] \quad (10)$$

$$\Delta a_m = 1,5 \cdot a \cdot T_a = 3 \cdot a \cdot T_v \quad [m/s^2] \quad (11)$$

Błędy metody pomiaru prędkości i przyspieszenia.

Tabela 4.

Błąd metody	T _v [s]			
	0,02	0,04	0,16	1
	dla a = 1 m/s ²			
Δv _m [km/h]	0,036	0,072	0,288	1,8
	dla a' = da/dt = 0,3 m/s ³			
Δa _m [m/s ²]	0,018	0,036	0,14	0,9

Błędy całkowite pomiaru prędkości Δv_c i przyspieszenia Δa_c określone wzorami (12) i (13).

$$\Delta v_c = \Delta v_k + \Delta v_m \quad [km/h] \quad (12)$$

$$\Delta a_c = \Delta a_k + \Delta a_m \quad [m/s^2] \quad (13)$$

Z analizy tabel 2,3 i 4 wynika, że tylko metoda czasowa pomiaru prędkości i przyspieszenia daje dobre dokładności pomiaru dla czasów T_v ≤ 40ms. W tym przypadku całkowite błędy pomiaru prędkości Δv_c i przyspieszenia Δa_c maksymalnie wynoszą Δv_c = 0,076 < 0,1 [km/h] i Δa_c = 0,088 < 0,1 [m/s²].

W rozważaniach pominięto błędy wynikające z nierównomiernego wykonania czujnika impulsów co może powodować, że poszczególne jednostki drogi różnią się o wartość Δs. Pominięto również błędy wynikające z nierównomiernego zużywania się kół lokomotywy; w tym przypadku układ przeciwpoślizgowy można wyposażyć w układ korekcji średnic kół.

Do dalszych rozważań przy opracowywaniu algorytmu układu wykrywania poślizgu przyjęto metodę czasową pomiaru i czas pomiaru ≤ 0,04 s.

6. Algorytm działania regulatora przeciwpoślizgowego

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 [15].

Na podstawie sygnałów prędkości v₁... v₄ uzyskuje się sygnały uchybu regulacji oraz zmiany uchybu regulacji dla chwili pomiaru k:

$$e_i(k) = v_{ref}(k) - v_i(k) \quad (14)$$

$$\Delta e_i(k) \equiv a_i(k) \quad (15)$$

gdzie: i –kolejny numer osi.

W regulatorach rozmytych zamiast matematycznie opisanego algorytmu działania, wykorzystuje się istniejącą wiedzę o wymaganym sposobie działania regulatora (wiedza eksperta). Dwie zasadnicze informacje dotyczące zadań regulatora i wypływające z nich wnioski można przedstawić następująco:

Wartość uchybu e(k)

Regulator przeciwpoślizgowy ma za zadanie tak sterować zaworami upustowymi, aby 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 (14) wynika, że dla danej wartości prędkości v_{ref}:

$$s \equiv e(k) \quad (16)$$

W związku z tym regulator powinien utrzymywać wartości uchybu w zadanych granicach od s₁ do s₂, gdzie s₁ i s₂ są określonymi wartościami mikropoślizgu (rys. 2).

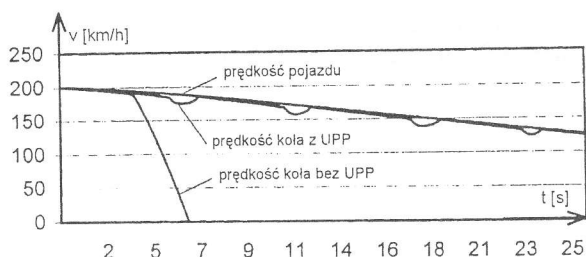
Wartość zmiany uchybu

Podczas normalnego hamowania służbowego pojazd szynowy ma opóźnienie hamowania nie przekraczające wartości, którą oznaczono jako a₁. W związku z tym regulator powinien nie dopuścić do przekroczenia przez przyspieszenie a=e(k) wartości a₁.

Do projektowania regulatora rozmytego przyjęto strukturę Mamdaniego, zaś jako prototyp bazy reguł przyjęto bazę reguł Mac Vicara-Whelana, w której występuje tylko jedna wartość lingwistyczna Z=„zero” [15, 2], zmodyfikowana w celu dostosowania do potrzeb układu przeciwpoślizgowego.

7. Wyniki symulacji

W celu weryfikacji zaprojektowanego algorytmu dla rozmytego regulatora przeciwpoślizgowego, przeprowadzono szereg komputerowych symulacji jego działania. Do zamodelowania pojazdu wykorzystano programowy model hamowanego zestawu kołowego [3]. 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. 5 przedstawiono przykładowy przebieg prędkości dla hamowania pojazdu bez układu przeciwpoślizgowego oraz z układem.



Rys. 5. Przykładowy wynik symulacji (UPP – układ przeciwpoślizgowy)

Literatura

- [1] Barna G., Założenia układu wykrywania i likwidacji poślizgu przy rozruchu i hamowaniu dla zmodernizowanej lokomotywy ET22, Poznań, 2000
- [2] Barna G., Układ sterowania rozmytego dla likwidacji poślizgu przy hamowaniu, XV Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe”, Szklarska Poręba, 4 - 7 września 2002 r.
- [3] Barna G., Kaluba M.: Matematyczny model pojazdu szynowego i jego zastosowanie do symulacji działania układu przeciwpoślizgowego, XV Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe”, Szklarska Poręba, 4-7 września 2002 r.
- [4] Barna G., Stypka M.: Dobór czujników prędkości dla układu likwidacji poślizgu, OR-8268 (opracowanie niepublikowane), IPS Poznań 2000
- [5] 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 Power Electronics, Industrial Drives, Power Quality, Traction Systems, Capri, 1996, s. C3-19 – C3-25
- [6] Gärtner E.: Kraftschluß zwischen Rad und Schiene. Schienenfahrzeuge 1976, nr 12, s. 417-420
- [7] Gruszczyński J.: Eksploatacja pojazdów trakcyjnych. WKŁ, Warszawa, 1977
- [8] Klein R.: Antilock-braking system and vehicle speed estimation using fuzzy logic 1st Embedded Computing Conference, Paris, 1996
- [9] Kumagai N.: In search of mechanism of wheel skid and wheel flat occurrence Japanese Railway Engineering, 1992, nr 116, s. 16-20
- [10] Podolski J., Kacprzak J., Mysłek J.: Zasady trakcji elektrycznej WKŁ, Warszawa, 1980
- [11] Saumweber E.: Leistungsgrenzen kombinierter Bremssysteme, ZEV-Glas., 1963, Ann. 98, 1974, nr 7/8, s. 259-265
- [12] Stypka M.: Analiza cyfrowych układów pomiarowych i układów regulacji dla lokomotywy 104E, OR-6676 (opracowanie niepublikowane), IPS Poznań, 1983
- [13] Stypka M.: Układy kontrolno-pomiarowe – analiza matematyczna wybranych sygnałów prędkości, przyspieszenia i drogi, OR-7754 (opracowanie niepublikowane),
- [14] Stypka M., Frączek J.: Mikroprocesorowy układ pomiaru prędkości i przyspieszenia pojazdów trakcyjnych, X Konferencja Naukowa „Pojazdy Szynowe”, Wrocław, 14-16 września 1994 r., tom 1
- [15] Yager R.R., Filev D.P.: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego WNT, Warszawa, 1995