CZASOPISMO TECHNICZNE M
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

z. 8-M/2008
ISSN 0011-4561
ISSN 1897-6328

ANDRZEJ GAJEK, STANISŁAW WALCZAK*

MONITOR DIAGNOSTYCZNY STANU OKŁADZIN CIERNYCH HAMULCÓW POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

DIAGNOSTIC MONITOR OF THE VEHICLE BRAKING SYSTEM PADS WEAR

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości rozwoju systemu diagnostyki pokładowej hamulców samochodów osobowych. W zakresie kontroli elementów mechanicznych zaprezentowano nowy monitor diagnostyczny pozwalający na ocenę nierównomierności sił hamujących. Zaproponowano strategie decyzyjne pozwalające minimalizować błędy w diagnostycznej ocenie stanu elementów układu hamulcowego.

Słowa kluczowe: *hamulce, diagnostyka, OBD, monitory diagnostyczne*

Abstract

The paper presents the development of the on board system for diagnostics of the car brakes. The new diagnostic monitor of the brake pads wear and the sensor for the foreseeing the intensity of the pads wear is presented. The strategies of the diagnostic fault signalization for the on board diagnostic systems are presented: strategy of the symptom confirmation with moving average and statistical analysis of the tests.

Keywords: *brakes, diagnostic, OBD, diagnostic monitors*

* Dr hab. inż. Andrzej Gajek, dr inż. Stanisław Walczak, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

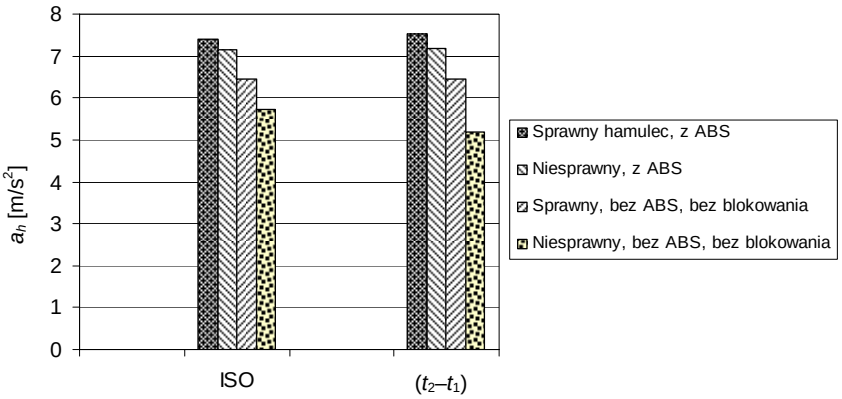
BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Układy hamulcowe z systemem przeciwblokującym (ABS) stały się powszechnym wyposażeniem pojazdów samochodowych. Jakość działania tych układów zależy zarówno od sprawności elementów mechaniczno-hydraulicznych, jak i elektronicznych. System ABS już na etapie konstruowania został wyposażony w podsystem autodiagnostyczny, który nadzoruje działanie elementów elektrycznych i elektronicznych. Realizowany jest on zarówno poprzez odpowiednią budowę sterownika (dwa procesory – redundancja), jak i jego oprogramowanie. Natomiast układy mechaniczne hamulca w niewielkim stopniu podlegają nadzorowi diagnostycznemu. Ich stan ma istotny wpływ na opóźnienie i drogę hamowania samochodu. W artykule zaproponowano procedurę diagnostyczną, która pozwala na ocenę nierównomierności sił hamowania na kołach jednej osi.

2. Monitor diagnostyczny stanu okładzin ciernych hamulca

Podczas eksploatacji samochodu może wystąpić niesprawność układu hamulcowego polegająca na znacznym spadku współczynnika tarcia okładzin ciernych hamulca jednego z kół. Jak wykazują badania, taki stan może być niezauważony przez kierującego, szczególnie jeżeli samochód wyposażony jest w układ ABS. Niesprawność ta skutkuje zmniejszeniem opóźnienia hamowania (rys. 1) i wydłużeniem drogi hamowania. Układ przeciwblokujący ABS wykrywa różnicę w opóźnieniu koła z niesprawnymi okładzinami w stosunku do koła sprawnego. Jeżeli ta niesprawność dotyczy kół tylnych, dla których obowiązuje zasada sterowania *select low*, to wykorzystanie przyczepności między kołem z hamulcem o niesprawnych okładzinach i nawierzchnią jezdni jest dodatkowo ograniczane



Rys. 1. Porównanie średniego opóźnienia hamowania wg ISO oraz średniego opóźnienia w przedziale czasu t_1–t_2 samochodu ze sprawnymi okładzinami ciernymi z samochodem z obniżonym współczynnikiem tarcia okładzin koła przedniego lewego

Fig. 1. Comparison of average braking deceleration according to ISO and average braking deceleration at time interval t_1–t_2 vehicle with efficient braking system and vehicle with reduced coefficient of friction in front left wheel brake shoe

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

przez zatrzymanie narostu ciśnienia w tym hamulcu w chwili osiągnięcia wartości granicznych na kole ze sprawnym układem hamulcowym. Oprócz zmniejszenia opóźnienia hamowania występuje zmiana toru jazdy hamowanego samochodu, szczególnie wyraźna w pojazdach bez układu ABS [8]. Przy 40% nierównomierności sił hamujących i hamowaniu gwałtownym samochód ulega niebezpiecznemu zarzuceniu zarówno na suchej, jak i mokrej nawierzchni. Natomiast badania hamulców z układami ABS wykazały, że podczas hamowania z niesprawnymi okładzinami ciernymi jednego z kół ABS ogranicza ściąganie samochodu z zamierzonego toru jazdy, co jest zgodne z zasadą działania tego układu. Układ przeciwblokujący łagodzi więc skutki niesprawności mechanicznej.

Proponowany monitor diagnostyczny stanu okładzin polega na ciągłym nadzorze (monitorowaniu) parametrów kinematycznych kół hamowanych i porównywaniu wyników między kołem prawym i lewym. Na podstawie układu sił i momentów działających na hamowane koło (rys. 2) można zapisać

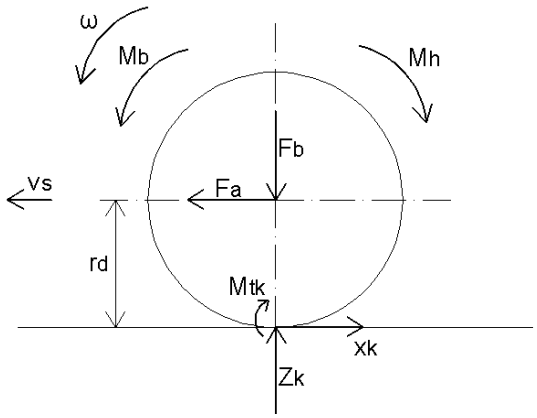
$$\begin{aligned} M_h - M_b + M_t - X_k r_d &= 0 \\ F_a - X_k &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Po wprowadzeniu odpowiednich zależności dynamicznych równanie momentów można zapisać jako

$$M_h = I_k \varepsilon_k + Z_k \mu_k r_d - Z_k f_t \tag{2}$$

gdzie:

- I_k – moment bezwładności koła hamowanego,
- ε_k – opóźnienie kątowe koła,
- μ_k – współczynnik wykorzystania przyczepności pod kołem hamowanym,
- r_d – promień dynamiczny koła,
- f_t – współczynnik oporów toczenia.



Rys. 2. Układ sił i momentów działający na koło hamowane

Fig. 2. Forces and moments acting on braking wheel

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Jeżeli założymy takie samo pionowe obciążenie i opory toczenia kół prawej i lewej strony pojazdu, to różnica momentów hamujących między tymi kołami, spowodowana np. niesprawnością okładzin, na nawierzchni o takim samym współczynniku tarcia pod kołem prawym i lewym, wyniesie

$$M_{hpr} - M_{hl} = I_k(\varepsilon_{pr} - \varepsilon_l) + Z_k(\mu_{pr} - \mu_l)r_d \tag{3}$$

Dla hamowań mało intensywnych, przy których nie uruchamia się jeszcze układ ABS, można przyjąć zależność liniową między poślizgiem koła hamowanego s a współczynnikiem wykorzystania przyczepności μ (rys. 3)

$$\mu_{pr} = s_{pr}\mathrm{tg}\alpha, \quad \mu_l = s_l\mathrm{tg}\alpha \tag{4}$$

gdzie α to kąt nachylenia początkowej części charakterystyki $\mu(\alpha)$.

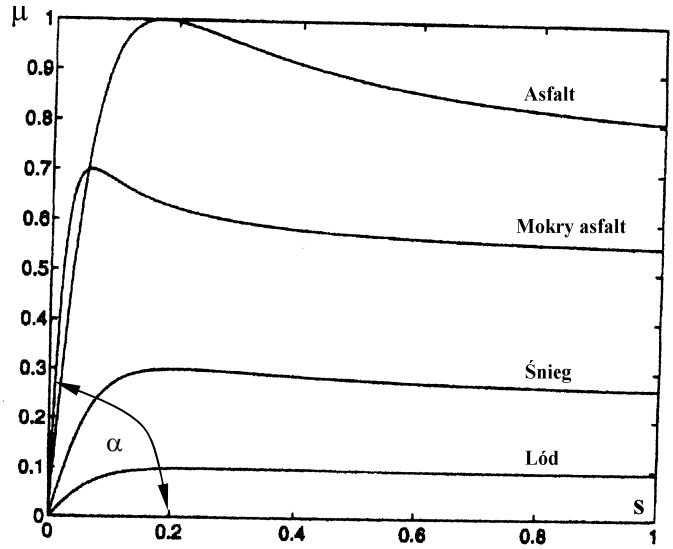
Poślizg koła wyraża się zależnością

$$s = 1 - \frac{\omega_k r_d}{v_s} \tag{5}$$

gdzie:

v_s – prędkość wzdłużna samochodu,

ω_k – prędkość obwodowa koła hamowanego.



Rys. 3. Zależność współczynnika przyczepności μ od poślizgu koła s na różnych nawierzchniach

Fig. 3. Coefficient of friction μ as a function of longitudinal slip at different road surfaces

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Uwzględniając powyższe zależności, możemy zapisać

$$M_{hpr} - M_{hl} = I_k\left(\varepsilon_{pr} - \varepsilon_l\right) + Z_k\left(s_{pr} - s_l\right)\mathrm{tg}\alpha \cdot r_d \tag{6}$$

Wartość składnika $I_k(\varepsilon_{pr} - \varepsilon_l)$ jest mała i w ustalonym okresie hamowania nie przekracza ok. 1% wartości momentu hamującego M_h. Pomijając składnik związany z opóźnieniem koła ε_k oraz opory toczenia, względną różnicę momentów hamujących koła prawego i lewego względem koła o większym momencie $M_{h\max}$ można opisać zależnością

$$k_M = \frac{M_{hpr} - M_{hl}}{\max\left(M_{hpr}, M_{hl}\right)} \cong \frac{s_{pr} - s_l}{\max\left(s_{pr}, s_l\right)} = \frac{\omega_l - \omega_{pr}}{\dfrac{v_s}{r_d} - \min\left(\omega_l, \omega_{pr}\right)} \tag{7}$$

Obliczenie współczynnika nierównomierności momentów hamujących wymaga pomiarów prędkości kątowej kół oraz prędkości wzdłużnej samochodu w czasie hamowania. Niestety, w samochodach nie ma czujnika pozwalającego na pomiar prędkości wzdłużnej samochodu podczas intensywnego hamowania. W celu zastosowania tej metody w praktyce wprowadzono współczynnik

$$k_s = \frac{\omega_l - \omega_{pr}}{\min\left(\omega_l, \omega_{pr}\right)} \cong s' = s_{pr} - s_l \tag{8}$$

Współczynnik ten w przybliżeniu przedstawia różnicę poślizgów pomiędzy kołem prawym i lewym, a w konsekwencji podczas hamowania na nawierzchni jednorodnej różnicę wykorzystania przyczepności. Badania wstępne wykazały, że dla sprawnych hamulców wskaźnik ten nie przekracza 1%, a dla nierównomierności momentów hamujących rzędu 30% wynosi ok. 2%. Są to niewielkie wartości bezwzględne, wymagające precyzyjnego pomiaru prędkości. Natomiast różnica między nimi przekracza 100%. Wskaźnik k_s może mieć wartości dodatnie lub ujemne, co pozwala ustalić, na którym kole jest mniejszy moment hamujący.

3. Wyznaczanie poślizgu koła hamowanego

W celu porównania wprowadzonego współczynnika k_s z rzeczywistą różnicą poślizgów kół prawej i lewej strony pojazdu mierzono prędkość wzdłużną pojazdu za pomocą głowicy CORREVIT. Zgodnie z zależnością (5) do wyznaczenia poślizgu koła oprócz prędkości wzdłużnej pojazdu i prędkości kątowej tego koła niezbędna jest znajomość promienia dynamicznego. Promień dynamiczny, wg [9] można wyznaczyć z zależności

$$r_d = \frac{1}{3} r_{\mathrm{stat}} + \frac{2}{3}\left(r_{\mathrm{stat}} - \Delta\delta_z\right) \tag{9}$$

gdzie:

r_{stat} – promień statyczny,

$\Delta\delta_z$ – zmiana ugięcia pionowego opony podczas hamowania.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Znając sztywność promieniową opony c_{op}, można wyznaczyć zmianę ugięcia pionowego opony podczas hamowania z zależności

$$\Delta\delta_z = \frac{\Delta Z_k}{c_{\text{op}}} \tag{10}$$

gdzie:

$$\Delta Z_k = Z_k - Z_{k\,\text{stat}} \tag{11}$$

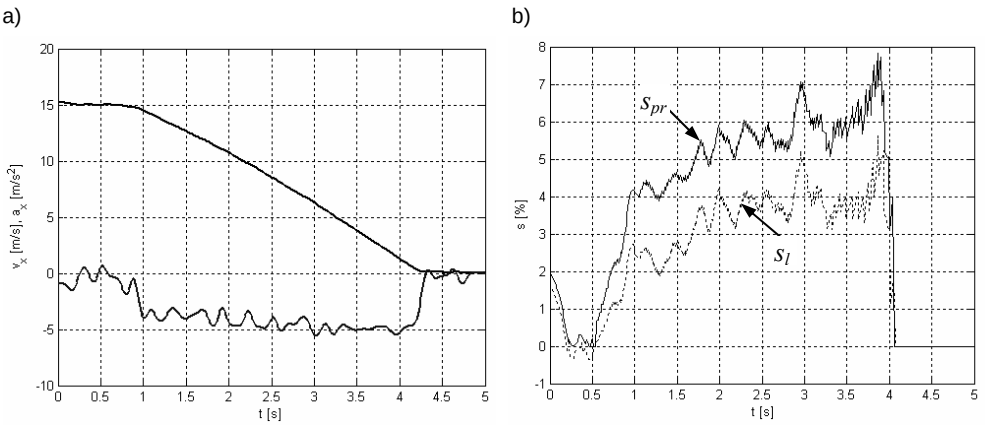
Z_k – obciążenie pionowe koła podczas hamowania,
$Z_{k\,\text{stat}}$ – obciążenie statyczne koła.

Przyrost obciążenia pionowego kół osi przedniej i tylnej pojazdu podczas prostoliniowego hamowania można wyznaczyć z zależności

$$\begin{aligned} \Delta Z_{kp} &= \frac{m a_h h}{a+c} \\ \Delta Z_{kt} &= \frac{-m a_h h}{a+c} \end{aligned} \tag{12}$$

gdzie:

m – masa pojazdu,
h – wysokość środka masy nad jezdnią,
a – odległość środka masy od osi przedniej,
c – odległość środka masy od osi tylnej,
a_h – opóźnienie hamowania, mierzone lub obliczane na podstawie prędkości wzdłużnej.



Rys. 4. Przykładowe hamowanie samochodu z obniżonym współczynnikiem tarcia okładzin przedniego lewego koła: a) prędkość i opóźnienie hamowania, b) poślizgi kół przednich

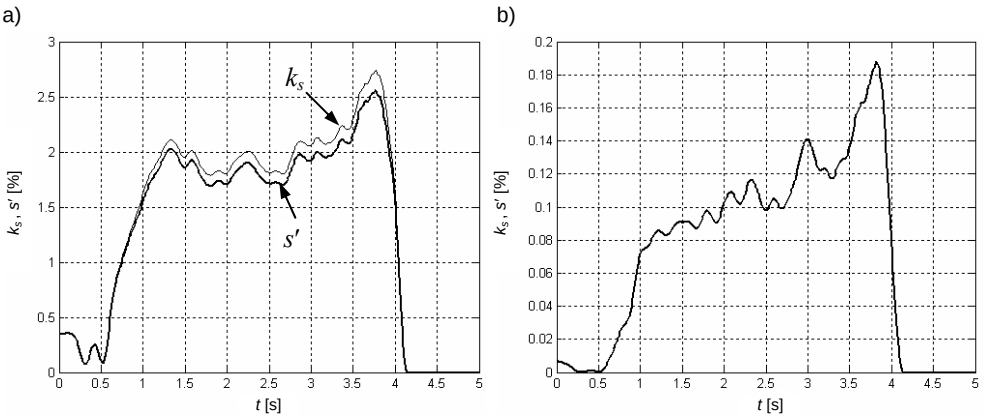
Fig. 4. The example of braking vehicle with reduced coefficient of friction in front left wheel brake shoe: a) vehicle speed and vehicle braking deceleration, b) front wheels sleep

Na rysunkach 4b) i 6b) przedstawiono przebiegi czasowe poślizgów kół przednich przy hamowaniu na suchej nawierzchni asfaltowej z obniżonym współczynnikiem tarcia okła-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

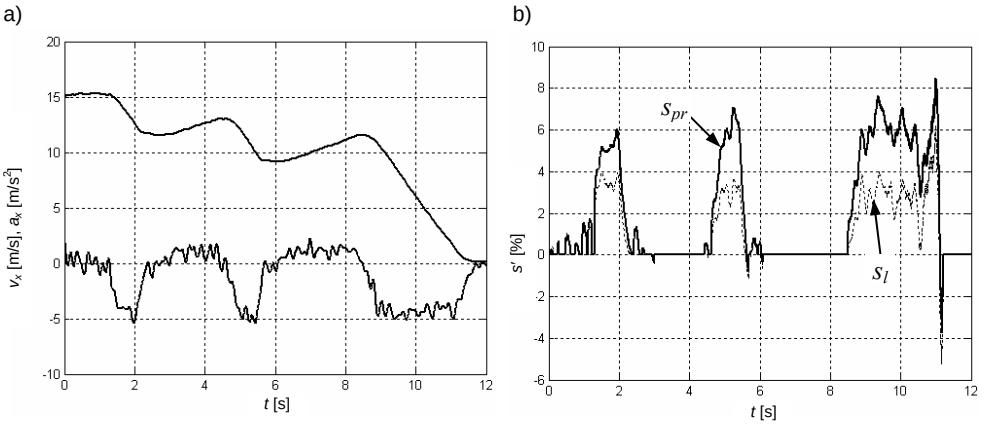
dzin przedniego lewego koła. Różnica sił hamujących kół przednich mierzona na stanowisku rolkowym wynosiła ok. 25% wartości większej siły hamującej. Siły hamujące kół tylnych były równomierne.

Na rysunkach 5a) i 7a) przedstawiono przebiegi czasowe współczynnika k_s i różnicy poślizgu tych kół dla hamowania jak na rys. 4 i, odpowiednio, rys. 6. Można zauważyć dobrą zbieżność tych dwóch wskaźników. Wskazuje to, że współczynnik k_s może być wykorzystywany do oceny nierównomierności sił hamujących, a w konsekwencji, podczas hamowania na nawierzchni jednorodnej do oceny stanu okładzin ciernych hamulca.



Rys. 5. Hamowanie samochodu jak na rys. 4: a) współczynnik nierównomierności momentów hamujących, b) różnica pomiędzy współczynnikiem k_s a współczynnikiem s'

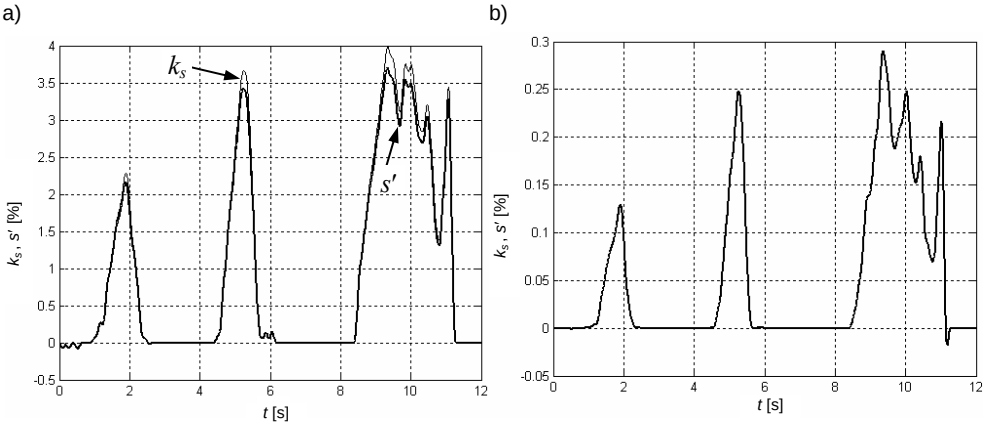
Fig. 5. Vehicle breaking as on Fig. 4: a) coefficient of inequality of breaking moments, b) difference between coefficient k_s and coefficient s'



Rys. 6. Przykładowe hamowanie pulsacyjne samochodu z obniżonym współczynnikiem tarcia okładzin przedniego lewego koła: a) prędkość i opóźnienie hamowania, b) poślizgi kół przednich

Fig. 6. The example of pulsatory braking vehicle with reduced coefficient of friction in front left wheel brake shoe: a) vehicle speed and vehicle braking deceleration, b) front wheels sleep

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 7. Hamowanie samochodu jak na rys. 6: a) współczynnik nierównomierności momentów hamujących, b) różnica pomiędzy współczynnikiem k_s a współczynnikiem s'

Fig. 7. Vehicle breaking as on Fig. 6: a) coefficient of inequality of breaking moments, b) difference between coefficient k_s and coefficient s'

4. Warunki prawidłowego wyznaczania współczynnika k_s

Należy pamiętać, że współczynnik k_s zależy nie tylko od stanu okładzin ciernych, ale również od stanu nawierzchni, po której toczą się koła. Wiarygodne wyznaczenie wskaźnika różnicy wykorzystania przyczepności wymaga zachowania pewnych warunków podczas pomiarów:

- sygnału włączenia hamulca w celu określenia chwili rozpoczęcia hamowania,
- jazdy po nawierzchni o takiej samej przyczepności pod kołami prawym i lewym,
- hamowania na prostym odcinku drogi,
- określonego czasu i opóźnienia hamowania,
- hamowania bez udziału ABS,
- sprawdzenia prędkości kół przed hamowaniem (kalibracji układu).

Jest to więc tzw. **monitor warunkowy**. W praktyce nie kontroluje się stanu nawierzchni jezdni, a przypadkowe zakłócenia mogą istotnie wpływać na wartość wskaźnika k_s i powodować nieprawidłową ocenę stanu okładzin. Z tego powodu wymagana jest statystyczna obróbka sygnału. Pomiary wykonywane są wielokrotnie. Wymagane jest wielokrotne przekroczenie wartości granicznej wskaźnika k_s, aby uniknąć błędów przypadkowych spowodowanych zmianą współczynnika przyczepności. W n kolejnych powtórzeniach znak tego wskaźnika powinien być taki sam.

Ocenę, czy samochód hamuje na nawierzchni o zbliżonym współczynniku przyczepności pod kołami prawymi i lewymi przeprowadza się na podstawie analizy tego wskaźnika dla kół przednich i tylnych. Jeżeli jego wartość przekracza graniczną oraz znak dla kół przednich i tylnych jest taki sam, to jest prawdopodobne, że samochód porusza się po nawierzchni niejednorodnej lub porusza się po zakręcie. Te wyniki są pomijane w analizie.

Zabezpieczeniem przed nieprawidłowym sygnalizowaniem stanu niesprawności w przypadku jazdy po zakrętach jest sprawdzanie wartości współczynnika k_s w chwili roz-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

poczynania hamowania oraz znaku tego wskaźnika w kolejnych hamowaniach. Na łuku drogi koło wewnętrzne toczy się wolniej od zewnętrznego, a program obliczeniowy zinterpretuje to jako różnicę poślizgów obu kół i przekroczenie wartości granicznej wskaźnika k_s. Jednak do zarejestrowania błędu konieczne jest wystąpienie n kolejnych hamowań i przekroczeń wskaźnika k_s z tym samym znakiem. W praktyce trudno znaleźć drogę, na której wystąpi n zakrętów w tę samą stronę, na których kierowca będzie hamował z opóźnieniem większym od granicznego, co spowodowałoby n-krotne zarejestrowanie stanu nieprawidłowego. Współczynnik k_s obliczany jest podczas hamowania z opóźnieniem większym od 3 m/s^2. Eliminuje to wykonanie testu na jezdniach bardzo śliskich.

W systemie diagnostycznym **OBD II brakes** interesuje nas nie tyle dopuszczalna różnica momentów hamujących M_{hpr}–M_{hl}, lecz określenie, przy jakiej różnicy poślizgów wystąpi nadmierne wydłużenie drogi hamowania lub pojawi się niebezpieczeństwo zarzucenia samochodu. Monitor stanu okładzin powinien być zaprogramowany do wykrywania stanów niebezpiecznych. Badania nad ustaleniem wartości granicznej różnicy poślizgów kół, odpowiadającej stanom niebezpiecznym przy hamowaniu, są obecnie prowadzone.

Uszkodzenia okładzin ciernych lub elementów układu hydraulicznego na ogół narastają stopniowo (z wyjątkiem nagłego pęknięcia przewodów ciśnieniowych). Procedura ich wykrywania powinna być oparta o statystyczną obróbkę sygnałów, tak by uszkodzenie było sygnalizowane z jak największym prawdopodobieństwem. W algorytmie sygnalizacji tego uszkodzenia powinny być eliminowane błędy typu α („fałszywy alarm") jako irytujące kierowcę i powodujące nieuzasadnione koszty napraw. Zaproponowano trzy strategie postępowania:

I – Obliczanie wartości średniej wskaźnika k_s w pojedynczym hamowaniu w określonych warunkach omówionych powyżej, z zastosowaniem wag zależnych od wartości opóźnienia hamowania. Zapamiętywane jest przez program n kolejnych wartości k_s. Sygnalizacja stanu niesprawności ma miejsce po wystąpieniu n kolejnych hamowań z przekroczeniem przez wskaźnik k_s wartości granicznej o tym samym znaku. Wstępnie przyjęto $n = 10$.

II – Obliczanie wartości średniej wskaźnika k_s wg zależności

$$\bar{k}_{sn} = k_{sn} \times F + (1 - F)\bar{k}_{s(n-1)} \tag{13}$$

gdzie:

k_{sn} – wartość parametru k_s w n-tym cyklu,

F – stała (waga) wskazująca na „ważność" bieżącego pomiaru w stosunku do średniej z pomiarów poprzednich. Jest to tzw. średnia krocząca z wagą.

III – Obliczenie wartości modalnej z n kolejnych hamowań i sygnalizowanie stanu niesprawności po osiągnięciu wartości granicznej wskaźnika k_s.

IV – Obliczanie gęstości prawdopodobieństwa wskaźnika k_s na podstawie analizy zbioru n wielokrotnych hamowań i sygnalizację stanu niesprawności po osiągnięciu określonego poziomu prawdopodobieństwa wartości granicznej k_{gr}

$$p(k_s = k_{gr}) = \frac{n_{kgr}}{n} \ [\%] \tag{14}$$

gdzie:

n_{kgr} – liczba zdarzeń (hamowań), dla których $k_s > k_{gr}$,

n – liczba wszystkich zdarzeń (hamowań).

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

5. Podsumowanie

Obecnie stosowany system diagnostyki pokładowej hamulców z układem ABS pozwala sprawdzić poprawność działania układów elektronicznych i elektrycznych. Można go przyrównać do systemu OBD I [5], stosowanego do niedawna do diagnostyki silnika spalinowego.

Proponowane monitory diagnostyczne pozwalają rozszerzyć zakres diagnozowania *on board* o ocenę elementów mechanicznych układu hamulcowego. Jako kryterium stanu niesprawności hamulców przyjęto zasadę, że dany **element uważa się za uszkodzony, jeżeli jego stan powoduje zagrożenie bezpieczeństwa jazdy.** Opracowywany monitor diagnostyczny może stanowić część systemu diagnostycznego **OBD II brakes**, na wzór stosowanego już systemu OBD II engine.

Praca realizowana w ramach projektu badawczego nr PB 1758/B/T02/2007/33.

Literatura

[1] Bleckmann H.W. et al., *The compact 4 wheel anti skid system with integral hydraulic booster*, SAE Paper series 830483, Detroit, USA 1983.
[2] Automotive Handbook, Bosch, 4th Edition, SAE 1996.
[3] Gajek A., *Stanowiskowa metoda diagnozowania układów przeciwblokujących samochodów osobowych*, III International Congress of Technical Diagnostics' 2004, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej przy Wydz. Nauk Technicznych PAN, Poznań 09/2004.
[4] Gajek A., *Modelowanie i analiza układu samochód–stanowisko bębnowe do badań i diagnostyki hamulców*, Monografia nr 280, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2002.
[5] Merkisz J., Mazurek S., *Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych*, WKiŁ, Warszawa 2002.
[6] Schwall L.M., Baker B., Gerdes J.C., Forhert T., *A probabilistic Vehicle Diagnostic System Using Multiple Models*, American Association for Artificial Intelligence, 2003.
[7] Gissingera G.L., Menardb C., Constans A., *A mechatronic conception of a new intelligent braking system*, Control Engineering Practice 11/2003.
[8] Gajek A., Walczak S., *Analiza wpływu nierównomierności sił hamowania na stateczność ruchu samochodu*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika 76, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002.
[9] Hirschberg W., Rill G., Weinfurter H., *User-Appropriate Tyre-Modeling for Vehicle Dynamics in Standard and Limit Situation*, Vehicle System Dynamics, Vol. 38, (2002), 103-125.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ