



## 2. Metody pomiaru

Aby wyznaczyć wartość poślizgu względnego lub prędkości poślizgu niezbędne jest dobranie odpowiedniej metody pomiarowej, co w przypadku pomiarów na hamowni podwoziowej jest zagadnieniem, któremu należy poświęcić należytą uwagę. Podstawową metodą pomiaru jest pomiar prędkości liniowej współpracujących elementów na styku koła napędzanego samochodu i rolki hamowni podwoziowej. Wówczas poślizg względny można obliczyć według wzoru (5).

$$S_N = 1 - \frac{v_r}{v_k} = 1 - \frac{\omega_r \cdot r_r}{\omega_k \cdot r_k} \quad (5)$$

gdzie:  $S_N$  – poślizg względny,  $v_r$  – prędkość liniowa rolki,  $v_k$  – prędkość liniowa koła.

Zmierzenie prędkości  $v_k$  i  $v_r$  wymagałoby jednak użycia m.in. metod fotometrycznych [2, 9] (ze względu na odkształcenia bieżnika opony i samej opony), stąd często wykorzystuje się metodę pośrednią, gdzie wyznacza się prędkości na podstawie wartości wielkości przedstawionych w drugiej części wzoru (5). Jednak do tego należy znać promień rolki  $r_r$  (stały) oraz mierzyć promień dynamiczny koła  $r_{dynam.}$ , który zmienia się między innymi w funkcji prędkości kątowej koła [5].

Alternatywną metodą jest wyznaczenie poślizgu względnego dla stałej prędkości rolki i w odniesieniu do warunków, gdy poślizg jest jak najmniejszy. Zgodnie z wiedzą opisywaną między innymi w pracach [4, 10] taki stan można osiągnąć podczas ruchu z pewnym niewielkim momentem napędowym, aby zniwelować opory toczenia, które powstałyby, gdyby rolka napędzała koło. Przybliżenie takiego stanu można osiągnąć wykorzystując odczyt siły napędowej podczas testu z ustaloną, stałą, prędkością liniową rolki hamowni. Kierowca obserwując wyświetlaną wartość siły napędowej, ustala wartość siły stycznej na rolce na równą  $F_S = 0 \pm 20$  N. W takich warunkach wyznacza się prędkość kątową koła napędzanego, przy którym poślizg był najmniejszy w prowadzonych badaniach, opisanych dalej.

W świetle powyższych rozważań dla stałej prędkości rolki hamowni można wartość poślizgu wyznaczyć stosując równanie (6),

$$S_N = 1 - \frac{\omega_k}{\omega_{k0}} \quad (6)$$

gdzie:  $\omega_k$  – prędkość kątowa koła,  $\omega_{k0}$  – prędkość kątowa koła bez poślizgu.

## 3. System pomiarowy

Zgodnie z przyjętą metodą pomiaru należy mierzyć prędkość kątową koła ogumionego  $\omega_k$  oraz monitorować prędkość liniową rolki  $v_r$ .

Prędkość liniową rolki  $v_r$  mierzono za pomocą urządzenia Datron kierując głowicę L350 Aqua w kierunku normalnym do tworzącej walca rolki. Prędkość obliczano na podstawie różniczkowania drogi po czasie. Drogę przebytą przez rolkę obliczano na podstawie zliczania zboczy narastających sygnału dwustanowego z urządzenia Datron. Urządzenie to skonfigurowano tak, aby wytwarzało zbocze narastające co 1 cm. Wyniki porównano z pomiarem czasu jednego obrotu rolki oraz wskazaniem wyświetlacza prędkości liniowej hamowni. Wyniki były zbliżone, a różnica nie przekraczała 0,2 km/h.

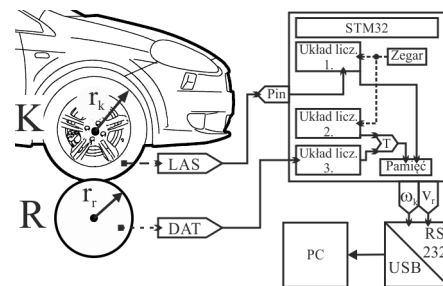
Prędkość kątową koła  $\omega_k$  obliczano na podstawie czasu, jaki potrzebny jest do wykonania jednego obrotu koła. W tym celu na obręczy zamocowano znacznik w postaci folii odbłyśkowej współpracującej z czujnikiem laserowym. Gdy znacznik oświetlany był przez laser zwiększała się ilość światła wpadającego do odbiornika czujnika powodując tym samym zmianę stanu logicznego sygnału wyjściowego z niskiego na wysoki. Czas pomiędzy kolejnymi zboczami narastającymi uznawany był za czas jednego obrotu koła.

Do realizacji pomiarów zgodnie z przyjętymi metodami pomiarowymi wybrano mikrokontroler STM32F103VBT6. Opracowany system pomiarowy (rys. 1) wykorzystuje układy licznikowe tego mikrokontrolera, które taktowane są sygnałem zegarowym z zewnętrznego rezonatora.

Pomiar prędkości liniowej rolki hamowni wyznaczano na podstawie zliczania zboczy narastających sygnału dwustanowego (prostokątnego) z urządzenia Datron w zadanym okresie czasu, „odmierzanym” przez cykliczne przerwanie co 40 ms licznika skonfigurowanego jako zegarowy.

Z kolei pomiar prędkości kątowej koła samochodu realizowano za pomocą innego układu licznikowego skonfigurowanego tak, aby inkrementowana była wartość rejestru licznika co 0,1 ms. Odczyt rejestru tego licznika odbywał się w wyniku realizacji procedury obsługi przerwania zewnętrznego wyzwalanego zboczem narastającym sygnału wyjściowego czujnika laserowego (w momencie oświetlenia, wiązką lasera, taśmy refleksyjnej).

Prędkość liniową rolki hamowni oraz prędkość kątową koła samochodu przesyłano do komputera za pomocą złącza szeregowego.

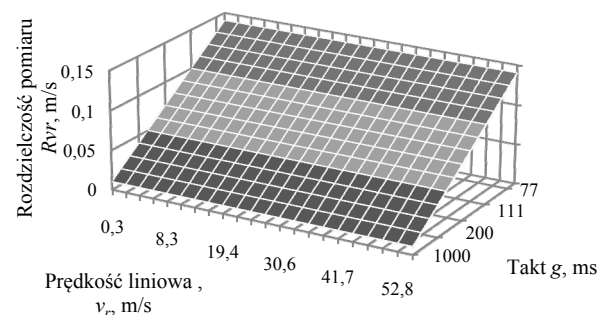


Rys. 1. Schemat blokowy opracowanego systemu pomiarowego  
Fig. 1. A block diagram of the measuring system

gdzie:  $K$  – koło napędzane samochodu,  $R$  – rolka hamowni podwoziowej,  $r_k$  – promień koła samochodu,  $r_r$  – promień rolki hamowni podwoziowej,  $LAS$  – czujnik laserowy,  $DAT$  – urządzenie Datron,  $T$  – czas zliczania zboczy narastających z urządzenia Datron,  $\omega_k$  – prędkość kątowa koła samochodu,  $v_r$  – prędkość liniowa rolki hamowni podwoziowej.

## 4. Rozdzielczość pomiaru

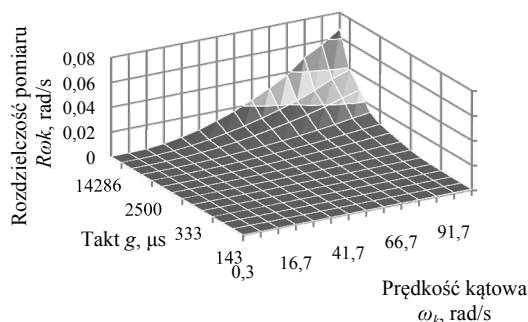
Konfigurację układów licznikowych do pomiaru prędkości liniowej rolki hamowni oraz prędkości kątowej koła samochodu przeprowadzono na podstawie danych o rozdzielczości pomiarowej, które przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Funkcja rozdzielczości pomiarowej prędkości liniowej rolki hamowni  
Fig. 2. Measurement resolution of linear velocity of roller chassis dynamometer

Jak można zauważyć funkcja określająca rozdzielczość pomiarową prędkości liniowej rolki hamowni (rys. 2.) jest płaszczyzną. Rozdzielczość zależy od czasu zliczania zboczy narastających sygnału dwustanowego z urządzenia Datron i taktu układu licznikowego wykorzystanego mikrokontrolera.

Natomiast funkcja rozdzielczości pomiarowej prędkości kątowej koła samochodu (rys. 3.) jest powierzchnią i zależy nieliniowo od prędkości kątowej koła oraz długości taktu układu licznikowego wykorzystanego mikrokontrolera.



Rys. 3. Funkcja rozdzielczości pomiarowej prędkości kątowej koła samochodu  
Fig. 3. Measurement resolution of angular velocity of the car wheel

W tabeli 1 zestawiono rozdzielczości pomiarowe dla najmniejszych i największych argumentów dla których wyznaczano wartość funkcji rozdzielczości dla opracowanego systemu pomiarowego.

Tab. 1. Rozdzielczość opracowanego systemu pomiarowego  
Tab. 1. Resolution of the developed measurement system

Rodzaj pomiaru	Takt układu licznikowego	Rozdzielczość pomiaru	
Prędkość kątowa koła, $\omega_k$	$1,43 \times 10^{-7}$ s	min	$4,4 \cdot 10^{-9}$ rad/s (przy $\omega_k=0,33$ rad/s ~ 20 obr./min)
		max	$3,9 \times 10^{-4}$ rad/s (przy $\omega_k=100$ rad/s ~ 6000 obr./min)
	$2,5 \times 10^{-5}$ s	min	$7,7 \times 10^{-7}$ rad/s (przy $\omega_k=0,33$ rad/s ~ 20 obr./min)
		max	$6 \times 10^{-2}$ rad/s (przy $\omega_k=100$ rad/s ~ 6000 obr./min)
Prędkość liniowa hamowni, $v_r$	$1 \times 10^{-3}$ s	const	0,01 m/s (około 1 km/h)
	$7,14 \times 10^{-5}$ s	const	0,14 m/s (około 200 km/h)

## 5. Niepewność pomiarowa

Aby określić wpływ poślizgu względnego na wynik pomiaru mocy na hamowni podwozowej, należy ustalić wartość poślizgu a dalej jego niepewność pomiarową. Z wcześniejszych rozważań wiadomo, że poślizg względny jest obliczany drogą pośrednią, na podstawie danych o prędkości kątowej koła oraz prędkości liniowej rolki hamowni. Znane są dwie metody obliczania niepewności pomiaru - metoda A i B [1, 8]. Pierwsza wykorzystuje analizę statystyczną danych pomiarowych, najczęściej bazując na rozkładzie statystycznym. Natomiast metoda B dopuszcza inne sposoby wyznaczania niepewności pomiarowej niż w przypadku metody A i zwykle wykorzystywana jest dla urządzeń pomiarowych, gdzie występują błędy systematyczne.

Aby ustalić niepewność pomiarową poślizgu względnego, w pierwszej kolejności wyznaczono niepewność pomiarową prędkości liniowej rolki hamowni (7).

$$u_c(v) = \sqrt{\left(\frac{1}{r \cdot g}\right)^2 u^2(L_i) + \left(\frac{1}{g \cdot T}\right)^2 u^2(T) + \left(\frac{1}{r \cdot g^2}\right)^2 u^2(g)}, \text{ m/s} \quad (7)$$

gdzie:  $T$  – czas zliczania zbroczy narastających sygnału dwustanowego z urządzenia Datron,  $g$  – takt układu licznikowego,  $L_i$  – stan licznika dla czasu  $T$ ,  $u(L_i)$  – niepewność dwóch kolejnych pomiarów  $L_i$ ,  $u(T)$  – niepewność okresu,  $u(g)$  – niepewność taktu.

Ustalono, że niepewność pomiarowa dla prędkości liniowej rolki hamowni jest liniowa i zależy od wartości prędkości liniowej rolki hamowni i rośnie od 0,004 m/s przy 0,28 m/s (1 km/h) do 0,5 m/s przy 55,55 m/s (200 km/h).

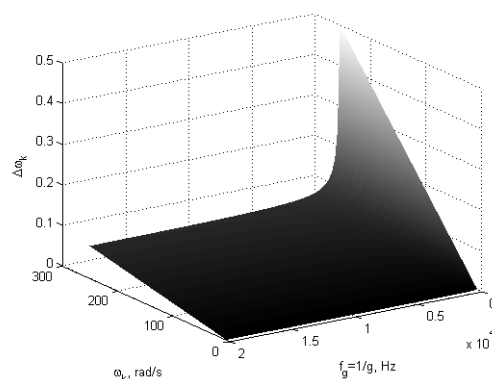
Następnie wyznaczono niepewność pomiarową prędkości kątowej koła samochodu (8),

$$u_c(\omega_k) = \sqrt{\left(\frac{60}{g L_i^2}\right)^2 u^2(L_i) + \left(\frac{60}{L_i g^2}\right)^2 u^2(g)} \cdot \frac{2\pi}{60}, \text{ rad/s} \quad (8)$$

gdzie:  $g$  – takt układu licznikowego,  $L_i$  – ilość zbroczy narastających układu licznikowego w czasie trwania jednego obrotu koła. Do obliczeń brano pod uwagę stabilność sygnału z generatora wykorzystującego pętlę synchronizacji fazy (ang. Phase Locked Loop). Błąd częstotliwości generatora pominięto, ponieważ założono, że częstotliwość taktowania ma charakter błędu systematycznego. Błąd ten mieści się w tolerancji częstotliwości sygnału taktującego. Ten błąd można skompensować, poprzez pomiar lub porównanie do sygnału z dokładnego generatora.

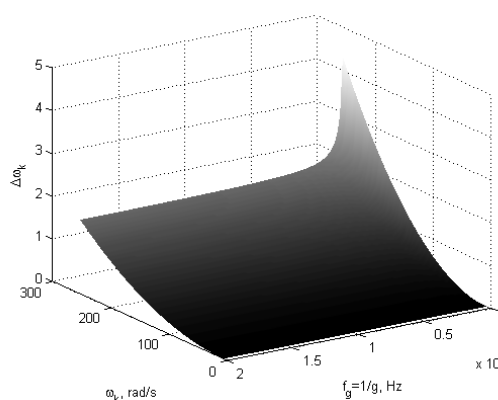
W tym miejscu warto zwrócić uwagę, że na niepewność pomiarową prędkości kątowej koła samochodu (realizowanej przez układy licznikowe wybranego mikrokontrolera) wpływają dwa czynniki. Pierwszy to ilość zbroczy narastających sygnału zegarowego doprowadzonego do układu licznikowego w czasie trwania jednego obrotu koła oraz czas taktu sygnału zegarowego.

Na rysunku 4 przedstawiono wykres składnika pierwszego niepewności pomiarowej prędkości kątowej koła (8). Można zauważyć, że ten składnik równania (8), na rysunku 4 oznaczony jako  $\Delta\omega_k$ , ma niewielki wpływ na sumaryczną wartość niepewności prędkości kątowej koła której wykres przedstawiono na rys. 6.



Rys. 4. Niepewność pomiarowa ilości zbroczy narastających sygnału dwustanowego układu licznikowego w czasie trwania jednego obrotu koła  
Fig. 4. Measurement uncertainty quantity of the rising edge of the digital signal counter system for the duration of one rotation of the wheel

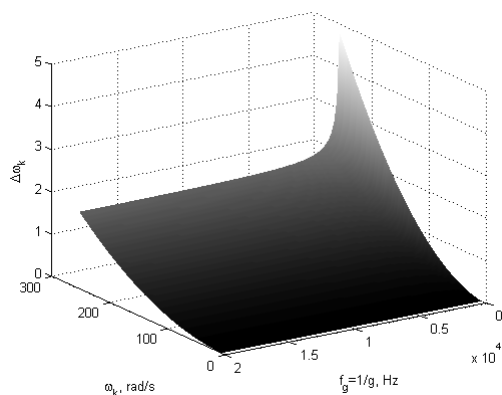
Na rysunku 5 przedstawiono wykres niepewności pomiarowej składnika zależnego od taktu układu licznikowego.



Rys. 5. Niepewność pomiarowa długości taktu układu licznikowego  
Fig. 5. Measurement uncertainty tact size of the counter system

Można stwierdzić, że na uzyskanie zakładanej niepewności pomiarowej największy wpływ spośród rozważanych czynników i składników ma konfiguracja układu licznikowego oraz jak najniższa niepewność taktu generowana przez wybrany rezonator.

Ważne jest, aby sygnał, podawany przez rezonator, charakteryzował się jak najniższą niepewnością. Analizując podaż generatorów oferowanych przez producentów rezonatorów, nie zaobserwowano znaczącego wpływu niepewności dokładności sygnału taktującego na cenę rezonatora.



Rys. 6. Niepewność pomiarowa prędkości kątowej koła samochodu  $u(\omega_k) = \Delta\omega_k$   
Fig. 6. Measurement uncertainty angular velocity of the car wheel  $u(\omega_k) = \Delta\omega_k$

Niepewność pomiarowa prędkości kątowej koła  $u(\omega_k)$  przy częstotliwości taktowania 20 kHz rośnie od 0,0009728 rad/s (przy  $\omega_k = 6,283$  rad/s ~ 60 obr/min) do 0,7362 rad/s (przy  $\omega_k = 159,7$  rad/s ~ 1525 obr/min). Natomiast dla częstotliwości taktowania 200 Hz rośnie od 0,005432 rad/s (przy  $\omega_k = 6,283$  rad/s ~ 60 obr/min) do 2,03 rad/s (przy  $\omega_k = 159,7$  rad/s ~ 1525 obr/min). Należy zaznaczyć, że do obliczeń przyjęto promień dynamiczny koła samochodu  $r_{\text{dynam.}} = 0,318$  m.

Dla samochodu marki Fiat Punto, dla wybranych obciążeń rolki hamowni siłą styczną, wyznaczono niepewność pomiarową poślizgu względnego kół napędzanych samochodu (9)

$$u_c(S_N) = \sqrt{\left(\frac{1}{\omega_k}\right)^2 u^2(\omega_{k_0}) + \left(\frac{\omega_{k_0}}{\omega_k^2}\right)^2 u^2(\omega_k)} \quad (9)$$

gdzie:  $\omega_k$  – prędkość kątowa koła samochodu,  $\omega_{k_0}$  – prędkość kątowa koła samochodu bez poślizgu,  $u(\omega_k)$ ,  $u(\omega_{k_0})$  – niepewność pomiaru prędkości kątowej koła samochodu poruszającego się z poślizgiem i bez poślizgu.

Pomiary przeprowadzono na hamowni podwoziowej MSR 500/2, która charakteryzuje się (według danych producenta) dokładnością pomiaru mocy na kołach samochodu wynoszącą 2%. Maksymalna prędkość pomiaru wynosi 300 km/h, a rolki hamowni można obciążyć maksymalnie siłą styczną  $F_s = 7$  kN. Moment hamujący generują dwa trójfazowe silniki elektryczne o łącznej mocy 22 kW. Masa każdej rolki wynosi 300 kg.

Przedstawione w tabeli 2 niepewności pomiarowe dla prędkości liniowej rolki hamowni obrazują pracę regulatora prędkości liniowej rolek hamowni podwoziowej MSR 500/2, która została zbadana przy użyciu urządzenia Datron.

W tabeli 3 zestawiono, dla wybranych obciążeń rolki hamowni podwoziowej siłą styczną  $F_s$ , niepewność pomiarową poślizgu względnego koła samochodu.

Tab. 2. Niepewność pomiarowa prędkości liniowej rolki hamowni  
Tab. 2. Measurement uncertainty linear speed of the roller dynamometer

Niepewność pomiaru, $\Delta v$	Prędkość liniowa rolki hamowni, $v$	Obciążenie rolki hamowni siłą styczną, $F_s$
+/- 0,27 m/s	19,25 m/s	Brak
+/- 0,23 m/s	19,25 m/s	$F_s = 490$ N ( $\pm 20$ N)
+/- 0,22 m/s	19,25 m/s	$F_s = 1050$ N ( $\pm 20$ N)
+/- 0,24 m/s	19,25 m/s	$F_s = 1570$ N ( $\pm 20$ N)
+/- 0,22 m/s	19,25 m/s	$F_s = 2030$ N ( $\pm 20$ N)

Tab. 3. Niepewność pomiarowa poślizgu względnego  $S_N$  koła samochodu Fiat Punto  
Tab. 3. Measurement uncertainty of relative slip  $S_N$  of car wheel of Fiat Punto

Obciążenie rolki hamowni siłą styczną, $F_s$ , N	Niepewność pomiaru, $u_c(S_N)$ , %
0	0,1000 $\pm$ 0,0199
500	0,0988 $\pm$ 0,0198
1000	0,0981 $\pm$ 0,0197
2000	0,0969 $\pm$ 0,0195
3000	0,0952 $\pm$ 0,0194

Przeprowadzone analizy wskazują, że do budowy urządzenia pomiarowego tego rodzaju, które współpracuje z przytoczonymi tu urządzeniami istotnym jest wykorzystanie rezonatora o jak najniższej niepewności taktu oraz przedniej kompensacji błędów systematycznego częstotliwości rezonatora. Dodatkowo układy licznikowe należy skonfigurować tak, aby niepewność ich sygnału taktującego była jak najmniejsza, co w tym przypadku oznacza wykorzystanie sygnału taktującego o częstotliwości większej niż  $f_g = 10$  kHz.

Dodatkowo niepewność pomiarowa poślizgu  $S_N$  jest nieznaczna, mniejsza od 0,1%. Podczas, gdy poślizgi względne występujące podczas testów samochodu Fiat Punto wahały się od (0,5  $\pm$  1,5)%. Na podstawie tego można stwierdzić, że możliwy jest pomiar niewielkich poślizgów względnych kół względem rolki hamowni podczas testów z typowym obciążeniem siłą  $F_s$  realizowanych na tej hamowni podwoziowej.

## 6. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Dla pomiarów prędkości obrotowej koła jak w artykule, niepewność pomiarowa pozostaje stała jeśli także stały jest stosunek niepewności rezonatora i do jego taktu.
2. Zarówno rozdzielczość jak i niepewność pomiarowa prędkości koła zmienia się w sposób nieliniowy.
3. Największy wpływ na rozdzielczość pomiarową prędkości kątowej koła ma takt układu licznikowego i jego niepewność.
4. Niepewność pomiarowa poślizgu względnego w badaniach dla opracowanego systemu wynosi od 0,1 do 0,2 na każdy procent wartości.

## 7. Literatura

- [1] Arendarski J.: Niepewność pomiarów. Oficyna Wyd. PW, 2006.
- [2] Białczyk W., Cudzik A., Czarniecki J., Moś D.: Ocena energetycznych parametrów współpracy układu koło napędowe-droga leśna. Inżynieria Rolnicza 1(119)/2010.
- [3] Brol S.: Analiza możliwości wykorzystania bezpośredniego pomiaru przyspieszenia do wyznaczania właściwości trakcyjnych samochodu osobowego, Ofic. Wyd. PO, Opole, 2013.
- [4] Lanzendoerfer J., Szczepaniak C., Szosland A.: Teoria ruchu samochodu, Wyd. PŁ, Łódź, 1988.
- [5] Mitschke M.: Dynamika samochodu. T. 2, Drgania, WKiŁ, Warszawa, 1989.
- [6] Reński A., Sar H.: Application of dynamic slip characteristics in simulation of vehicle, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 5(72)/2008, Warszawa, 2008.
- [7] Silka W.: Teoria ruchu samochodu, WNT, Warszawa, 2002.
- [8] Skubis T.: Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiaru, Wyd. PŚ, Gliwice, 2004.
- [9] Słowiński K., Walczyk J.: Pomiary poślizgu kół przy pomocy poślizgomierza fotooptycznego, Inżynieria Rolnicza 10/2005.
- [10] Szosland A., Dychto R.: Wpływ parametrów dynamiki pojazdu na działanie układu ESP, Konferencja Hamulcowa, Łódź 2004.

otrzymano / received: 09.07.2014

przyjęto do druku / accepted: 03.11.2014

artykuł recenzowany / revised paper