

BADANIA EKSPERYMENTALNE SIŁ W DRAŻKACH KIEROWNICZYCH

ROBERT JANCZUR¹, ALEKSANDER KURANOWSKI²,
PAULINA NOGOWCZYK³, WIESŁAW PIENIAŻEK⁴

Politechnika Krakowska, Pojazdy Specjalne

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę i wyniki badań sił w drążkach kierowniczych, w rzeczywistych sytuacjach drogowych. Szczególną uwagę zwrócono na przejazd przez obniżone względem jezdni pobocze gruntowe. Sytuacja taka jest groźna z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu drogowego, ponieważ przy powrocie z pobocza na jezdnię moment na kierownicy, regulowany przez wspomaganie, jest na tyle mały, że ułatwia kierowcy wykonanie zbyt dużego obrotu kierownicą, wskutek czego samochód może się znaleźć na pasie do jazdy w przeciwnym kierunku lub opuścić jezdnię. Celem pracy była identyfikacja rozkładu sił w drążkach i zaproponowanie odpowiedniego przesterowania układu wspomagania przy wykorzystaniu tych sił.

Słowa kluczowe: badania eksperymentalne, układ kierowniczy, drążki kierownicze, moment obrotowy na kierownicy, nawierzchnia utwardzona, nieutwardzona, gruntowa, pobocze drogi, wysiłek kierowania

1. Wstęp

Współczesne, małe samochody osobowe są często wyposażane w elektryczne urządzenia wspomagające. Wchodzący w skład tego systemu czujnik momentu jest zabudowany na wale kierowniczym i generuje odpowiedni sygnał regulujący wielkość wspomagania [2], [4]. Czujnik momentu reaguje jednak na przenoszony na koło kierownicy moment sumaryczny pochodzący z obydwóch kół kierowanych. Czujnik ten nie jest w stanie „rozpoznać” rozkładu sił na poszczególne drążki kierownicze, które zależą, między innymi, od oporów skrętu odpowiadających im kół kierowanych. Zatem, taki sam moment wspomagający kierownicę jest wytwarzany zarówno wtedy, gdy opory skrętu na obydwóch kołach są do siebie liczbowo zbliżone, jak i wtedy, gdy tylko na jednym kole powstaje jeden

¹ Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów samochodowych i Silników Spalinowych, Al. Jana Pawła II 37, 31 864 Kraków, e-mail: robertj@mech.pk.edu.pl

² Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków; Instytut Ekspertyz Sądowych im. Jana Sehna w Krakowie, ul. Westerplatte 9, 31-033 Kraków, e-mail: aleksander.kuranowski@poczta.onet.pl

³ Pojazdy Specjalne, ul. Bestwińska 105A, 43-346 Bielsko-Biała, e-mail: paulina.nogowczyk@gmail.com

⁴ Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych (adiunkt emerytowany), ul. Powstańców 38/43, 31-422 Kraków, e-mail: wiesiek@mech.pk.edu.pl

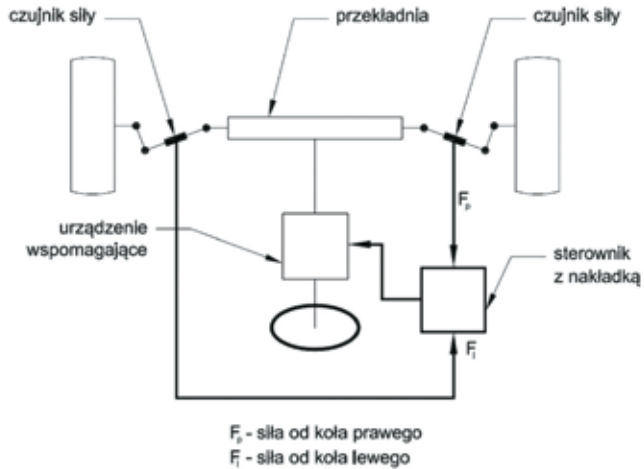
„podwójnie” duży moment, a drugie koło nie stawia oporu skrętu. Ten drugi, niebezpieczny przypadek, występuje w krytycznych stanach ruchu samochodu. Bardzo zróżnicowane momenty na kołach skręcanych (i zróżnicowane siły w drążkach kierowniczych) pojawiają się także przy hamowaniu niesymetrycznym – jednym kołem na śliskiej, a drugim na przyczepnej nawierzchni (przypadek ten jest klasyfikowany w literaturze jako μ -split). Duże zróżnicowanie sił w drążkach kierowniczych występuje po zjeździe jednym kołem z jezdni na najczęściej obniżone, jakościowo złe pobocze (przyjęte w literaturze określenie ang. *edge drop-off* - patrz np.[9]).

Z praktyki wypadkowej wiadomo, że do najgroźniejszych, a relatywnie często spotykanych, należą właśnie sytuacje, w których kierowca prawymi kołami zjeżdża na obniżone i złej jakości pobocze, po czym usiłuje wrócić na jezdnię, skręcając w lewo. Powrót ten jest ułatwiony wspomaganie układu kierowniczego. Okazuje się, że samochód, wracając czterema kołami na jezdnię gwałtownie odzyskuje przyczepność i zjeżdża na lewą stronę jezdni. Wówczas albo dochodzi do czołowego zderzenia z jadącymi z kierunku przeciwnego, albo jazda kończy się poza jezdnią po jej lewej stronie. Najczęściej te najtragiczniejsze w skutkach wypadki opisywane są zdaniem – *kierujący z nieznanых przyczyn zjechał na lewą stronę jezdni*. Niezamierzony zjazd zazwyczaj prawymi kołami na (obniżone) pobocze może być „rozpoznany” pomiarem sił w drążkach kierowniczych. Porównanie sił w drążkach powinno prowadzić do przesterowania urządzenia wspomaganie i odpowiednie ograniczenie momentu wspomagającego – tak, by kierujący nie miał ułatwionego *gwałtownego* powrotu na jezdnię. Zdecydowanie mniej groźna od gwałtownego wjazdu na jezdnię jest bowiem jazda wzdłuż pobocza i łagodne wytracanie prędkości tak długo, by powrót prawego koła na jezdnię nastąpił przy prędkości nie grożącej już niekontrolowanym zjazdem na lewą połowę jezdni.

Dodatkowe korzyści związane z pomiarem sił w drążkach kierowniczych, to sygnalizacja zwiększonego oporu toczenia związanego z obniżeniem ciśnienia w ogumieniu. Zwiększenie siły w drążku kierowniczym nastąpi dla tego koła, w którego oponie ciśnienie zmalało. Dla ograniczenia wpływu spontanicznej reakcji kierowcy, mogącego zakłócić ustalony tor ruchu samochodu, moment wspomaganie kierownicy powinien być wówczas także ograniczony.

Na współcześnie budowanych drogach ekspresowych i autostradach prawa ciągła linia krawędziowa P-7b ma celowo wprowadzone karbowania sprawiające, że opona, wjeżdżając na linię wydaje charakterystyczny dźwięk mający zwrócić uwagę kierowcy na niebezpieczny zjazd w prawo (mający *obudzić kierowcę*). Stwierdzono doświadczalnie, że karbowanie nawierzchni powoduje zauważalne zwiększenie siły w drążku kierowniczym prawym. Fakt ten można wykorzystać, dodatkowo ostrzegając kierowcę sygnałem wewnątrz bądź nawet ograniczając wspomaganie, aby nie wystąpił spontaniczny, przesadny skręt w lewo.

Na rys. 1 pokazano schemat proponowanego rozwiązania układu regulacyjnego momentu obrotowego na kierownicy, w którym zastosowano tensometryczny pomiar sił w drążkach kierowniczych.



Rys. 1. Schemat ideowy proponowanego rozwiązania układu regulacyjnego

2. Przebieg badań drogowych

Badano samochód FIAT Punto przy niesymetrycznym zjeździe na prawe, obniżone grunto-we pobocze. Badania prowadzono dla dwóch wartości promienia zataczania, regulowane-go podkładkami zakładanymi między obręcz a piastę koła. Stwierdzono zróżnicowanie sił w drążkach kierowniczych, pozwalające na zaproponowanie procedur logicznych wspo-mnianych wcześniej w rozdziale 1 i wykorzystanie ich do sterowania urządzeniem wspo-magającym układ kierowniczy.



a



b



c

Rys. 2. Zestaw aparatury (a- kierownica dynamometryczna, b- urządzenie przetwarzająco-rejestrujące AD32) oraz przykładowy widok toru badawczego (droga o nawierzchni beto-nowej z obniżonym poboczem gruntowym -c)

2.1. Wyposażenie samochodu do badań

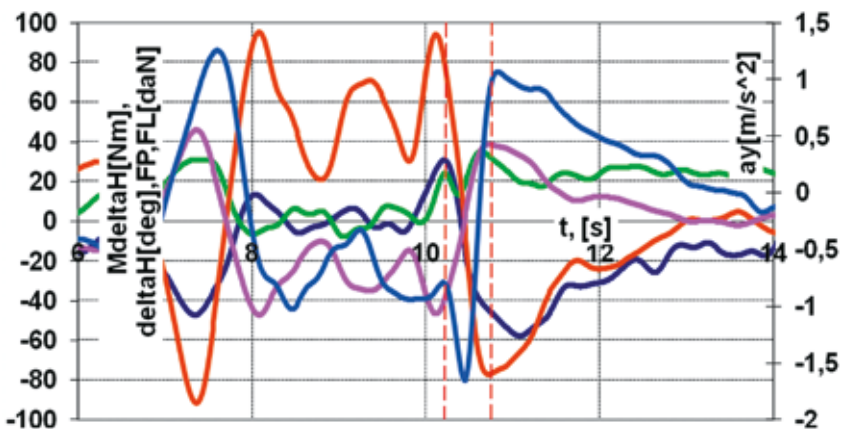
Do pomiaru sił w drążkach kierowniczych zastosowano tensometry oporowe, naklejone na każdym drążku w układzie pełnego mostka. Sygnały elektryczne z tensometrów były wzmacniane i rejestrowane. Oprócz sygnałów z drążków mierzono synchronicznie i rejestrowano szereg innych parametrów, z których najważniejsze, z punktu widzenia celu pracy, to kąt obrotu i moment obrotowy na kole kierownicy oraz przyspieszenia poprzeczne.

2.2. Próby realizowane podczas badań

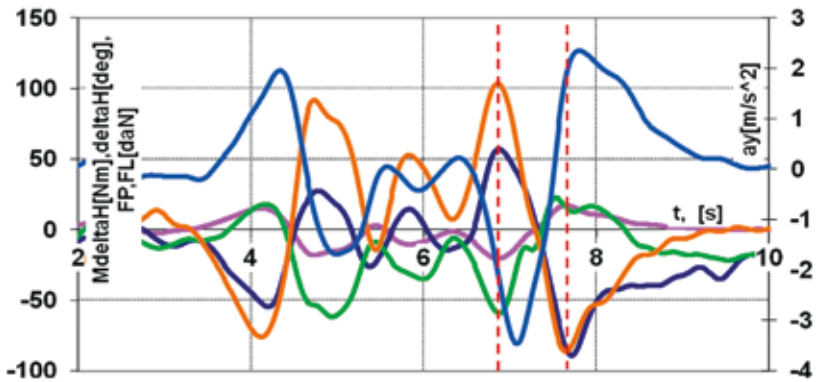
W programie badań wykonano próby analogiczne do podwójnej zmiany pasa ruchu (przy czym koła prawej strony pojazdu przejeżdżały chwilowo przez poboczne gruntowe) oraz gwałtowne, nieregularne (losowe), chwilowe zjazdy na obniżone poboczne gruntowe kołami prawej strony samochodu. Próby wykonano przy napędzie, hamowaniu silnikiem (tj. po zdjęciu nogi z pedału gazu) oraz przy swobodnym toczeniu (przy wyłączonym sprzęgle).

Na rys. 3 pokazano przebiegi wielkości pomiarowych uzyskane w próbie wykonanej przy napędzie, z prędkością 40 km/h, przy wyłączonym wspomaganiu kierownicy, a na rys. 4 w próbie, wykonanej w analogicznych warunkach, ale przy włączonym, standardowym wspomaganiu układu kierowniczego.

Analizując przebiegi na rysunkach, można stwierdzić znaczną różnicę sił występujących w drążkach lewym i prawym. Siła w drążku lewym jest większa. Koło lewe toczyło się po jezdni asfaltowej. Koło prawe wjeżdżało i toczyło się po obniżonym około 5 cm, twardym poboczu gruntowym (współczynnik przyczepności takiej nawierzchni jest około dwukrotnie mniejszy od jezdni asfaltowej). W podawanym w literaturze równaniu momentów wpływających na opór skrętu (patrz, np. [1,6,7]), największą wartość ma moment pochodzący



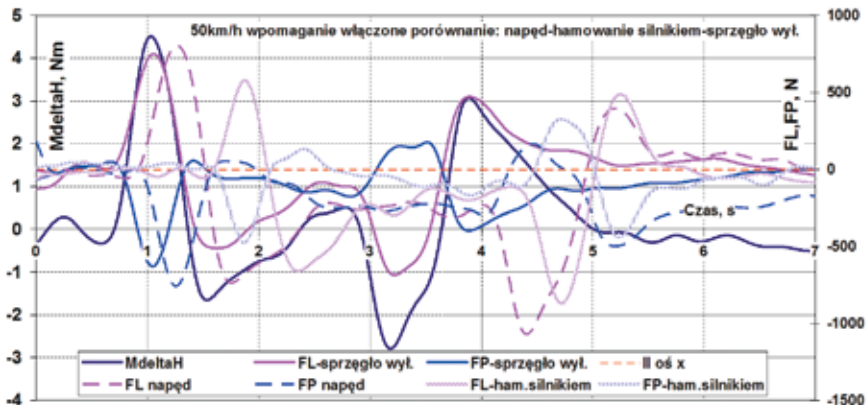
Rys. 3. Przejazd przez obniżone poboczne gruntowe. Prędkość 40km/h. Wspomaganie układu kierowniczego wyłączone. Oznaczenia: FL - siła zmierzona w lewym drążku kierowniczym, FP - siła zmierzona w prawym drążku kierowniczym, deltaH - kąt obrotu kierownicy, MdeltaH - moment obrotowy na kierownicy, ay - przyspieszenie poprzeczne, t - czas



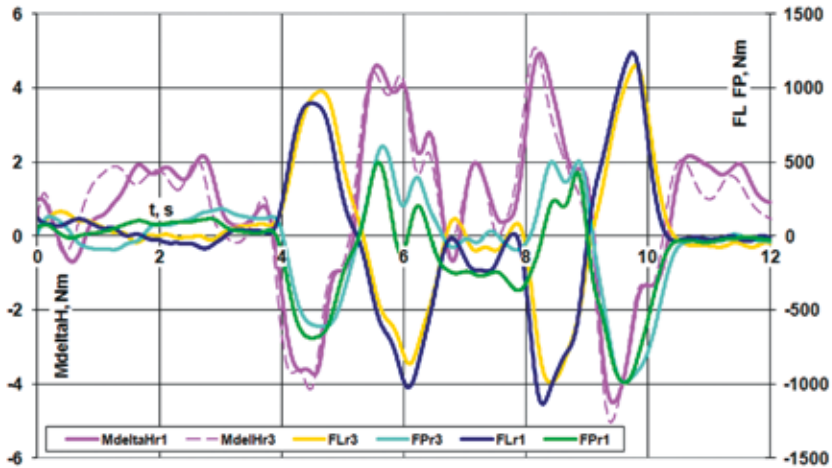
Rys. 4. Przejazd przez obniżone poboczne gruntowe. Prędkość 40 km/h. Standardowe wspomaganie układu kierowniczego włączone. Oznaczenia jak na rys. 3

od sił przyczepności występujących w śladzie styku opony z jezdnią. Stąd siła w drążku lewym jest większa (dla koła napędzanego).

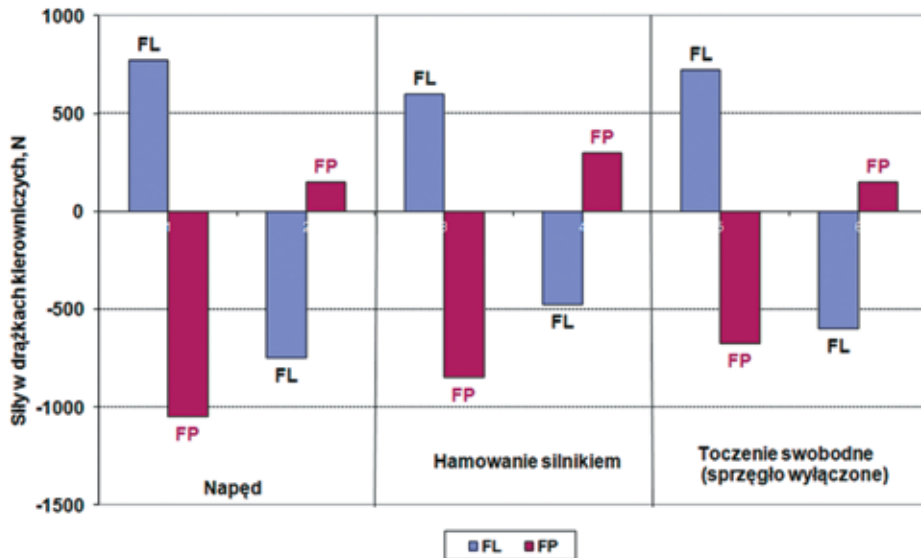
Na rys. 5 pokazano porównawczo przebieg sił w drążkach podczas napędu, hamowania silnikiem i swobodnego toczenia, a na rys. 6 pokazano wpływ promienia zataczania na wielkość sił w drążkach kierowniczych.



Rys. 5. Porównanie sił w drążkach przy napędzie, hamowaniu silnikiem i swobodnym toczeniu. Przejazd przez obniżone poboczne gruntowe. Prędkość 50 km/h. Wspomaganie włączone. Oznaczenia FL - siła zmierzona w drążku lewym, FP - siła zmierzona w drążku prawym, MdeltaH - moment obrotowy na kierownicy



Rys. 6. Porównanie sił w drążkach kierowniczych przy dwóch, skrajnych wartościach promienia zataczania – standardowym (r1) i maksymalnym (r3). Przejazd przez pobocze z prędkością 50 km/h i włączonym urządzeniem wspomagającym. Oznaczenia: MdeltaHr1- moment obrotowy na kierownicy przy standardowym promieniu zataczania, FLr1, FPr1-siły w drążkach przy MdeltaHr1, MdeltaHr3- moment obrotowy na kierownicy przy maksymalnym promieniu zataczania, FLr3, FPr3-siły w drążkach przy MdeltaHr3



Rys. 7. Siły w drążkach kierowniczych przy różnym obciążeniu siłami stycznymi kół przednich samochodu. FDL – siła w drążku lewym, FDP siła w drążku prawym

Jak wynika z rys. 5, zróżnicowanie sił w drążkach kierowniczych występuje zarówno przy napędzie jak i hamowaniu silnikiem, a także przy swobodnym toczeniu. Natomiast nieco inne są wartości tych sił przy powrocie z pobocza na jezdnię, co obrazuje wykres słupkowy na rys. 7.

3. Analiza wyników oraz propozycja algorytmu sterowania

Jako liczbowy wskaźnik oceny (miarę) zmiany parametrów dynamicznych przy powrocie z pobocza na jezdnię przyjęto *wysiłek kierowania* E , zdefiniowany przez F.O. Jakscha [5,8] jako iloczyn gradientów momentu obrotowego na kole kierownicy i kąta obrotu koła kierownicy względem unormowanego przyspieszenia poprzecznego; $a_{yN} = a_y/g$ (g – przyspieszenie ziemskie):

$$E = \left| \frac{\partial M_{\delta H}}{\partial a_{yN}} \frac{\partial \delta_H}{\partial a_{yN}} \right| [Nm \cdot rad] \quad (1)$$

W tabelicy 1 zestawiono wielkości potrzebne do obliczenia wysiłku kierowania przy powrocie z pobocza gruntowego na jezdnię betonową (wartości parametrów odczytano w momencie zaznaczonym na rysunkach linią przerywaną).

Tabela 1. Zestawienie parametrów charakteryzujących ruch dla przejazdów wg rejestracji z rys. 3 i 4

Parametr charakterystyczny	Aktywność wspomagania	
	NIE (rys. 3)	TAK (rys. 4)
$M_{\delta H}$, Nm	37,3±3	16,2±2
δ_H , deg	-76,8±2	-85,7±2
a_y , m/s ²	1,1±0,1	1,84±0,1
FL , Dan	-50,6±3	-87,8±5
FP , Dan	27,0±2	21,3±2
E Nm•rad	3975±640	870±116

Z porównania odpowiednich wartości E z tabelicy 1 wynika, że przy włączonym wspomaganie wysiłek kierowania jest od 26 do 51% mniejszy niż przy wyłączonym. (Rozpatrzono przypadek pesymistyczny i optymistyczny; uwzględniono odpowiednio odchylenia standardowe od wartości średniej E). Wspomaganie spełniło swoją rolę, ograniczając wysiłek kierującego. Nie jest to korzystne dla przypadku omówionego w rozdziale 1 niniejszej pracy, ponieważ powrót na jezdnię jest ułatwiony wspomaganie układu kierowniczego. Okazuje się, że samochód odzyskuje przyczepność pod kołami prawej strony i może zjechać na lewą stronę jezdni. Na pozostałe parametry ruchu załączenie wspomagania nie miało istotniejszego wpływu. Jest to oczywiste, ponieważ siły w drążkach zależą od podłoża i techniki jazdy, a nie zależą od włączenia czy wyłączenia urządzenia wspomagającego.

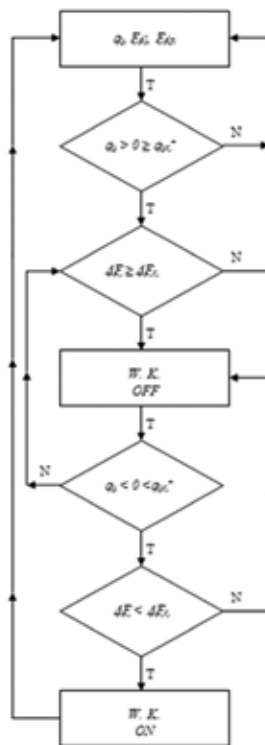
Jednymi z możliwych parametrów sterujących w algorytmie sterowania wspomaganiem kierownicy mogą być: przyspieszenie poprzeczne samochodu a_y oraz różnica sił w drążkach kierowniczych ΔF , określona wzorem:

$$\Delta F = (|F_{dl}| - |F_{dp}|) \quad [\text{N}] \quad (2)$$

w której F_{dl} i F_{dp} są siłami mierzonymi w odpowiednich drążkach (na rysunkach 4 do 7, w poprzednim rozdziale oznaczano: $F_{dl} = FL$ i $F_{dp} = FP$).

Algorytm programowania sterownika jest pokazany na rys. 8.

Parametrami alternatywnymi mogą być pochodne zmian sił w drążkach przy celowo wydłużonym okresie próbkowania. Taki sposób postępowania pozwala wychwycić te zmiany sił, które są długookresowe – a zaniedbać zmiany krótkotrwałe, które występują niezależnie od tego, po jakim podłożu toczy się koło. Przeprowadzono takie próby.



Rys. 8. Schemat blokowy sterownika wspomagania układu kierowniczego. $\Delta F = (|F_{dl}| - |F_{dp}|)$, indeksem r opatrzone wartości referencyjne, a_y – przyspieszenie poprzeczne, a_{yr+} – wartość referencyjna przyspieszenia poprzecznego przy zjeździe na pobocze (skręt w prawo – znak przyspieszenia poprzecznego „+”, na schemacie blokowym $a_y > 0$), a_{yr-} – wartość referencyjna przyspieszenia poprzecznego przy powrocie na jezdnię (skręt w lewo – znak przyspieszenia poprzecznego „-” – na schemacie blokowym $a_y < 0$), $W.K.$ – wspomaganie kierownicy, OFF – wyłączone (W.K.), ON – włączone (W.K.)

W celu realizacji sterowania urządzeniem wspomagającym układ kierowniczy samochód powinien być wyposażony dodatkowo w przetwornik przyspieszenia poprzecznego.

Konieczne jest także ustalenie wielkości referencyjnych a_{yr} dla przyspieszenia poprzecznego i ΔF_r dla różnicy sił w drążkach kierowniczych.

Wielkości referencyjne powinny być dobierane doświadczalnie dla danego modelu pojazdu. Zasadniczym celem odpowiedniej referencji jest ograniczenie wspomagania, a tym samym – jak wynika z zamieszczonych wyżej wykresów – zwiększenie momentu, jaki należałoby przyłożyć do koła kierownicy, by powrócić na jezdnię. Mały moment przyłożony do koła kierownicy, ułatwiający powrót na jezdnię, groził opisaną w rozdziale 1 artykułu utratą stateczności, wynikającą z odzyskania czterokołowej przyczepności przy zbyt intensywnie skręconych kołach.

4. Wnioski

Z dotychczas przeprowadzonych badań eksperymentalnych wynika, że:

- Przy niesymetrycznym zjeździe na pobocze kołami prawej strony pojazdu występuje znaczne zróżnicowanie sił w drążkach kierowniczych. Powodem tego w głównej mierze są: różna przyczepność kół i zróżnicowane opory toczenia.
- Obniżone w stosunku do płaszczyzny jezdni pobocza wywoływały dodatkowe siły w lewym drążku kierowniczym w chwili zjazdu na pobocze i powrotu z pobocza na jezdnię. W tego typu sytuacjach działanie wspomagania ułatwiające powrót na jezdnię nie jest pożądane. Nagły, łatwy powrót, przy obniżonym o ok. 80% wysiłku kierowania, generował niebezpieczeństwo utraty stateczności na przyczepnej i gładkiej jezdni. Zjawiska takie, zwane *edge drop-off*, są rozpoznane w literaturze jako szczególnie groźne [9].
- W samochodach z napędem przednim siły w drążkach kierowniczych o tym samym charakterze występują zarówno przy napędzie, jak i hamowaniu silnikiem, a także przy swobodnym toczeniu. Natomiast nieco inne są wartości tych sił przy powrocie z pobocza na jezdnię.
- Nie stwierdzono zasadniczego wpływu promienia zataczania na wartości sił w drążkach kierowniczych, co przekłada się na wartość momentu wspomagania na kole kierownicy.
- Wprowadzenie ciągłego pomiaru sił w drążkach kierowniczych i wykorzystanie tych informacji, po odniesieniu ich do wielkości referencyjnych, do sterowania wielkością wspomagania wydaje się być uzasadnionym działaniem.

Literatura

- [1] Kleczkowski A., Kuranowski A.: *Ujemny promień zataczania a stateczność i kierowalność samochodu. Analiza teoretyczna*. Technika Motoryzacyjna 5/79.
- [2] Kuranowski A.: *Wpływ parametrów zmiennego wymuszenia wejściowego na charakterystyki elektrycznego urządzenia wspomagającego układ kierowniczy*. VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna. „Problemy Bezpieczeństwa w Pojazdach Samochodowych. Kielce: Politechnika Świętokrzyska, 2012, s. 175-187.
- [3] Kuranowski A.: *Effect of the Variable Input Function Parameters on the Characteristics of an Electric Power Steering System*, monografia: „Automotive Safety Problems”, Vol. 1. Kielce: Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2012, s. 53-61.
- [4] Kuranowski A.: *Effect of Variable Input and Output on the Characteristics of a Steering System with EPS (Electric Power System)*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 19 No. 1, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2012, s. 215-226.
- [5] Jaksch F.O.: *Driver- Vehicle Interaction with Respect to Steering Controllability*, SAE Technical Paper 790740, 1970.
- [6] Лукин П. П. : *Конструирование и расчёт автомобиля* *Машиностроение*, Москва 1984.
- [7] Mitschke M.: *Dynamika samochodu*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1977.
- [8] Nogowczyk P.: *Kształtowanie charakterystyk układu kierowniczego, przy wykorzystaniu przyspieszenia poprzecznego pojazdu*, Praca doktorska, Kraków 2009.
- [9] Hallmark S.L., Veneziano D., Donald T.H.,..., *Safety Impact of Pavement Edge Drop-offs*. PEDO Report AAA Foundation for Traffic Safety, Washington 2006

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki nr N509 517640 „Kształtowanie charakterystyk urządzeń wspomagających kierownicę dla poprawy bezpieczeństwa czynnego samochodu”.