

DARIUSZ WIĘCKOWSKI*

SYMULACJA DZIAŁANIA SYSTEMU WSPOMAGANIA REALIZACJI RUCHU KRZYWOLINIOWEGO

SIMULATION OF WORK STEERING ASSISTED SYSTEM CONCEPTION OF REALIZATION OF CURVILINEAR TRAFFIC

Streszczenie

Niniejszy artykuł nawiązuje do idei stworzenia systemu wspomagającego ruch krzywoliniowy. Zaproponowano koncepcję wspomagania realizacji ruchu krzywoliniowego na podstawie zasady „postrzegania manewru jako całości”. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, które umożliwiły opracowanie zbioru parametrów wymuszenia przykładanego do kierownicy.

Słowa kluczowe: poprawność wykonywania manewru, system wspomagania kierowania, funkcja celu, symulacja manewru

Abstract

The work includes problems of creating of steering assisted system in field of realization of curvilinear traffic. The paper presents the conception of realization of curvilinear traffic based on principle "recognizing the manoeuvre as complex element". Computer simulation results are presented. They have enabled to work out range of values of steering wheel input function.

Keywords: correct execution of manoeuvre, creating of steering assisted system, object function, simulation of manoeuvre

* Dr inż. Dariusz Więckowski, Przemysłowy Instytut Motoryzacji, Laboratorium Badań Symulacyjnych, Warszawa.

1. Wstęp

W drugiej połowie XX w. rozwój techniki samochodowej stał się nierozdzielnie związany z inżynierią systemów transportu. Pojawiło się pytanie, jaki będzie samochód XXI w. Odpowiedź na tak sformułowane pytanie nie jest łatwa. Motoryzacja nowej cywilizacji – cywilizacji informatycznej – musi ulegać zmianom, tak w odniesieniu do budowy środków transportu (samochodów), jak i w stosunku do systemów transportu [15]. Przyszłe pojazdy będzie charakteryzować m.in. stosowanie systemów usprawniających ich prowadzenie. Miałyby one (systemy) zapobiegać ludzkim błędom, korygować je, interweniować w sytuacjach skrajnych, a nawet zastąpić kierowcę w pewnych czynnościach [1]. Takie podejście prowadzi do stworzenia „pojazdu inteligentnego”. Ze względu na złożoność problemu jest to cel odległy. I choć realizacja programów badawczych nie pozwoliła stworzyć możliwych do wdrożenia „pojazdów inteligentnych”, jednak przyczyniła się do rozwiązania wielu zagadnień szczegółowych. Do najważniejszych osiągnięć należy zaliczyć:

- rozwój układów aktywnych w samochodach,
- rozwój sensoryki,
- opracowanie i wdrożenie systemów nawigacji, pozycjonowania pojazdu, analizy otoczenia,
- zwiększenie możliwości dogodnego korzystania przez kierowcę z różnych urządzeń – ergonomia,
- sprawniejsze wykorzystanie już istniejących sposobów przesyłu danych.

W najbliższej przyszłości nowe pojazdy będą wymagały takich rozwiązań, które umożliwią wprowadzenie coraz doskonalszych urządzeń sterujących, wspomagających bez utrudniania kierowcy możliwości ich wykorzystania. W ostatnim okresie pojawiło się pojęcie układu wspomagającego pod nazwą „system asystencki” jako nowa koncepcja rozwoju samochodu [2–6]. Idea tego systemu sprowadza się do tego, że manewry inicjuje kierowca, natomiast układ wspomagający (na podstawie danych z sensorów o stanie ruchu i informacji o otoczeniu, wykorzystując modele dynamiczne pozwalające przewidzieć skutki zaplanowanego manewru) dopuszcza do jego wykonania lub koryguje jego przebieg.

Jednocześnie w ramach rozwoju tego typu systemów lub równoległe do nich realizowane są zagadnienia związane z optymalizacją manewrów drogowych, np. [7–9].

Niniejszy artykuł nawiązuje do idei „systemu asystenckiego” i dotyczy wspomaganie ruchu krzywoliniowego, który mógłby być wykorzystywany do zautomatyzowanego prowadzenia pojazdu lub korygowania działań kierowcy. Zaproponowano koncepcję wspomaganie realizacji ruchu krzywoliniowego na podstawie zasady „postrzegania manewru jako całości”.

2. Kryteria oceny poprawności wykonywania manewru

Zagadnienie poprawności wykonywania manewru szczegółowo zostało omówione w pracy [10], a także [11]. W tym miejscu zagadnienie to zostanie przywołane w sposób skrócony. Poprawność wykonywania manewru powinna zapewniać poczucie komfortu jazdy i bezpieczeństwo. Jako kryteria oceny poprawności manewru można przyjąć:

- a) dokładność realizacji toru ruchu – utrzymanie się w określonym pasie,
- b) spokojne kierowanie – unikanie gwałtownych, częstych ruchów kierownicą,
- c) poczucie komfortu jazdy pasażerów.

Do ocen ilościowych kryteriów trzeba przyjąć wielkości fizyczne. Jako ich miary przyjęto następujące wielkości [11]:

1. Do oceny dokładności realizacji toru ruchu pojazdu przyjęto minimalną odległość bocznej krawędzi samochodu od końca pasa ruchu uzyskaną podczas wykonywania manewru, uwzględniając utrzymanie się pojazdu w założonym torze ruchu.
2. Aby ocenić spokojne kierowanie, wykorzystano prędkość kątową obrotu kierownicy.
3. Do oceny komfortu pasażerów przyjęto wielkość maksymalnego przyspieszenia poprzecznego $a_{y\max}$ występującego podczas wykonywania manewru. Jako miarę poprawności wykonywania manewru przyjęto funkcję celu w następującej postaci [11]

$$J_W = w_1 \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \dot{\delta}_H^2 dt + w_2 \cdot \kappa_{\max}^2 + w_3 \cdot a_{y\max}^2 \quad (1)$$

gdzie:

- $\dot{\delta}_H$ – pochodna względem czasu kąta obrotu kierownicy,
- T – czas próby,
- $\kappa = \frac{1}{\varepsilon}$ – odwrotność odległości pojazdu od krawędzi pasa ruchu jako miara dokładności realizacji toru ruchu,
- $a_{y\max}$ – maksymalne przyspieszenie poprzeczne,
- w_1, w_2, w_3 – współczynniki wagowe.

Przyjęte wartości współczynników wagowych w funkcji prędkości jazdy podano w tabeli 1 [11].

Wykorzystując zbudowany dla tej koncepcji model pojazdu [12], przeprowadzono analizę przebiegów manewrów w ruchu samochodu. Zagadnienie oceny prawidłowości wykonania manewru przy założonej (badanej) postaci funkcyjnej wymuszenia działającego na kierownicę można potraktować jako zadanie optymalizacji obejmujące: znalezienie minimum funkcji celu – zależność (1), spełnienie warunków ograniczających: utrzymanie się samochodu w założonym torze ruchu, utrzymanie wartości przyspieszenia poprzecznego w zakresie dopuszczalnym.

Tabela 1

Wartości współczynników w_1, w_2 i w_3 w funkcji prędkości jazdy [11]

Prędkość samochodu [km/h (m/s)]	Współczynnik w_1 [s ² /rad ²]	Współczynnik w_2 [1/m ²]	Współczynnik w_3 [s ⁴ /m ²]
40 (11,11)	0,80	1,0	0,30
60 (16,67)	0,80	1,0	0,40
80 (22,22)	0,80	1,0	0,50
100 (27,78)	0,80	1,0	0,75
120 (33,33)	0,80	1,0	1,00

3. Sformułowanie zadania badawczego

Jak już wspomniano, zagadnienie poprawności wykonywania manewru szczegółowo zostało omówione w pracach [10, 11]. Jednocześnie w [10, 15, 16] wykazano, że możliwe jest opracowanie algorytmów pozwalających określić parametry wymuszenia przyłożonego do kierownicy dla realizacji typowych manewrów w ruchu pojazdu. Przedstawiono sposób analizy i wyniki badań symulacyjnych prowadzących do opracowania „macierzy” wartości parametrów wymuszenia dla realizacji określonych rodzajów manewrów. Tego typu „macierze” będą wykorzystane do zasymulowania działania systemu wspomagania realizacji ruchu krzywoliniowego, w tym przypadku przejazdu przez rondo. Przykładową „macierz” parametrów wymuszenia (amplitudy A_1 i częstości f_1) dla fazy wejścia w rondo przedstawiono w tab. 2. [10, 15]. Na podstawie zarejestrowanej sytuacji system musiałby zidentyfikować promień (średnicę) ronda, a zarazem promienie linii określających pas ruchu. Należy przyjąć, że rozpoznanie promieni skrzyżowania może być obciążone pewnym błędem, a więc system rozpocznie manewr z parametrami dobranymi dla tego niedokładnego rozpoznania. Realizacja manewru musi być – oczywiście – kontrolowana i niezbędna będzie realizacja korekt.

Dla zaprezentowanej postaci funkcji celu (1) przeprowadzono symulacje dla różnych typowych manewrów [10, 13, 14]. Wykazały one na początku, że najkorzystniejszą postacią wymuszenia na kierownicy jest sinusoidalny przebieg kąta obrotu, określony przez amplitudę wymuszenia A i częstość wymuszenia f [11].

Tabela 2

Zestawienie wartości parametrów wymuszenia A_1 i f_1 w zależności od średnicy zewnętrznej D_z i prędkości jazdy v [10, 15]

v [km/h] D_z [m]	10	15	20	25	30	35	40
25		$A_1=4,05$ $f_1=2,40$		$A_1=4,10$ $f_1=2,20$			
30	$A_1=4,00$ $f_1=0,75$			$A_1=4,10$ $f_1=1,90$	$A_1=4,15$ $f_1=4,15$		
35		$A_1=4,05$ $f_1=1,20$		$A_1=4,10$ $f_1=1,50$		$A_1=4,20$ $f_1=3,40$	
40	$A_1=3,50$ $f_1=0,55$			$A_1=3,55$ $f_1=1,45$	$A_1=3,60$ $f_1=2,20$	$A_1=3,65$ $f_1=2,20$	
45		$A_1=3,50$ $f_1=0,85$		$A_1=3,55$ $f_1=1,35$		$A_1=3,65$ $f_1=2,00$	
50	$A_1=3,30$ $f_1=0,45$	$A_1=3,30$ $f_1=0,65$	$A_1=3,35$ $f_1=0,90$	$A_1=3,35$ $f_1=1,20$	$A_1=3,40$ $f_1=1,45$	$A_1=3,40$ $f_1=1,65$	$A_1=3,45$ $f_1=2,05$
55				$A_1=3,35$ $f_1=1,15$			
60		$A_1=3,30$ $f_1=0,75$	$A_1=3,35$ $f_1=0,90$	$A_1=3,35$ $f_1=1,10$	$A_1=3,40$ $f_1=1,20$	$A_1=3,40$ $f_1=1,35$	$A_1=3,45$ $f_1=1,50$
65	$A_1=3,30$ $f_1=0,40$			$A_1=3,35$ $f_1=1,05$			
70		$A_1=3,30$ $f_1=0,60$		$A_1=3,35$ $f_1=1,00$	$A_1=3,40$ $f_1=1,20$		$A_1=3,45$ $f_1=1,75$

Do zaprezentowania zasymulowania działania systemu wspomagania realizacji ruchu krzywoliniowego wykorzystano symulację manewru „ $\frac{1}{4}$ ronda manewr korygowany” [10].

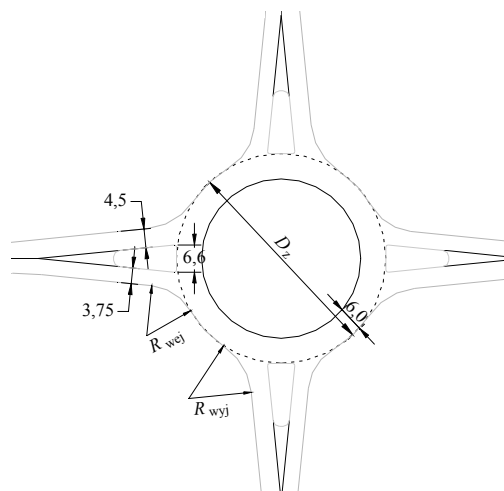
3.1. Symulacja przejazdu „ $\frac{1}{4}$ ronda manewr korygowany”

Zaprezentowano wyniki symulacji „ $\frac{1}{4}$ ronda manewr korygowany” według schematu przedstawionego na rys. 1. Przejazd przez rondo jest manewrem „złożonym”, w związku z tym podzielono go na etapy:

- wejście w rondo, scharakteryzowane przez promień wyokrąglający na wlocie R_{wej} , opisane jest parametrami wymuszenia A_1 i f_1 ,
- wyjście z ronda, scharakteryzowane przez promień wyokrąglający na wylocie R_{wyj} , opisane jest parametrami wymuszenia A_2 i f_2 ,
- ruch po okręgu, scharakteryzowany przez średnicę zewnętrzną ronda D_z , opisany jest parametrem wymuszenia A_3 .

Zadanie polegało na takim doborze wartości parametrów wymuszenia (amplitud A i częstości wymuszenia f), aby poprawnie wykonać manewr i jednocześnie dążyć do minimalizacji funkcji celu J_W [14].

Zrealizowano przypadek, gdy system początkowo z pewnym błędem rozpoznał parametry ronda, a więc zaplanował realizację manewru dla nieco innych wielkości niż rzeczywiste parametry ronda, zatem konieczne było wykonanie korekt podczas realizacji rozpoczętego już manewru.



Rys. 1. Schemat ronda średniego dwupasowego [18]

Fig. 1. Scheme middle roundabout two belts [18]

Zaprezentowano wyniki przykładowej symulacji manewru przejazdu przez rondo przedstawione na schemacie na rys. 1 – „ $\frac{1}{4}$ ronda manewr korygowany”. Samochód wykonywał przejazd $\frac{1}{4}$ ronda o średnicy zewnętrznej $D_z = 50$ m z prędkością 25 km/h. Jest to sytuacja, gdy system źle rozpoznał średnicę zewnętrzną ronda i w rezultacie, już w trakcie wykonywania manewru, korygował jego przebieg.

Przejazd ten („¼ ronda manewr korygowany”), ze względu na wykonane korekty, składa się z trzech części:

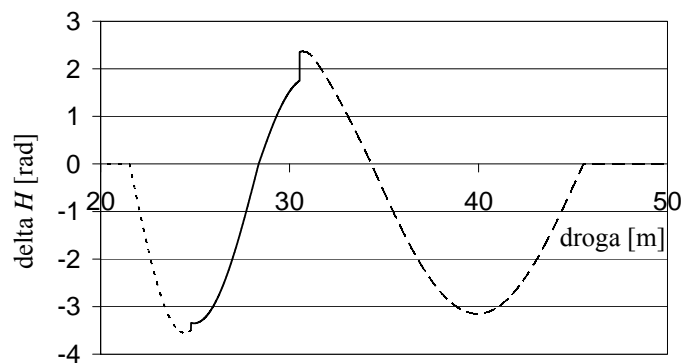
- 1 – początek manewru (wejscie w rondo); sytuacja, gdy system źle rozpoznał średnicę zewnętrzną ronda i przyjął $D_z = 45$ m,
- 2 – wykonanie pierwszej korekty; sytuacja, gdy system skorygował, ale źle, średnicę zewnętrzną ronda i przyjął $D_z = 55$ m,
- 3 – wykonanie drugiej korekty; sytuacja, gdy system skorygował, już dobrze, średnicę zewnętrzną ronda i przyjął $D_z = 50$ m.

Wartości parametrów dla tego manewru opisano w tab. 3. Wykonanie zadania polegało na takim przeprowadzeniu korekt wymuszenia na kierownicy (amplitud A i częstości wymuszenia f), aby pomimo błędnego rozpoznania średnicy zewnętrznej ronda na początku manewru poprawnie zrealizować cały manewr. Wyniki symulacji zaprezentowano na rys. 2–4. Na rysunku 2 przedstawiono wymuszenie na kierownicy („ δH ”), a na rys. 3 zrealizowaną trajektorię ruchu. Jednocześnie zaznaczono kolejne fazy wykonania manewru: linia kropkowana, linia ciągła, linia przerywana.

Tabela 3

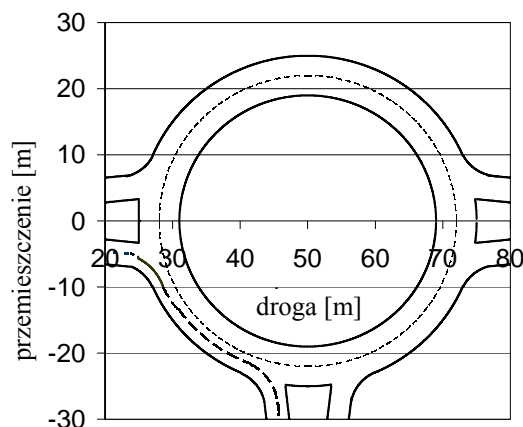
Parametry geometryczne manewru „¼ ronda manewr korygowany”

Fazy manewru	Rozpoznana średnica ronda D_z [m]	Parametry wymuszenia				
		A_1 [rad]	f_1 [rad/s]	A_2 [rad]	f_2 [rad/s]	A_3 [rad]
1	45	3,55	1,35	3,35	0,65	3,05
2	55	3,35	1,15	3,15	0,70	2,45
3	50	3,35	1,20	3,15	0,70	2,95



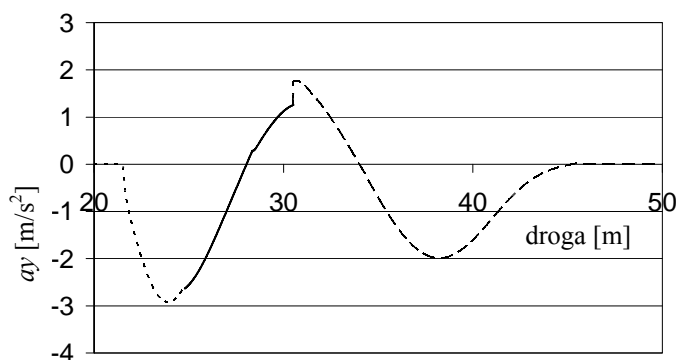
Rys. 2. Wymuszenie na kierownicy dla manewru „¼ ronda manewr korygowany”

Fig. 2. Steering wheel input function "¼ roundabout corrected manoeuvre"



Rys. 3. Trajektorie ruchu dla manewru „1/4 ronda manewr korygowany”

Fig. 3. Trajectory for manoeuvre "1/4 roundabout corrected manoeuvre"



Rys. 4. Przyspieszenie poprzeczne dla manewru „1/4 ronda manewr korygowany”

Fig. 4. Lateral acceleration for manoeuvre "1/4 roundabout corrected manoeuvre"

W przypadku tego manewru można stwierdzić, że wykonanie korekt wymuszenia na kierownicy umożliwiło dokończenie źle rozpoczętego manewru, pomimo że spowodowało to skokowy wzrost wartości przyspieszenia poprzecznego (druga korekta) – rys. 4. Jednocześnie wykonanie pierwszej korekty przyczyniło się do obniżenia wartości przyspieszenia poprzecznego. Dla manewru „1/4 ronda manewr korygowany” należy zaznaczyć, że mimo celowo założonego dużego błędu rozpoznania średnicy ronda, bo aż o 10%, samochód mógł poruszać się po rondzie przez ok. 3,5 s do czasu, gdy została zrealizowana pierwsza korekta. Analizując parametry ruchu, w tym trajektorię, można z całą pewnością stwierdzić, że nie wytworzyła się w tym czasie niebezpieczna sytuacja drogowa. Również przy realizacji pierwszej korekty przyjęto ponownie celowo duży, bo 10% błąd rozpoznania średnicy ronda (tym razem był to błąd na plus: 55 m przy rzeczywistej wartości 50 m). Po tej korek-

cie ponownie możliwe było kontynuowanie ruchu aż przez ok. 5,5 s do czasu drugiej, tym razem już poprawnej korekty.

W rzeczywistym systemie z pewnością można zakładać, że już pierwsza korekta wykonana byłaby dla średnicy ronda obciążonej mniejszym błędem niż początkowy, tzn. że układ w kolejnym pomiarze (lub pomiarach, ponieważ identyfikacja do celów korekty mogłaby być uśredniona z kilku wykonanych w ciągu 3,5 s pomiarów) powinien dokonywać oszacowania dokładniejszego.

4. Podsumowanie

Wyniki badań symulacyjnych potwierdzają celowość poszukiwań i analizy koncepcji opartej na możliwości zaimplementowania takiego systemu do realizacji wspomaganie ruchu krzywoliniowego przy wykonywaniu typowych manewrów. W rzeczywistości system podczas jazdy może wykorzystać wartości parametrów z odpowiedniej „macierzy” (np. tab. 2) [10, 15], wcześniej przygotowanej i wprowadzonej do systemu, zastosować je, gdy manewr będzie wykonywany „nieprawidłowo”. W ten sposób może zostać zrealizowana idea eliminacji ułomności kierowcy, jego błędów, nonszalancji, chwilowej nieuwagi itp.

W większości publikowanych koncepcji systemów wspomaganie ruchu krzywoliniowego lub systemów „automatycznego pilota” wykorzystywane są algorytmy polegające na powtarzaniu z bardzo wysoką częstotliwością pętli sterowania: informacja–rozpoznanie–decyzja–wykonanie. W każdym kroku tej pętli, na podstawie informacji docierających od odpowiednich sensorów, realizowana jest sytuacja, wypracowywana decyzja i dokonywana impulsowa korekta toru (skokowy, bardzo mały ruch kierownicą). Ponieważ wszystkie przeliczenia parametrów i cała analiza sytuacji muszą być prowadzone w czasie rzeczywistym, stwarza to olbrzymie zapotrzebowanie na moc obliczeniową. Dlatego eksperymentalna realizacja tego typu systemów wspomaganie jest bardzo trudna. Na przykład w eksperymencie opisanym w [19] wyposażono pojazd w system do pracy, dla którego niezbędne było zastosowanie komputera o kilkudziesięciu procesorach.

Proponowana koncepcja stwarza bez porównania mniejsze zapotrzebowanie na moc obliczeniową. W przedstawionym przykładzie symulacji działania systemu pętla sterowania: informacja–rozpoznanie–decyzja–wykonanie realizowana jest tylko trzy razy. Było to możliwe dzięki zaimplementowanym w systemie „macierzy realizacji manewru”. W czasie między kolejnymi decyzjami systemu realizowana była pewna, przyjęta przez system, funkcyjna zmiana wartości kąta obrotu kierownicy w czasie. Pokazano, że nawet przy dużym błędzie wstępnego rozpoznania taka realizacja manewru jest bezpieczna (nie grozi gwałtownym wykroczeniem poza granice pasa ruchu).

System po błędnym rozpoznaniu średnicy ronda, a więc po nie w pełni właściwym zaplanowaniu manewru dokonuje korekty i nadal realizuje manewr wg swojej przyjętej całościowej koncepcji. Potrzeba wykonania następnej korekty nie zakłóca systemu, który cały czas „widzi” manewr jako całość.

Można stwierdzić, że przedstawiona symulacja wykazuje poprawność przyjętej koncepcji. Pomimo błędnego rozpoczęcia działania (np. złe rozpoznanie średnicy zewnętrznej ronda na początku manewru) można poprawnie wykonać cały manewr.

Literatura

- [1] Stańczyk T.L., *Systemy wspomaganie pracy kierowcy*, Zeszyty Instytutu Pojazdów 3(29), Politechnika Warszawska SiMR, Warszawa 1998.
- [2] Busch S., *Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme*, Fortschritt-Berichte VDI, Reine 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik Nr. 588, Düsseldorf 2005.
- [3] Henning K., Preuschoff E. *Einsatzszenarien für Fahrerassistenzsysteme im Güterverkehr und deren Bewertung*, Fortschritt-Berichte VDI, Reine 12: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik Nr. 581, Düsseldorf 2003.
- [4] Jürgensohn T., Timpe K.P., *Kraftfahrzeugführung*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2001.
- [5] Müller M., *Ein Beitrag zur Entwicklung von Assistenzsystemen für eine vorausschauende Fahrzeugführung im Straßenverkehr*, Doktor Dissertation, Verlag, Kaiserslautern 2005.
- [6] Wiltschko T., *Sichere information durch infrastrukturgestützte Fahreassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten*, Fortschritt-Berichte VDI, Reine 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik Nr. 570, Düsseldorf 2004.
- [7] Gerds M., *A moving horizon technique for the simulation of automobile test-drives*, ZAMM, Vol. 83, No. 3, 2003.
- [8] Gordon T.J., *On the synthesis of driver inputs for the simulation of closed-loop handling manoeuvres*, Int. J. of Vehicle Design, Vol. 40, No. 1/2/3, 2006.
- [9] Pohl J., Sethsson M., Degerman P., Larsson J., *A semi-automated parallel parking system for passenger cars*, Proc. IMechE. Part D J. of Automobile Engineering, Vol. 220, No. 1, 2006
- [10] Więckowski D., *Optymalizacja wymuszenia działającego na kierownicę ze względu na kryterium poprawności wykonywania typowych manewrów w ruchu samochodowego*, rozprawa doktorska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2006.
- [11] Stańczyk T.L., Więckowski D., *Ocena poprawności wykonania typowych manewrów w ruchu samochodowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, seria Mechanika, nr 84, Kielce 2006.
- [12] Więckowski D., *Model samochodu dla symulacyjnego badania wybranych (typowych) manewrów*, Teka Komisji Motoryzacji PAN O. Kraków, nr 29, 30, Kraków 2005.
- [13] Stańczyk T.L., Więckowski D., *Symulacyjne badania manewru podwójnej zmiany pasa ruchu*, Journal of Kones, Vol. 13, No. 1, Warszawa 2006.
- [14] Stańczyk T.L., Więckowski D., *Symulacyjne badania manewru przejazd przez rondo*, Prace Naukowe, Transport, z. 63, Politechnika Warszawska, Warszawa 2007.
- [15] Więckowski D., Stańczyk T.L., *Koncepcja wyboru parametrów wymuszenia przykładanego do kierownicy w zależności od podstawowych warunków wykonania manewru*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, seria Mechanika, nr 8, Kielce 2008.
- [16] Więckowski D., *Symulacyjne badania manewru przejazd przez mini rondo*, Teka Komisji Motoryzacji PAN O. Kraków, 2008.

- [17] Szczepaniak C., *Podstawy modelowania systemu człowiek–pojazd–otoczenie*, PWN SA, Warszawa 1999.
- [18] Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, *Wytyczne Projektowania Skrzyżowań Drogowych. Część II Ronda*, Zarządzenie nr 10 Generalnego Dyrektora Dróg.
- [19] Reński A., *Modelowanie działania kierowcy w układzie kierowca–pojazd–otoczenie*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, seria Mechanika, z. 184, Warszawa 2000.