

# SYMULACYJNA OCENA PORÓWNAWCZA KIEROWALNOŚCI SAMOCHODU OSOBOWEGO W RUCHU „DO PRZODU” I „DO TYŁU”

JANUSZ KULMA<sup>1</sup>, ZBIGNIEW LOZIA<sup>2</sup>

Politechnika Warszawska

## Streszczenie

Celem pracy jest porównanie charakterystyk kierowności (łatwości kierowania) tego samego samochodu, lecz poruszającego się „do przodu” oraz „do tyłu”. Do zrealizowania celu pracy została wykorzystana metoda symulacyjna. Prędkość pojazdu ograniczono do 40 km/h, ponieważ wyższe prędkości byłyby trudne do osiągnięcia podczas ruchu samochodu na biegu wstecznym w warunkach rzeczywistych i uzyskane wyniki nie miałyby odniesienia do realnych sytuacji. Charakterystyki sterowności są bardziej korzystne podczas ruchu „do przodu” – samochód w całym rozpatrywanym zakresie przyspieszenia poprzecznego zachowuje charakterystykę podsterowną, która jest bardziej korzystna od zmiennej charakterystyki uzyskiwanej podczas ruchu „do tyłu”, gdy samochód, w zależności od wartości działającego na niego przyspieszenia poprzecznego, jest podsterowny lub nadsterowny, co czyni jego zachowanie nieprzewidywalnym i wymaga większej sprawności psychomotorycznej od kierującego pojazdem.

**Keywords:** symulacja, kierowność samochodu, ruch do tyłu, cofanie

## 1. Wprowadzenie

Celem pracy jest porównanie charakterystyk kierowności (łatwości kierowania) tego samego samochodu, lecz poruszającego się „do przodu” oraz „do tyłu”. Określenia te ujęte są w cudzysłowach, ponieważ są one umowne i to czy samochód porusza się w danej chwili „do przodu” czy „do tyłu” jest zależne od punktu widzenia. W pracy jako ruch „do przodu” traktuje się taki, w trakcie którego zwrot zadanego wektora prędkości ruchu samochodu jest skierowany ku jego przodowi. Można również określić, że ruch „do tyłu”, to ruch samochodu na biegu wstecznym, natomiast „do przodu” – na pozostałych biegach.

Pod pojęciem „kierowność” autorzy rozumieją zdolność samochodu do szybkiego i precyzyjnego reagowania na ruchy kierownicy [1]. Daje to możliwość łatwego manewrowania

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

<sup>2</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. 22 234 82 46, e-mail: lozia@wt.pw.edu.pl

i utrzymania pojazdu na zamierzonym torze. Badania tej cechy pojazdu są opisane w aktach normatywnych Międzynarodowej Organizacji Standaryzacji – ISO [2], Polskiego Komitetu Normalizacyjnego – PKN [3] i Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ – UNECE [4].

Wszyscy kierowcy na co dzień jeżdżą samochodami „do przodu” oraz „do tyłu”. Niewielu z nich zastanawia się nad tym jak zmieniają się charakterystyki pojazdu wraz ze zmianą kierunku ruchu. Niniejsza praca ma na celu próbę przedstawienia i wyjaśnienia różnic charakterystyk kierowności samochodu podczas ruchu „do przodu” i „do tyłu”.

Literatura opisywanego zagadnienia jest bardzo uboga i w szczególności dość odległa tematycznie. Wiadomym jest [5], że na 37046 wypadków drogowych w Polsce w 2012 roku 81,5% (30186) spowodowali kierujący pojazdem. W tej liczbie 592 wypadki (2,0%) nastąpiły w trakcie cofania pojazdu. Zginęło w nich 28 osób a rannych było 596, w tych liczbach główną część stanowią piesi (odpowiednio: 16 i 456). Dane z roku 2011 [6] są podobne. Podane liczby uzasadniają celowość zajmowania się własnościami ruchowymi pojazdu w trakcie cofania, czyli ruchu „do tyłu”. Tak zwany „kodeks drogowy” [7, 8], w rozdz. 3, oddz. 5, art. 23, pkt. 1 i 2 wymaga od kierowcy: „przy cofaniu ustąpić pierwszeństwa innemu pojazdowi lub uczestnikowi ruchu i zachować szczególną ostrożność”, „kierujący jest obowiązany zapewnić sobie pomoc innej osoby”. Zabrania „cofania pojazdem w tunelu, na moście, wiadukcie, autostradzie lub drodze ekspresowej”.

Zagrożenie w ruchu „do tyłu” jest uwzględniane w trakcie szkolenia kierowców pojazdów i maszyn roboczych, zwłaszcza wykorzystywanych w budownictwie [9, 10, 11]. W pracy [11] zawarty jest materiał instruktażowy dotyczący przeprowadzania manewru cofania oraz informacje o strefach zagrożenia, sposobach przeprowadzania manewru, ubiorze osoby wspomagającej działania kierowcy i znakach przez nią dawanych. Poradniki internetowe (np. [12, 13]) prezentują teksty, schematy, zdjęcia i filmy, których celem jest pomoc uczniom szkół jazdy samochodem w wykonywaniu manewru cofania.

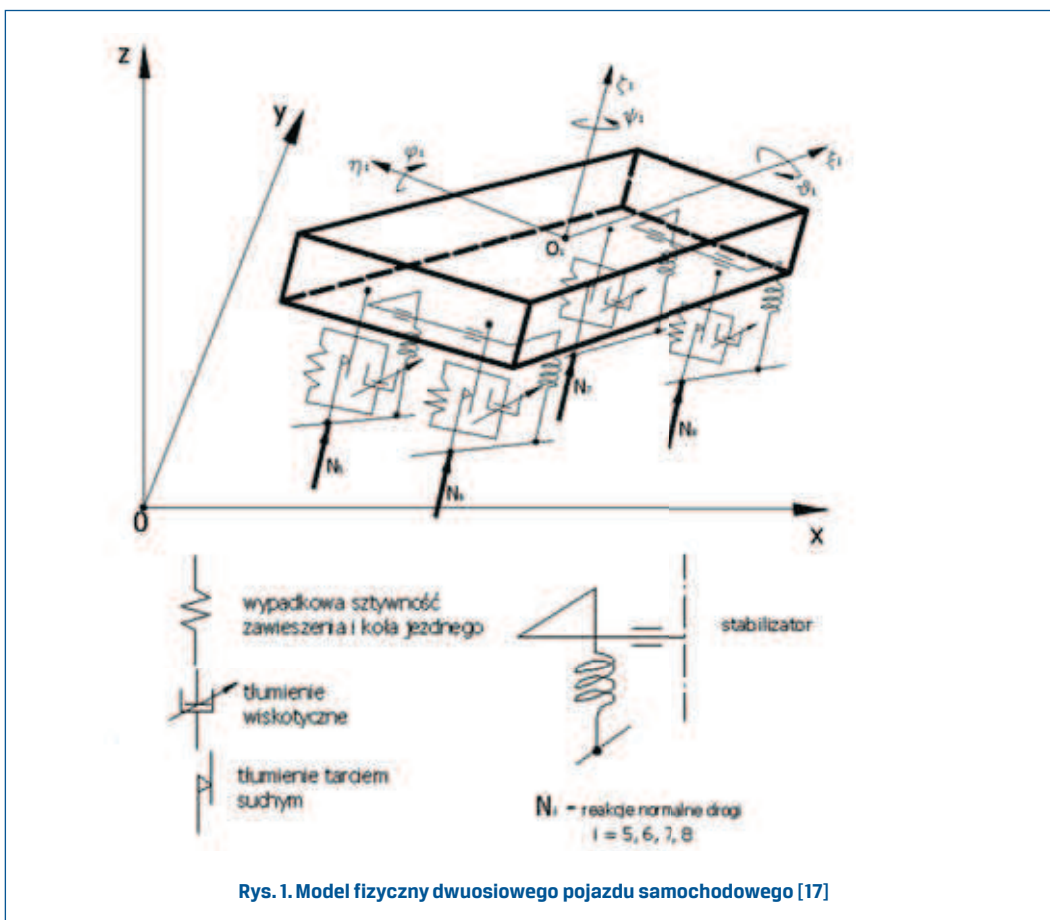
Systemy asystenckie typu VRSS (Vehicle Reversing Safety Systems) [14] wspomagają manewr cofania, wykrywając przeszkody na drodze pojazdu oraz sygnalizują ich obecność w tzw. „martwych strefach”. Badania nad tego typu systemami prowadzone są, między innymi, przez Cambridge Vehicle Dynamics Consortium [15, 16].

Autorzy nie natrafili jednak na pracę prezentującą porównanie kierowności samochodu w ruchu „do przodu” i „do tyłu”.

Badania samochodu prezentowane w niniejszej pracy były badaniami symulacyjnymi, wykonanymi przy użyciu autorskiego modelu i programu komputerowego. Mimo, że badania były tylko symulacjami, to jednak dążono do zachowania jak największej ich autentyczności i z tego powodu ograniczono zadaną prędkość ruchu samochodu do 40 km/h, ponieważ wyższe prędkości byłyby trudne do osiągnięcia podczas ruchu samochodu „do tyłu” w warunkach rzeczywistych.

## 2. Model i program symulacyjny

Rysunek 1 przedstawia model fizyczny pojazdu dwuosowego [17]. Założono, że jego ruch odbywa się na równej, poziomej nawierzchni drogi. Bryła nadwozia oraz koła jezdne traktowane są jako ciała sztywne. Pominięto opis drgań mas nieresorowanych zawieszania. Bryła nadwozia ma sześć stopni swobody, pozostałe cztery stopnie swobody dotyczą ruchu obrotowego kół jezdnych.

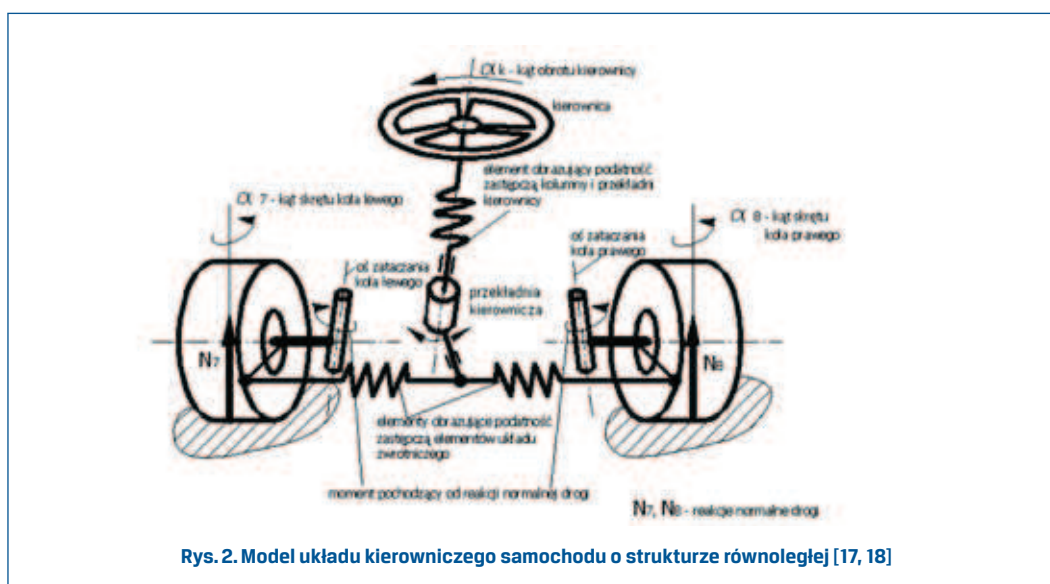


Uwzględniono opis sił sprężystych, tarcia suchego i tłumienia wiskotycznego zawieszania każdego koła oraz opis oddziaływania stabilizatorów przechyłu bocznego. Model sił kontaktowych i momentu stabilizującego opony uwzględnia wpływ prędkości i reakcji normalnej drogi. Stany nieustalone siły bocznej i momentu stabilizującego opisuje równanie różniczkowe I rzędu (model IPG-Tire) [17].

Model układu kierowniczego (rysunek 2) uwzględnia opis stabilizacji kół kierowanych, własności geometrycznych układu zwrotniczego oraz podatności kolumny, przekładni

i drążków kierowniczych. Możliwe jest modelowanie układu 4WS ze zmiennym, zależnym od prędkości, przełożeniem między przednim i tylnym układem kierowniczym (zgodnie z zaleceniami firmy Bosch).

Pominięto luzy i tarcie suche w układzie kierowniczym oraz momenty giroskopowe towarzyszące skręcaniu obracających się kół kierowanych.



Do opisu ruchu modelu przyjęto dziesięć niezależnych współrzędnych uogólnionych: współrzędne  $x_{O_1}$ ,  $y_{O_1}$ ,  $z_{O_1}$  punktu  $O_1$  (środka masy pojazdu) w układzie inercjalnym  $Oxyz$ , kąt odchylenia bryły nadwozia (kąt kierunkowy)  $\psi_1$ , kąt pochylenia wzdłużnego  $\varphi_1$  i przechyłu bocznego  $\vartheta_1$  bryły nadwozia oraz kąty obrotu kół jezdnych  $\varphi_5$ ,  $\varphi_6$ ,  $\varphi_7$ ,  $\varphi_8$ . Równania ruchu wyprowadzono wykorzystując zasadę kinetostatyki.

Autorski program symulacyjny ZL\_FL\_3D rozwiązuje je metodami przybliżonymi z zachowaniem wysokiej dokładności obliczeń. Badania symulacyjne zostały zrealizowane przy wykorzystaniu komputera klasy PC. Przebiegały poza czasem rzeczywistym, co oznacza, że czas potrzebny do ich ukończenia zależał nie tylko od parametrów modelu ale także od możliwości obliczeniowych zastosowanego komputera. Poza tym nie było możliwości sterowania pojazdem w czasie trwania symulacji, a jej przebieg zależał tylko od parametrów wczytanych przed jej uruchomieniem. Do wprowadzania danych, określania zakresu zapisywanych danych wyjściowych oraz zapisywania wyników symulacji wykorzystywane były pliki tekstowe. Dane pojazdu opisywały jego własności: geometryczne, inercyjne, aerodynamiczne, sprężyste zawieszenia i kół ogumionych w kierunku pionowym, styczne kół ogumionych i opory toczenia, geometryczne i sprężyste układu kierowniczego; charakterystyki układu hamulcowego i napędowego. Ponadto wprowadzane były parametry opisujące otoczenie pojazdu, w którym się on porusza, takie jak: składowe prędkości

wiatru, gęstość powietrza, własności nawierzchni drogi. Pozostałe dane konieczne do rozpoczęcia symulacji to: zmienne sterujące symulacją (między innymi krok przyrostu czasu w symulacji i liczba kroków symulacji), warunki początkowe (położenie i prędkość pojazdu, prędkości kątowe poszczególnych kół), parametry sterowania układami pojazdu (hamulcowym, napędowym i kierowniczym).

Model symulacyjny może być badany w warunkach odpowiadających wysokiemu zagrożeniu, dla dużych zmian parametrów ruchu oraz pojazdu.

Symulacja niektórych manewrów wymaga opisu oddziaływania kierowcy. W „testach otwartych” (ang. „open loop test”) [17, 18] kierowca jest reprezentowany funkcjami czasowymi kąta obrotu kierownicy, siły nacisku na pedał hamulca, stopnia otwarcia przepustnicy, przełożenia skrzynki przekładniowej.

Symulacja ruchu pojazdu „do tyłu”, w programie ZL\_FL\_3D, jest tak naprawdę symulacją ruchu pojazdu do przodu, przy czym: kierowanie pojazdem odbywa się przez skręt kół osi tylnej. Zamienione zostały parametry opisujące przód i tył pojazdu oraz położenie środka masy. Zmieniono parametry opisujące własności aerodynamiczne pojazdu.

### 3. Dane pojazdu i opis symulowanych manewrów

Dane modelu symulacyjnego odpowiadały samochodowi osobowemu klasy średniej w stanie całkowicie obciążonym (około 1500 kg). W celu porównania charakterystyk kierowności pojazdu w ruchu „do przodu” i „do tyłu” przeprowadzono symulację dwóch różnych manewrów. Pierwszym był quasi-ustalony ruch samochodu ze stałą prędkością po torze o zmiennym promieniu krzywizny, w celu określenia charakterystyk kierowności, umożliwiających ocenę czy pojazd jest podsterownym, neutralnym, nadsterownym, czy też o zmiennej charakterystyce sterowności [2, 3, 18]. Drugim był dynamiczny manewr pojedynczej zmiany pasa ruchu jako typowy dla eksploatacji pojazdu w warunkach drogowych [18].

Symulacje przeprowadzane były dla dwóch różnych prędkości, dla dwóch rodzajów nawierzchni oraz dla ruchu samochodu „do przodu” i „do tyłu”. Modyfikowano parametry opisujące rodzaj nawierzchni, prędkość początkową pojazdu, sposób sterowania układem napędowym (przełożenie skrzyni biegów oraz prędkość pojazdu jaką należy utrzymać w czasie trwania symulacji), rodzaj wymuszenia na kole kierownicy i liczbę kroków symulacji, która, w powiązaniu z krokiem przyrostu czasu w symulacji (we wszystkich przypadkach był on równy 0,0001 s), określa czas trwania testu. Powinien być on na tyle długi aby umożliwić ukończenie istotnych etapów manewru oraz stabilizację parametrów opisujących ruch pojazdu na końcu symulacji (chodzi głównie o kierunek ruchu, przyspieszenia działające na pojazd oraz wartość momentu na kole kierownicy).

Parametry charakterystyczne dla poszczególnych manewrów zostaną przedstawione w trakcie ich analizy. W tabelach 1, 2 i 3 zamieszczono parametry zależne od prędkości pojazdu, rodzaju nawierzchni oraz od tego czy ruch odbywa się „do przodu” czy „do tyłu”.

Tabela 1. Warunki początkowe zależne od prędkości pojazdu

Prędkość pojazdu	Prędkość punktu $O_1$ w kierunku $Ox$	Prędkości kątowe obrotu kół jezdnych			
		ruch „do przodu”		ruch „do tyłu”	
		koła przednie	koła tylne	koła przednie	koła tylne
[km/h]	[m/s]	[rad/s]	[rad/s]	[rad/s]	[rad/s]
10	2,78	10,11	10,22	10,22	10,11
40	11,11	40,60	40,75	40,75	40,60

Tabela 2. Własności styczne kół ogumionych w zależności od rodzaju nawierzchni

Rodzaj nawierzchni	Maksymalna wartość współczynnika przyczepności	Współczynnik określający zależność współczynnika przyczepności od prędkości poślizgu
[-]	[-]	[s/m]
suchy asfaltobeton	0,95	0,01
mokry asfaltobeton	0,75	0,016

Tabela 3. Sterowanie układem napędowym

Prędkość pojazdu	Sposób sterowania	Stała regulowana prędkość pojazdu	Aktualne przełożenie	
			skrzyni biegów	Movement "backwards"
[km/h]	[-]	[m/s]	ruch	[-]
10	utrzymanie stałej prędkości pojazdu	2.78	„do przodu”	ruch
40		11.11	„do tyłu”	3.526

### 3.1. Ruch samochodu po torze o zmiennym promieniu krzywizny

Najbardziej typowymi próbami kierowności samochodu są badania w warunkach ustalonego ruchu po okręgu, które wykonuje się przy różnych prędkościach jazdy i różnych promieniach okręgów. Zgodnie z normą ISO 4138 [2] oraz odpowiadającą jej PN-90/S-47350 [3] zalecana jest jazda z różnymi prędkościami po torze o stałym promieniu krzywizny. Jest to zatem „test zamknięty” – ze sprzężeniem zwrotnym kierowca-pojazd-otoczenie-kierowca [18].

W badaniach symulacyjnych dopuszcza się wersję otwartą tego testu (bez wspomnianego sprzężenia) [18], praktycznie niemożliwą w warunkach rzeczywistych ze względu na wymagane rozmiary odcinka pomiarowego. Prędkość pojazdu jest stała, a zmienia się promień krzywizny toru ruchu pojazdu, wynikający z rosnącego powoli kąta obrotu kierownicy.

Przeprowadzono badania symulacyjne ruchu pojazdu na torach o zmiennym promieniu krzywizny, dla dwóch różnych prędkości (10 km/h oraz 40 km/h) i dla dwóch rodzajów nawierzchni (suchy asfaltobeton oraz mokry asfaltobeton). Za każdym razem prędkość w trakcie trwania symulacji była stała, pomijając niewielkie wahania wynikające ze zmieniających się oporów ruchu pojazdu. Kąt obrotu koła kierownicy był zwiększany liniowo w trakcie trwania symulacji, a więc zmieniał się również tor ruchu pojazdu. Ze względu na powolną zmianę tych parametrów ruch ten można traktować jako odbywający się w warunkach ustalonych. Wartości kątów wymuszenia na kole kierownicy dla ruchu „do przodu” i „do tyłu” miały przeciwne znaki, co zapewniło w obu przypadkach skręt samochodu w tę samą stronę („w prawo” lub „w lewo”) i ułatwiło porównywanie wyników.

Przebieg wymuszenia na kole kierownicy został przedstawiony na rysunku 3, natomiast w tabeli 4 zostały zawarte parametry charakterystyczne dla symulacji ruchu pojazdu po torze o zmiennym promieniu krzywizny.

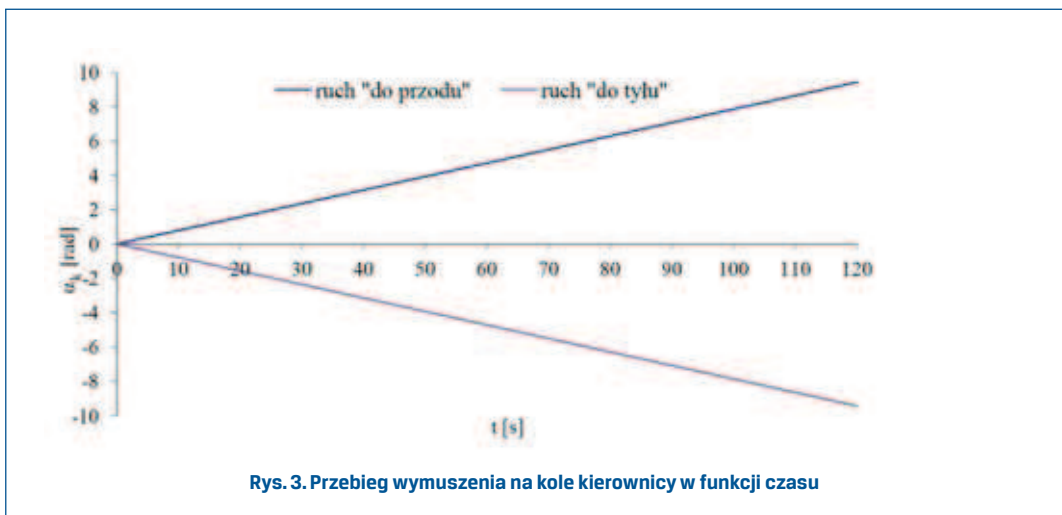


Tabela 4. Parametry dla wszystkich symulacji ruchu samochodu po torze o zmiennym promieniu krzywizny

Nazwa parametru	Wartość	Jednostka
Liczba kroków symulacji	1 200 000	[-]
Typ wymuszenia	liniowy wzrost od wartości stałej	0.016
Wartość przyrostu kąta obrotu koła kierownicy	9,42	[rad]
Czas narastania kąta obrotu koła kierownicy	120	[s]
Wartość początkowa kąta obrotu koła kierownicy	0	[rad]



### 3.2. Pojedyncza zmiana pasa ruchu

Manewr pojedynczej zmiany pasa ruchu jest typowy dla ruchu pojazdu w warunkach eksplo-atacyjnych. Można go potraktować jako manewr ominięcia przeszkody znajdującej się na pasie ruchu, którym jedzie dany pojazd, lub jako jedną z faz manewru wyprzedzania. Jest to „test zamknięty”. Jego wyniki w dużym stopniu zależą od kierowcy, obserwującego i korygującego efekty swego działania poprzez zmianę kąta obrotu kierownicy. Autorów pracy interesowały wyłącznie własności pojazdu, dlatego zastosowali „test otwarty”, zgodnie z normą ISO TR 8725 [19], w którym na kole kierownicy zadawane jest wymuszenie w postaci jednego okresu sinusoidy. Dostatecznie dobrze odzwierciedla ono wymuszenie zadawane przez kierującego pojazdem w warunkach rzeczywistych, w trakcie pojedynczej zmiany pasa ruchu. Należy jednak pamiętać, że może być ono niekiedy bardziej złożone, ponieważ kierujący pojazdem (w „teście zamkniętym”) ma możliwość korekty kąta obrotu koła kierownicy w zależności od zmieniających się warunków ruchu pojazdu i sytuacji na drodze.

Manewr pojedynczej zmiany pasa ruchu można podzielić na trzy odrębne fazy:

- ruch samochodu po torze prostoliniowym;
- właściwa zmiana pasa ruchu;
- kontynuacja jazdy po torze prostoliniowym, drugim pasem ruchu.

W symulacji pierwsza faza manewru została pominięta, ponieważ pojazd porusza się wtedy w warunkach ustalonych i parametry tego ruchu, dla jazdy „do przodu” i „do tyłu” są zbliżone. Pominięcie pierwszej fazy manewru pozwoliło także na zapewnienie w obu przypadkach takiego samego położenia pojazdu w chwili rozpoczęcia drugiej fazy manewru, która jest najbardziej istotna. Czas symulacji trzeciej fazy manewru został ograniczony do wartości pozwalającej na powrót parametrów ruchu pojazdu do warunków ustalonych.

Symulacja tego manewru została przeprowadzona dla prędkości pojazdu równej 40 km/h i dla dwóch rodzajów nawierzchni: suchego asfaltobetonu i mokrego asfaltobetonu. Charakterystyczne dla symulacji tego manewru parametry zostały zawarte w tabeli 5. Zastosowane wymuszenie zostało tak dobrane, aby tor ruchu pojazdu mieścił się w narzuconym „korytarzu” ruchu, który został przedstawiony na rysunku 4.

**Tabela 5. Parametry dla wszystkich symulacji manewru pojedynczej zmiany pasa ruchu**

Nazwa parametru	Wartość	Jednostka
Liczba kroków symulacji	30000	[-]
Typ wymuszenia	jeden okres sinusoidy	
Amplituda zmian kąta obrotu kierownicy	2	[rad]
Okres zmian kąta obrotu kierownicy	2	[s]

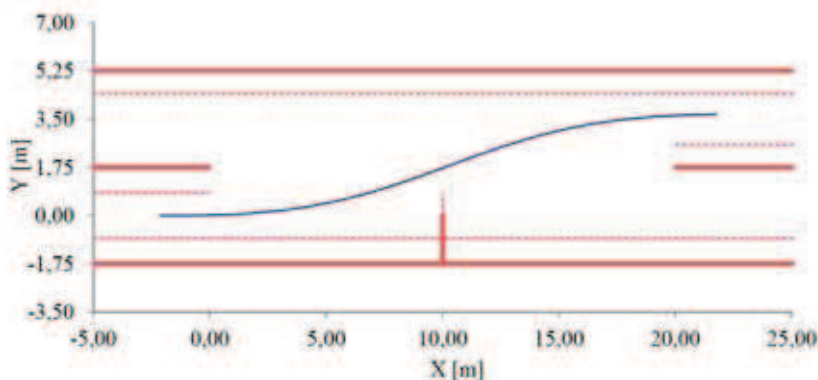
Analizując zamieszczone w dalszej części pracy rysunki, przedstawiające tor ruchu pojazdu należy pamiętać, że:

- na rysunku 4 poziome czerwone linie ciągłe ograniczają i rozdzielają pasy ruchu;



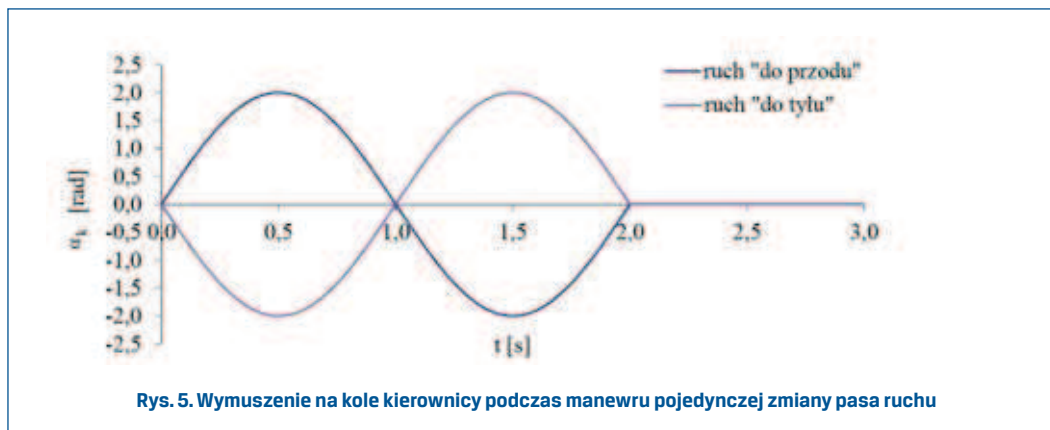
ograniczają zatem pożądaną tor ruchu pojazdu (tor ruchu obrysu pojazdu); linie przerywane ograniczają pożądaną tor ruchu środka masy pojazdu;

- jak wspomniano wyżej, poziome linie ciągłe wyznaczają pasy ruchu, natomiast linia ciągła pionowa oznacza przeszkodę sięgającą połowy szerokości pasa ruchu, którym porusza się pojazd przed rozpoczęciem manewru;
- poziome linie przerywane są odsunięte od odpowiadających im linii ciągłych o odległość równą połowie szerokości pojazdu, a linia pionowa jest przedłużeniem odpowiadającej jej linii ciągłej o tę samą wartość;
- długość przerwy między środkowymi liniami poziomymi (liniami rozdzielającymi pasy ruchu) wyznacza długość odcinka zmiany pasa ruchu i jest równa 20 m;
- manewr kończy się sukcesem, jeżeli tor ruchu wierzchołków obrysu pojazdu nie przekroczy czerwonych linii ciągłych, a tor ruchu środka masy dodatkowo linii przerywanych.



**Rys. 4. Pożądaną „korytarz” ruchu w manewrze pojedynczej zmiany pasa ruchu wraz z przykładowym torem ruchu środka masy pojazdu  $O_1$**

W trakcie analizy położenia pojazdu na płaszczyźnie poziomej drogi przyjmuje się uproszczoną postać obrysu pojazdu w formie prostokąta. Współrzędna  $X$  położenia początkowego punktu  $O_1$  (środką masy pojazdu) była tak zmieniana, aby dwa najbardziej wysunięte w kierunku  $Ox$  wierzchołki obrysu pojazdu (prostokąta) miały współrzędne  $X$  równe zero. Zaprezentowane na rysunku 5 wymuszenie na kole kierownicy zostało dobrane tak, aby manewr zakończył się sukcesem dla przypadku ruchu „do przodu” (tak, aby jedynie zostały minięte, w bardzo małej odległości, linie ograniczające pożądaną „korytarz” ruchu i jednocześnie, aby zapewnić wystarczającą czytelność rysunków). Jako położenie końcowe pojazdu na rysunkach przedstawiających jego tor ruchu przyjęto położenie po czasie 2,21 s od początku symulacji. Jest to czas, po którym współrzędne  $X$  wierzchołków obrysu pojazdu, podczas ruchu „do tyłu”, osiągają wartość przekraczającą 20 m (jest to długość odcinka zmiany pasa ruchu).



## 4. Wyniki obliczeń symulacyjnych

### 4.1. Wyniki symulacji dla ruchu samochodu po torze o zmiennym promieniu krzywizny

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wyniki symulacji dla prędkości 40 km/h na nawierzchni suchej i mokrej. Porównując tor ruchu środka masy pojazdu dla ruchu "do przodu" i "do tyłu", daje się zauważyć przesunięcie wykresu dla ruchu "do tyłu" w prawo, względem wykresu dla ruchu "do przodu". Podobne wyniki oraz wspomniane przemieszczenie (choć mniejsze) występuje dla przypadku ruchu z prędkością 10 km/h. Wynika ono z różnicy w położeniu (przesunięcia w prawo dla ruchu "do tyłu") chwilowego środka obrotu pojazdu (mówimy tu o położeniu w początkowym stadium manewru). Gdy kąty boczne znoszenia są na tyle małe, że możliwe jest ich pominięcie, chwilowy środek obrotu pojazdu leży na prostej będącej rzutem osi jezdnej kół niekierowanych na płaszczyznę drogi [1]. Wraz ze zwiększaniem się wartości kątów boczne znoszenia, co z kolei następuje wraz ze wzrostem prędkości pojazdu i/lub kąta obrotu koła kierownicy, następuje przesunięcie chwilowego środka obrotu pojazdu i jego położenie jest zależne od wartości kątów boczne znoszenia ogumienia.

Jako jedno z kryteriów oceny wyników symulacji została wykorzystana liczba pętli zakreślonych przez środek masy samochodu podczas trwania symulacji, wyznaczona na podstawie kąta odchylenia pojazdu, korzystając z zależności:

$$n_p = \frac{\psi_{lk}}{2\pi} \quad (1)$$

gdzie:  $n_p$  – liczba pętli zakreślonych przez pojazd;  
 $\psi_{lk}$  – końcowy kąt odchylenia pojazdu.

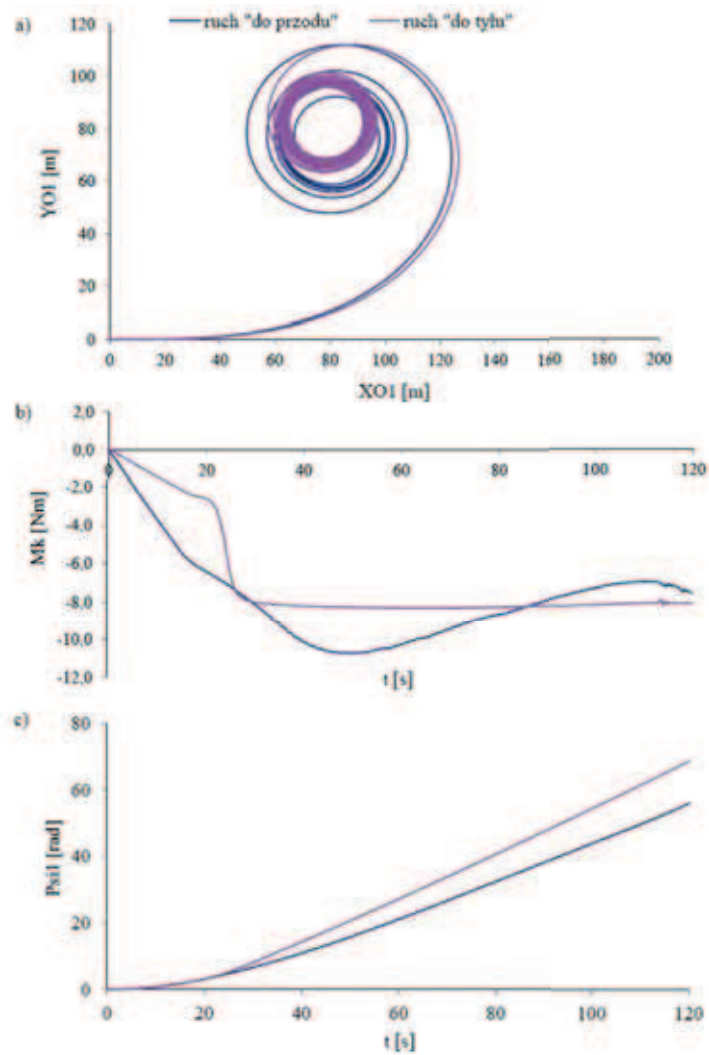
Na rysunku 8 przedstawiono zestawienie wyników symulacji dla różnych prędkości i rodzajów nawierzchni, podczas ruchu „do przodu” i „do tyłu”.

We wszystkich przypadkach liczba pętli była większa dla ruchu „do tyłu”, przy czym największa różnica wystąpiła przy prędkości 40 km/h, na suchym asfalciebetonie. Zwiększenie różnicy wraz ze wzrostem prędkości jest związane, między innymi, ze wzrostem przebytej drogi przez pojazd. W efekcie rośnie liczba zakreślonych pętli trajektorii ruchu środka masy. Zwiększają się też różnice między liczbami pętli. Na mokrym asfalciebetonie, przy prędkości 40 km/h, obserwujemy niższe wartości, ponieważ występują wtedy większe kąty bocznego znoszenia (pomijalnie małe przy niewielkich prędkościach), a co za tym idzie – zwiększa się promień toru ruchu środka masy pojazdu (pojazd jest w tym zakresie przyspieszeń poprzecznych głównie podsterowny, o czym w dalszej części pracy).

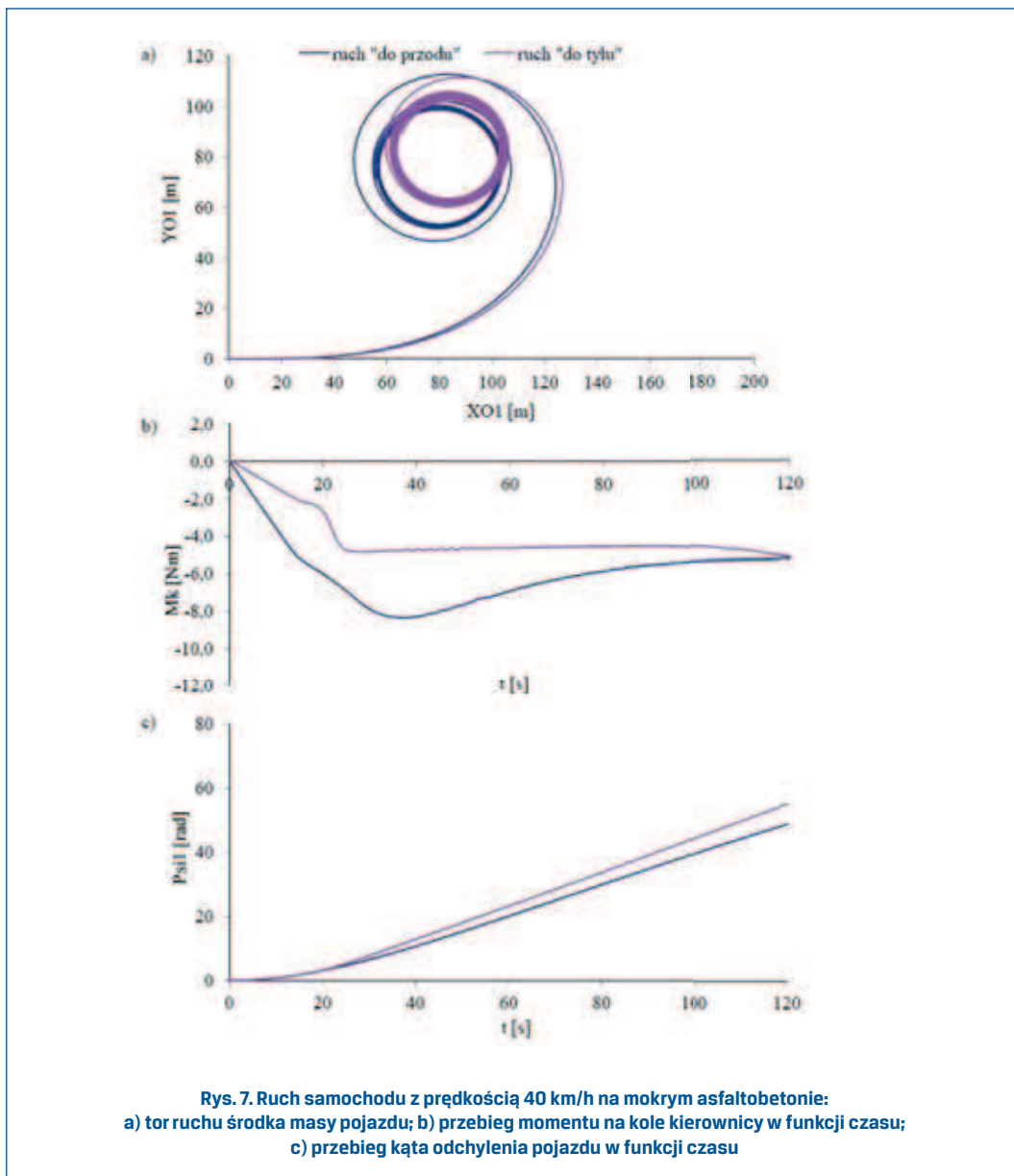
Kierowność określa, między innymi, łatwość kierowania samochodem, więc jako jedno z kryteriów jego oceny nasuwa się wartość momentu na kole kierownicy. Chociaż nie charakteryzuje bezpośrednio zachowania pojazdu, to jednak w warunkach rzeczywistych jest on istotny dla przebiegu manewru, ponieważ przy dużych wartościach może znacznie utrudnić lub nawet uniemożliwić kierowcy jego wykonanie. Ponieważ znak momentu na kole kierownicy był zależny od znaku kąta obrotu koła kierownicy, więc brana była pod uwagę jego wartość bezwzględna. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wartości maksymalne oraz średnie modułu momentu na kole kierownicy, występujące w trakcie trwania symulacji tego manewru.

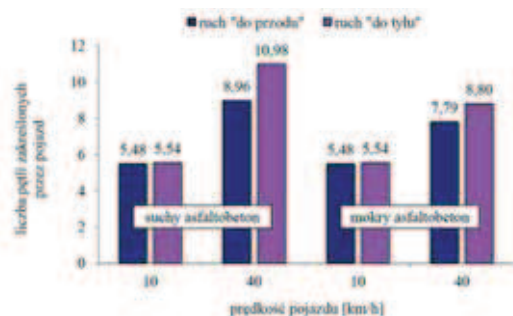
We wszystkich przypadkach obserwujemy większą wartość bezwzględną momentu na kole kierownicy podczas ruchu „do przodu”. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że kąty wyprzedzenia i pochylenia osi zataczania (przede wszystkim kąt wyprzedzenia) są dobierane tak, aby spełniały swoje zadanie podczas ruchu „do przodu”. Podczas ruchu „do tyłu” kąt wyprzedzenia ma wpływ destabilizujący, zmniejszając wartość momentu stabilizującego i momentu na kole kierownicy – stąd tak duży spadek momentu na kole kierownicy dla małych prędkości. Dla większych prędkości główną rolę odgrywa moment stabilizujący opony, a nie kąty ustawienia kół i wartości momentu na kole kierownicy są tu bardziej zbliżone dla ruchu „do przodu” i „do tyłu”. Mniejszy moment na kole kierownicy na mokrym asfalciebetonie jest skutkiem zmniejszenia się wartości współczynnika przyczepności, a więc i momentu stabilizującego opony.

Wyznaczenie charakterystyk sterowności było głównym celem przeprowadzonych symulacji. Wyznaczenie ich jest możliwe na podstawie analizy sygnału wejściowego w postaci kąta obrotu koła kierownicy w dziedzinie przyspieszenia poprzecznego pojazdu. Rysunki 11 i 12 przedstawiają charakterystyki sterowności – zależność różnicy kąta obrotu koła kierownicy i kąta obrotu koła kierownicy pojazdu Ackermanna (pojazdu, dla którego pominięto kąty bocznego znoszenia ogumienia) od przyspieszenia poprzecznego [1, 2, 3, 18]. Wyznaczono je jedynie dla prędkości pojazdu równej 40 km/h, ponieważ przy prędkości 10 km/h występują zbyt małe przyspieszenia, aby zjawisko bocznego znoszenia miało istotny wpływ na ruch samochodu. Kryterium oceny sterowności stanowi kąt nachylenia stycznej do charakterystyki  $\alpha_k - \alpha_{k, Ack} = f(a_{\eta 1})$  w danym punkcie, względem linii Ackermanna, leżącej na osi poziomej. Samochód jest nadsterowny dla kątów ujemnych, neutralny dla kąta równego zeru i podsterowny dla kątów dodatnich.

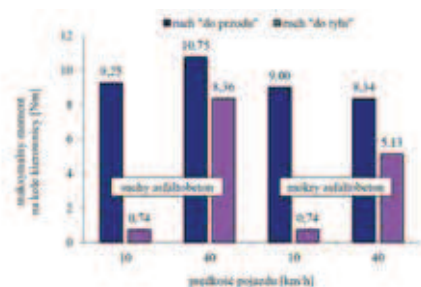


Rys. 6. Ruch samochodu z prędkością 40 km/h na suchym asfalciebetonie:  
a) tor ruchu środka masy pojazdu; b) przebieg momentu na kole kierownicy w funkcji czasu;  
c) przebieg kąta odchylenia pojazdu w funkcji czasu

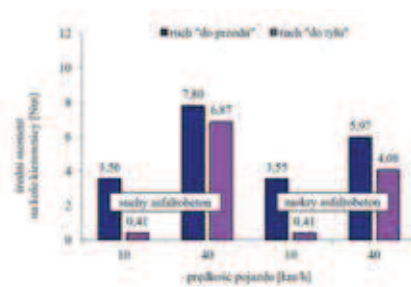




Rys. 8. Liczba pętli w zależności od prędkości pojazdu i rodzaju nawierzchni

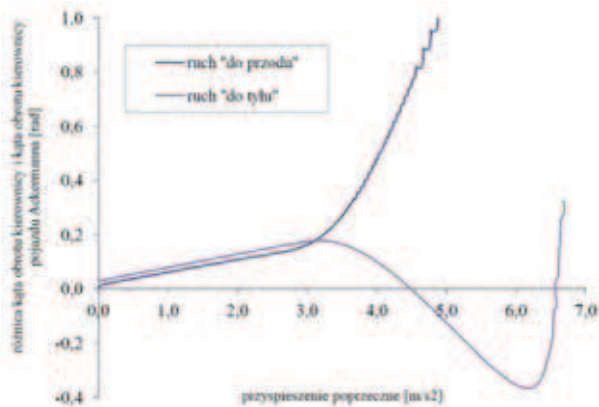


Rys. 9. Wartość maksymalna wartości bezwzględnej momentu na kole kierownicy w zależności od prędkości pojazdu i rodzaju nawierzchni

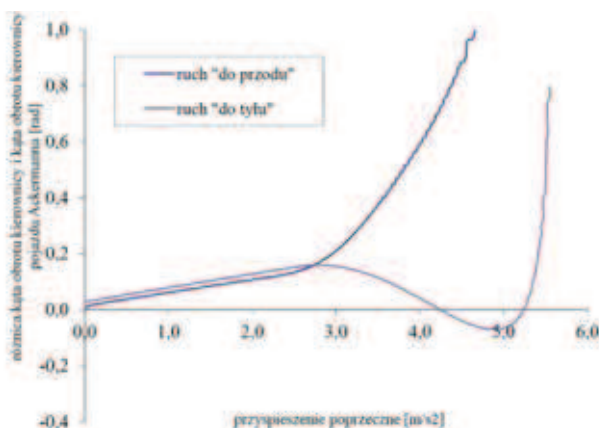


Rys. 10. Wartość średnia wartości bezwzględnej momentu na kole kierownicy w zależności od prędkości pojazdu i rodzaju nawierzchni

W przypadku ruchu "do przodu", uzyskane charakterystyki wskazują na podsterowność samochodu w całym rozpatrywanym zakresie. Zauważalną zmianą jest zwiększenie kąta nachylenia krzywej, począwszy od wartości przyspieszenia poprzecznego równej około  $2,8 \text{ m/s}^2$  dla samochodu poruszającego się po suchym asfaltobetonie i około  $2,5 \text{ m/s}^2$  dla samochodu poruszającego się po mokrym asfaltobetonie. Samochód poruszający się "do tyłu" ma charakterystykę podsterowną, zbliżoną do charakterystyki samochodu poruszającego się "do przodu", dla wartości przyspieszenia poprzecznego nie przekraczających  $3,10 \text{ m/s}^2$  w przypadku ruchu na suchym asfaltobetonie oraz  $2,76 \text{ m/s}^2$  w przypadku ruchu na mokrym asfaltobetonie. Przy podanych wartościach przyspieszenia poprzecznego ( $3,10 \text{ m/s}^2$  oraz  $2,76 \text{ m/s}^2$ ) samochód ma charakterystykę neutralną, a przy większych staje się nadsterowny. Kolejna zmiana kąta nachylenia stycznej do charakterystyki następuje przy wartościach przyspieszenia poprzecznego równych  $6,17 \text{ m/s}^2$  w przypadku ruchu samochodu po suchym asfaltobetonie i  $4,92 \text{ m/s}^2$  w przypadku ruchu samochodu po mokrym asfaltobetonie. Powyżej tych wartości ruch samochodu staje się nieustalony i dla większej czytelności charakterystyk pominięto zakres odpowiadający wartościom bezwzględnym kąta obrotu koła kierownicy powyżej 3 rad.



Rys. 11. Charakterystyki sterowności dla samochodu poruszającego się po suchym asfalcie z prędkością 40 km/h



Rys. 12. Charakterystyki sterowności dla samochodu poruszającego się po mokrym asfalcie z prędkością 40 km/h

Analizując otrzymane charakterystyki można stwierdzić, że jedynie w przypadku ruchu "do tyłu" i tylko dla wąskich zakresów wartości przyspieszenia poprzecznego możemy uznać badany samochód za neutralny lub zbliżony do neutralnego, a poza podanymi wcześniej wartościami przyspieszenia poprzecznego samochód ma charakterystykę podsterowną lub nadsterowną. Znaczna podsterowność lub nadsterowność pojazdu jest zjawiskiem niekorzystnym, jednak ze względu na łatwość kierowania pojazdem, bardziej pożądana jest charakterystyka podsterowna, ponieważ podczas ruchu samochodu podsterownego na zakręcie, konieczne jest zwiększanie kąta obrotu koła kierownicy, w celu utrzymania pożądanego toru ruchu samochodu, natomiast w przypadku samochodu nadsterownego, kierujący musi odpowiednio zmniejszać ten kąt, co jest zachowaniem mniej intuicyjnym i wymaga od kierującego większej sprawności psychomotorycznej. Istnieją przypadki,

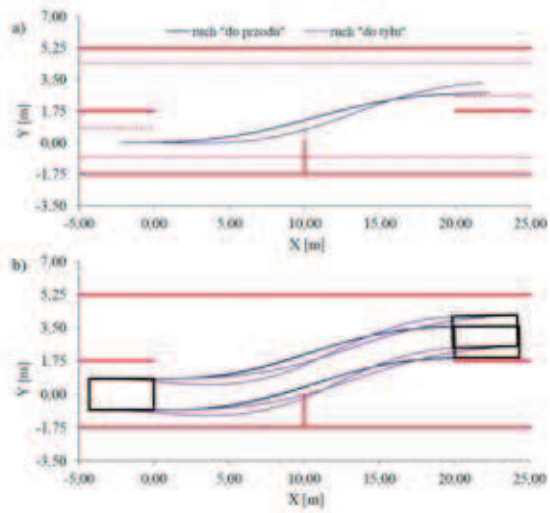


gdy pożądana jest nadsterowna charakterystyka pojazdu, lecz dotyczy to głównie ich wykorzystania w sportach motorowych, gdzie uzyskany wynik (czas przejazdu) może być przedkładany nad łatwość manewrowania. Najbardziej niekorzystnym zjawiskiem jest zmiana charakterystyki pojazdu z podsterownej na nadsterowną lub odwrotnie, w zależności od wartości przyspieszenia poprzecznego, ponieważ zachowanie takiego pojazdu jest bardzo nieprzewidywalne. Z otrzymanych charakterystyk wynika, że badany samochód powinien zapewniać dużą łatwość kierowania w zakresie przyspieszeń do około  $3,1 \text{ m/s}^2$  podczas ruchu na suchym asfalcie i do około  $2,8 \text{ m/s}^2$  podczas ruchu na mokrym asfalcie. Dla wyższych wartości przyspieszenia poprzecznego, podczas ruchu "do przodu" następuje wzmożenie zjawiska podsterowności, a podczas ruchu "do tyłu" samochód staje się nadsterowny, co jak już wcześniej napisano jest zjawiskiem niekorzystnym i może prowadzić do utraty panowania nad pojazdem przez kierującego. Taka charakterystyka dla ruchu "do tyłu" nie powinna jednak stanowić zagrożenia w normalnych warunkach eksploatacyjnych, jeżeli samochód będzie się poruszał z niewielkimi prędkościami a więc i małym przyspieszeniem poprzecznym.

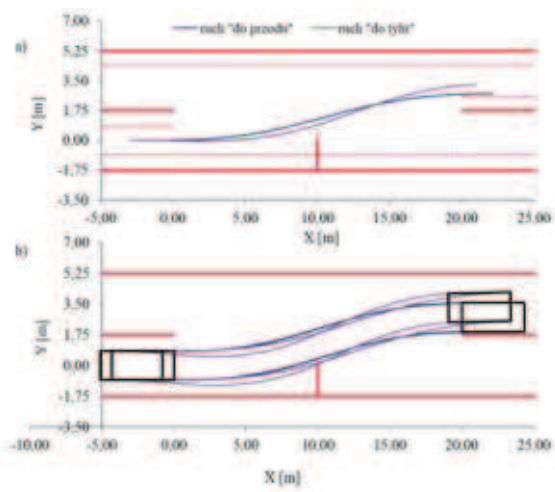
#### 4.2. Wyniki symulacji dla pojedynczej zmiany pasa ruchu

Rysunek 13 przedstawia tor ruchu środka masy i obrysu pojazdu na suchym asfalcie. W przypadku ruchu „do tyłu” manewr ten zakończyłby się sukcesem (jak dla ruchu „do przodu”), gdyby nie przekroczenie linii pionowej oznaczającej przeszkodę. Aby temu zapobiec należałoby rozpocząć manewr zmiany pasa ruchu odpowiednio wcześniej, co w warunkach symulacyjnych można zrealizować przez przesunięcie położenia początkowego punktu  $O$ , w kierunku  $O_x$ . Kierowca musi uwzględnić tę różnicę w trakcie realizacji manewru. Tor ruchu pojazdu z uwzględnieniem tego przesunięcia przedstawiono na rysunku 14. Wymuszenie na kole kierownicy pozostało niezmienione, więc charakterystyki momentu na kole kierownicy, kąta odchylenia pojazdu oraz przyspieszenia poprzecznego w funkcji czasu również nie ulegną zmianie.

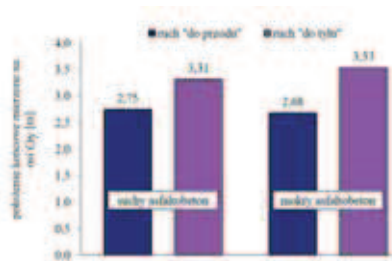
Wyniki symulacji dla parametrów odpowiadających ruchowi pojazdu na mokrym asfalcie są zbliżone jakościowo do otrzymanych na suchym asfalcie; rosną jednak różnice ilościowe, co zostanie zaprezentowane w postaci wielkości opisujących cały manewr. Ponieważ wymuszenie na kole kierownicy było zawsze takie samo, więc można bezpośrednio porównać położenia końcowe pojazdu. Jako kryterium oceny zachowania pojazdu przyjęto położenie końcowe środka masy pojazdu w kierunku  $O_y$  (rysunek 15), zmianę położenia początkowego pojazdu konieczną do realizacji manewru z sukcesem (rysunek 16), największy (rysunek 17) i końcowy (rysunek 18) kąt odchylenia bryły nadwozia oraz największy (rysunek 19) i średni (rysunek 20) moment na kole kierownicy.



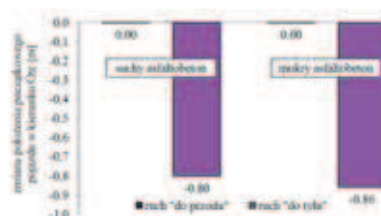
Rys. 13. Tor ruchu na suchym asfalcie: a) środka masy pojazdu; b) obrysu pojazdu



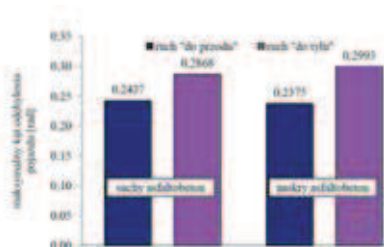
Rys. 14. Tor ruchu na suchym asfalcie, po zmianie położenia początkowego pojazdu (dla ruchu „do tyłu”): a) środka masy pojazdu; b) obrysu pojazdu



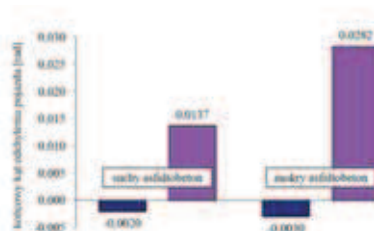
Rys. 15. Porównanie położenia końcowego pojazdu w kierunku  $O_y$



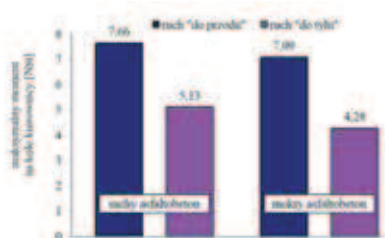
Rys. 16. Zmiana położenia początkowego środka masy pojazdu w kierunku  $O_x$  konieczna do zakończenia manewru sukcesem



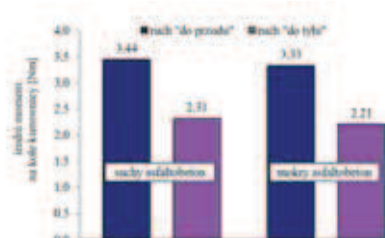
Rys. 17. Największy kąt odchylenia bryły nadwozia podczas manewru



Rys. 18. Końcowy kąt odchylenia bryły nadwozia



Rys. 19. Największy moment na kole kierownicy



Rys. 20. Średni moment na kole kierownicy

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że przy takim samym wymuszeniu na kole kierownicy uzyskuje się większe przemieszczenie poprzeczne samochodu, gdy porusza się on „do tyłu”. Końcowy kąt odchylenia pojazdu jest także w tym przypadku większy (samochód nie powraca do początkowego położenia kątownego). Dla ruchu „do tyłu” mniejsze są wartości momentu na kole kierownicy, co każe kierowcy z większą ostrożnością wykonywać manewr cofania.

## 5. Wnioski końcowe

Nadsterowna charakterystyka badanego samochodu podczas ruchu „do tyłu” (przy dużych wartościach przyspieszenia poprzecznego) powoduje, że kierowanie poruszającym się w ten sposób samochodem może być utrudnione. Jest to spowodowane tym, że w przypadku samochodu o charakterystyce podsterownej, kierowca w trakcie ruchu po torze o stałym promieniu krzywizny musi korygować kąt obrotu koła kierownicy, lecz cały czas obraca kierownicą w tę samą stronę, natomiast samochód o charakterystyce nadsterownej, podczas ruchu po tym samym torze, dąży do zmniejszenia promienia toru ruchu i zmusza kierowcę do korekty kąta obrotu koła kierownicy przez obrót w stronę przeciwną.

Kąty wyprzedzenia i pochylenia osi zataczania (przede wszystkim kąt wyprzedzenia) są dobierane tak, aby spełniały swoje zadanie podczas ruchu „do przodu”. Podczas ruchu „do tyłu” kąt wyprzedzenia ma wpływ destabilizujący, zmniejszając wartość momentu stabilizującego i momentu na kole kierownicy. Dla większych prędkości główną rolę odgrywa moment stabilizujący opony, a nie kąty ustawienia kół i wartości momentu na kole kierownicy są tu bardziej zbliżone dla ruchu „do przodu” i „do tyłu”. Mniejszy moment na kole kierownicy na mokrym asfalcie jest skutkiem zmniejszenia się wartości współczynnika przyczepności, a więc i momentu stabilizującego opony.

Uzyskane wyniki wskazują, że wykonywanie gwałtownych manewrów podczas ruchu „do tyłu” jest bardziej ryzykowne niż dla ruchu „do przodu”. Mniejsze są w tym przypadku wartości momentu na kole kierownicy, co każe kierowcy z większą ostrożnością wykonywać ten manewr.

## Literatura

- [1] ARCZYŃSKI S.: *Mechanika ruchu samochodu*. WNT, Warszawa 1993.
- [2] ISO 4138: *Road vehicles – steady state circular test procedure*. 1982.
- [3] Polish National Standard PN-87/S-47350: *Pojazdy samochodowe. Metoda badań w ustalonych stanach ruchu na torze kołowym*.
- [4] E/ECE/324, E/ECE/TRANS/505. UNECE Regulation No. 79. Revision 2. *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to steering equipment*. 21 April 2005.
- [5] Komenda Główna Policji. Biuro Ruchu Drogowego. Zespół Profilaktyki i Analiz. *Wypadki drogowe w Polsce w 2012 roku*. Warszawa, 2013 r. (Oprac.: Elżbieta Symon).
- [6] Komenda Główna Policji. Biuro Ruchu Drogowego. Zespół Profilaktyki i Analiz. *Wypadki drogowe w Polsce w 2011 roku*. Warszawa, 2012 r. (Oprac.: Elżbieta Symon).
- [7] [http://moto.wp.pl/kat,1035925,title,Oddzial-5-Wymijanie-omijanie-i-cofanie,wid,15290037,kodeks\\_drogowy\\_rozdzial.html?tid=111f4c](http://moto.wp.pl/kat,1035925,title,Oddzial-5-Wymijanie-omijanie-i-cofanie,wid,15290037,kodeks_drogowy_rozdzial.html?tid=111f4c) (dostęp: 03.01.2014 r.).
- [8] <http://kodeks-drogowy.org/ruch-drogowy/ruch-pojazdow/wymijanie-omijanie-i-cofanie> (dostęp: 03.01.2014 r.).
- [9] <http://www.ciop.pl/26905>. Centralny Instytut Ochrony Pracy. E-Facts. *Zapobieganie wypadkom z udziałem pojazdów w budownictwie*. (dostęp: 03.01.2014 r.).
- [10] <http://hw.osha.europa.eu> – zalecenia Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy.
- [11] <http://www.roadingnz.org.nz>. *Guideline for Controlling Reversing Vehicles*. Roading New Zealand, ISBN 978-0-9582827-1-0, December 2009 (dostęp: 03.01.2014 r.).
- [12] <http://patentynamanewry.blogspot.com/2012/08/jazda-pasem-ruchu-do-przodu-i-do-tyu-i.html> (dostęp: 03.01.2014 r.).
- [13] <http://www.ckprawko.pl/poradnik-kursanta/egzamin-jazda-po-luku/> (dostęp: 03.01.2014 r.).

- [14] [http://www.linkedin.com/company/networp/vehicle-reversing-safety-systems-136679/product?trk=biz\\_product](http://www.linkedin.com/company/networp/vehicle-reversing-safety-systems-136679/product?trk=biz_product) (dostęp: 03.01.2014 r.).
- [15] <http://www-cvdc.eng.cam.ac.uk/photo-and-video-gallery/active-steering-of-european-combination-vehicles/unsteered-roundabout-manoevre> (dostęp: 03.01.2014 r.).
- [16] <http://www-cvdc.eng.cam.ac.uk/photo-and-video-gallery/actively-steered-b-double-lorry/teardrop-reversing-manoevre> (dostęp: 03.01.2014 r.).
- [17] LOZIA Z.: *Symulacja testów otwartych układu kierowca-pojazd-otoczenie*. Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, PAN Oddz. w Krakowie. Zeszyt 26÷27 Kraków 2003 r. Str. 229÷234.
- [18] LOZIA Z.: *Analiza ruchu samochodu dwuosowego na tle modelowania jego dynamiki* Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
- [19] ISO TR 8725: *Road vehicles – transient open-loop response test method with one period of sinusoidal input*. 1988.