

MODELOWANIE I SYMULACJA ZAKŁÓCENIA RUCHU SAMOCHODU W TRAKCIE WJAZDU NA PŁYTĘ POŚLIZGOWĄ STOSOWANĄ W OŚRODKACH DOSKONALENIA TECHNIKI JAZDY

ZBIGNIEW LOZIA¹

Politechnika Warszawska

Streszczenie

Artykuł dotyczy modelowania zaburzenia ruchu pojazdu w trakcie testów z wykorzystaniem płyty poślizgowej stosowanej w ośrodkach doskonalenia techniki jazdy (ODTJ). Zaburzenie to jest wywoływane z użyciem „płyty dynamicznej”, która stanowi obowiązkowe wyposażenie ośrodków doskonalenia techniki jazdy stopnia podstawowego i wyższego, co określono w Rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 16 stycznia 2013 r. w sprawie doskonalenia techniki jazdy.

Zaburzenie wywołane ruchem poprzecznym płyty (w stosunku do toru ruchu pojazdu) zmusza kierowcę do wykonania manewrów obronnych w postaci obrotu kołem kierownicy, hamowania lub przyspieszania, bądź kombinacji tych manewrów.

Artykuł przedstawia model ruchu i dynamiki samochodu oraz sposób wprowadzenia opisanego zaburzenia. Zaprezentowano wyniki symulacji obrazujące skalę zaburzenia ruchu pojazdu, na które musi zareagować szkolony kierowca. Przedstawiono metodykę i wyniki wyboru prędkości ruchu pojazdu w trakcie testu.

Słowa kluczowe: symulacja, dynamika samochodu, ośrodki doskonalenia techniki jazdy

1. Wprowadzenie

W ośrodkach doskonalenia techniki jazdy (ODTJ) wykonywane są testy, w których przed wjazdem na płytę o obniżonej przyczepności zaburza się ruch pojazdu za pomocą „płyty dynamicznej”. Stanowi ona obowiązkowe wyposażenie wspomnianych ośrodków, co określono w Rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 16 stycznia 2013 r. w sprawie doskonalenia techniki jazdy [12].

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, lozia@wt.pw.edu.pl, tel. 22 234 8246

Realizacja praktyczna polega najczęściej na wywołaniu ruchu poprzecznego płyty (w stosunku do toru ruchu pojazdu) w chwili, gdy koła przednie zjeżdżają z „płyty dynamicznej” a poruszają się po niej jeszcze koła tylne. Zaburzenie wywołane ruchem płyty zmusza kierowcę do wykonania manewrów obronnych. Najczęściej jest to obrót kołem kierownicy. Możliwe są jednak inne, nawet zaskakujące działania kierowcy, w postaci hamowania lub przyspieszania, bądź kombinacji wymienionych reakcji a więc i manewrów pojazdem.

Artykuł przedstawia model ruchu i dynamiki samochodu oraz sposób wprowadzenia opisanego zaburzenia ruchu pojazdu. Zaprezentowane będą wyniki symulacji obrazujące skalę zaburzenia ruchu pojazdu, na które musi zareagować osoba szkolona. Oceniane jest zachowanie samego pojazdu w okresie odpowiadającym czasie reakcji kierowcy, a więc bez jego ingerencji.

2. Budowa toru, na którym prowadzone są testy z zaburzeniem ruchu pojazdu

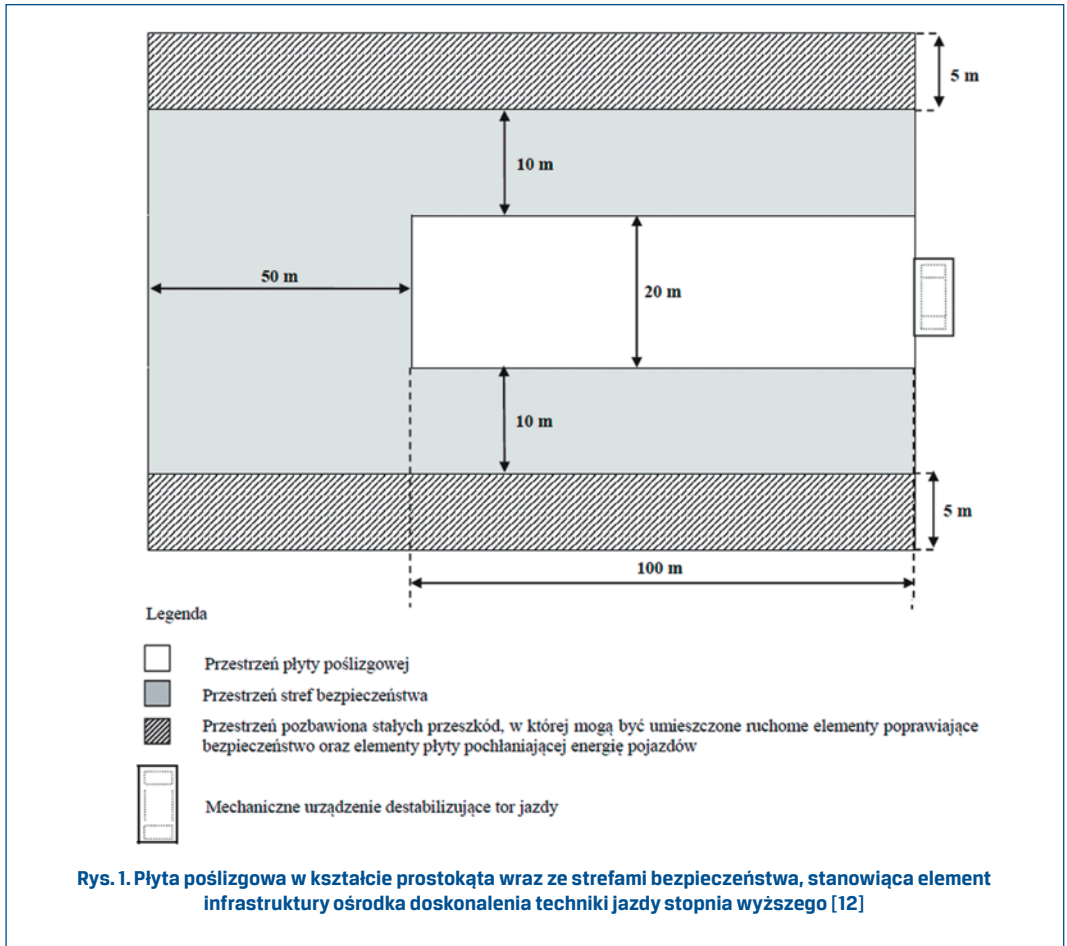
Zgodnie z aktem normatywnym [12], ośrodki doskonalenia techniki jazdy stopnia podstawowego oraz stopnia wyższego powinny być wyposażone w elementy infrastruktury, które destabilizują tor ruchu pojazdu. Przed wjazdem na „płytę poślizgową prostokątną” (płytę o obniżonej przyczepności, odpowiadającą nawierzchni drogi pokrytej warstewką wody) znajdować się powinno „mechaniczne urządzenie destabilizujące tor jazdy, umieszczone bezpośrednio przed płytą (...), wyposażone w niebędące trolejami urządzenie, pozwalające na zmianę przyczepności do podłoża przednich lub tylnych kół pojazdu”. Wspomnianym urządzeniem destabilizującym jest „płyta dynamiczna” zwana także „szarpakiem” („kickplate”) [16]. Najczęściej zaburza się ruch kół tylnych [13, 15, 16, 17]. Rys. 1 przedstawia płytę poślizgową w kształcie prostokąta wraz ze strefami bezpieczeństwa, stanowiącą element infrastruktury ośrodka doskonalenia techniki jazdy stopnia wyższego [12].

3. Model symulacyjny ruchu i dynamiki samochodu osobowego

Model ruchu, dynamiki dwuosobowego pojazdu drogowego odpowiada samochodowi osobowemu klasy średniej KIA Ceed SW. Uzyskano dla niego bardzo dobre wyniki weryfikacji eksperymentalnej w testach zalecanych przez ISO.

3.1. Główne założenia upraszczające

Analizowany jest przede wszystkim ruch podstawowy pojazdu, reprezentowany przez współrzędne położenia bryły nadwozia i ich pochodne. Rozpatrywane są także wybrane zaburzenia związane z ruchem samochodu po nierównej nawierzchni drogi i zjawiskami zachodzącymi w kontakcie kierowanych kół ogumionych z podłożem. Pojazd traktowany



jest jako zbiór brył sztywnych i punktów materialnych połączonych elementami wodzącymi, sprężystymi i tłumiącymi. Pomijane są względne ruchy pasażerów, kierowcy, ładunku i zespołu napędowego z silnikiem. Elementy te wchodzą w skład bryły sztywnej obrazującej kadłub pojazdu – nadwozie. Nadwozie ma podłużną płaszczyznę symetrii. Wymuszenia pochodzą od kierowcy, oddziałującego na mechanizmy sterowania pojazdem i w ten sposób zmieniającego kąt obrotu kierownicy, siłę nacisku na pedał hamulca, stopień otwarcia przepustnicy, czy też ogólniej: mechanizm sterowania układem zasilania silnika. Nawierzchnia drogi jest nieodkształcalna. Dopuszcza się pochylenie wzdłużne i boczne drogi oraz jej nierówności. Pojazd oddziałuje na podłoże przez podatne koła ogumione (pneumatyki).

3.2. Model fizyczny pojazdu

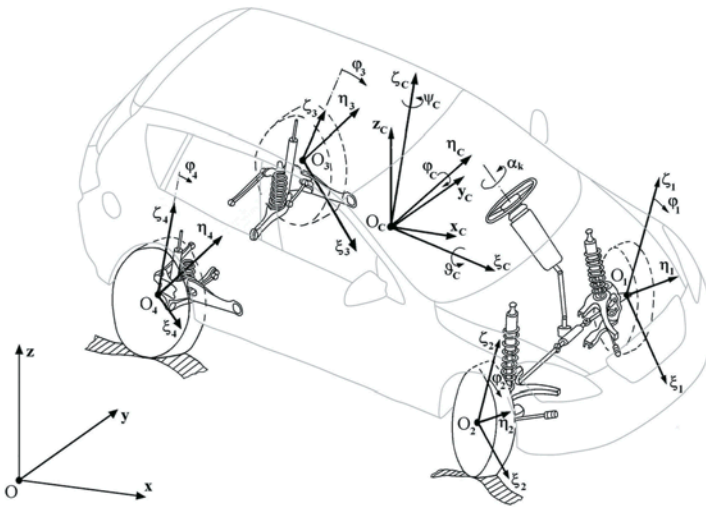
Samochód KIA Cee'd SW (rys. 2) ma przednie zawieszenie typu McPherson ze stabilizatorem

przechyłu bocznego. Zawieszenia koła lewego i prawego tylnego są niezależne od siebie (poza sprzężeniem przez stabilizator przechyłu bocznego). Składają się z elementu sprężystego (sprężyny śrubowej), amortyzatora, wahaczy poprzecznych, wahacza wzdłużnego.

Na rys. 3 przedstawiono model fizyczny samochodu dwuosiowego z niezależnym zawieszeniem przednim i tylnym, wraz z przyjętymi układami współrzędnych.



Rys. 2. Samochód KIA Cee'd SW [14]



Rys. 3. Model fizyczny samochodu osobowego – pojazdu dwuosiowego z niezależnym zawieszeniem przednim i tylnym, wraz z przyjętymi układami współrzędnych [10]

3.3. Własności inercyjne modelowanych pojazdów

Model dwuosiowego samochodu osobowego przedstawiony na rys. 3 składa się z dziewięciu elementów masowych: bryły nadwozia (traktowanej jako bryła sztywne), czterech punktów materialnych O_1, O_2, O_3 i O_4 , w których skupiono tzw. „masy nieresorowane” pojazdu (w tym koła jezdne w ruchu postępowym) i czterech wirujących kół jezdnych (wyłącznie ruch obrotowy) [9].

3.4. Przyjęte układy współrzędnych

Przyjęto następujące układy współrzędnych (rys. 3) [7, 8, 9, 10, 11]:

- Oxyz – układ inercjalny, związany z drogą; osie O_x i O_y są poziome, pionowa oś O_z jest skierowana do góry;
- $O_C x_C y_C z_C$ – układ nieinercjalny o osiach równoległych odpowiednio do osi O_x, O_y i O_z oraz początku w środku masy bryły nadwozi O_C ;
- układy sztywno związane z bryłami sztywnymi modelu: bryłą nadwozia ($O_C \xi_C \eta_C \zeta_C$) i czterema kołami jezdными ($O_1 \xi_1 \eta_1 \zeta_1, O_2 \xi_2 \eta_2 \zeta_2, O_3 \xi_3 \eta_3 \zeta_3, O_4 \xi_4 \eta_4 \zeta_4$);
- układy pomocnicze, ułatwiające określenie macierzy transformacyjnych.

Do opisu ruchu postępowego brył i punktów materialnych modelu wykorzystywane jest położenie środków mas wymienionych brył (O_C, O_1, O_2, O_3, O_4). Osie $O_i \xi_i, O_i \eta_i, O_i \zeta_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$) są traktowane jako główne centralne osie bezwładności odpowiednich brył sztywnych. Ruch kulisty bryły nadwozia względem bieguna O_C opisano, wykorzystując „kąty samolotowe”, zwane też „quasi-eulerowskimi” [7, 8, 9, 11]. Osie kolejnych obrotów są traktowane jako główne centralne osie bezwładności bryły nadwozia.

Bardziej szczegółowy opis rodzinny modeli ruchu i dynamiki pojazdów dwuosiowych oraz opis współpracy koła ogumionego z nawierzchnią drogi można znaleźć w pozycjach literaturowych [8, 9, 10] autora niniejszej pracy.

3.5. Równania ruchu

Równania ruchu wyprowadzono wykorzystując równania Lagrange'a II rodzaju (np. [6, 9]). Wcześniej przyjęto 14 następujących współrzędnych uogólnionych:

$q_1 = x_{OC}, q_2 = y_{OC}, q_3 = z_{OC}$ – współrzędne określające położenie środka O_C masy bryły nadwozia w inercjalnym układzie odniesienia Oxyz

$q_4 = \psi_C, q_5 = \varphi_C, q_6 = \vartheta_C$ – współrzędne opisujące ruch kulisty bryły nadwozia względem jej środka masy O_C ; są to kąty quasi-eulerowskie (samolotowe) – kąt odchylenia, przechyłu wzdłużnego i boczno;

$q_7 = \zeta_{CO1}, q_8 = \zeta_{CO2}, q_9 = \zeta_{CO3}, q_{10} = \zeta_{CO4}$ – współrzędne opisujące ruch punktów $O_1, O_2, O_3,$

O_4 względem bryły nadwozia w kierunku $O_{C\xi C}$ układu $O_{C\xi C}\eta_C\zeta_C$; do tych punktów redukowane są "masy nieresorowane" zawieszenia;

$q_{11} = \varphi_1$, $q_{12} = \varphi_2$, $q_{13} = \varphi_3$, $q_{14} = \varphi_4$ – kąty obrotu kół jezdnych (odpowiednio: przedniego lewego i prawego, tylnego lewego i prawego).

3.6. Własności geometryczne i sprężyste układu kierowniczego

Wprowadzono rzeczywistą charakterystykę kątów skrętu kół jako funkcję kąta obrotu kierownicy α_k dla układu nieobciążonego. Uwzględniono podatność układu kierowniczego. Dodatkowe kąty skrętu kół są funkcjami momentów stabilizujących oraz podatności skrętnej kolumny kierowniczej wraz z przekładnią oraz podatności lewej i prawej strony układu zwrotniczego [9].

3.7. Siły i momenty występujące w obszarze kontaktu koła z drogą

W opisie sił kontaktowych wykorzystano model HSRI-UMTRI [4, 5] uzupełniony o model stanów nieustalonych ogumienia IPG-Tire [9]. Siły powstające w kontakcie koło-droga są także efektem modelowania własności sprężystych koła ogumionego [8], działania układów ABS (przeciwblokującego), ASR („przeciwpoślizgowego”) i ESP (stabilizacji toru ruchu pojazdu), zgodnie z wytycznymi i algorytmami firmy Bosch [2, 3] oraz dostępną dokumentacją producenta modelowanego pojazdu.

4. Wprowadzenie do modelu ruchu pojazdu zakłócenia w postaci przemieszczenia poprzecznego „płyty dynamicznej”, umieszczonej przed wjazdem na płytę poślizgową

Rysunek 4 przedstawia schemat, stanowiący podstawę modyfikacji modelu i programu symulacyjnego ruchu pojazdu na torze, na którym prowadzone są testy badanych kierowców. Wybrano najczęściej stosowany wariant zaburzenia ruchu kół tylnych [13, 15, 16, 17], gdy koła przednie zjechały już z „płyty dynamicznej”, co obrazuje rys. 4. Część ruchoma płyty ma długość l_p [m] i szerokość s_p [m].

W trakcie zaburzania ruchu pojazdu prędkość poprzeczna płyty (w stosunku do początkowego toru ruchu pojazdu) wynosi v_{yp} [m/s]. Na obecnym etapie prac, gdy znane są jedynie ogólne parametry urządzenia, przyjęto, że prędkość ta jest stała w trakcie testu. Jeżeli ekstremalne przemieszczenie poprzeczne płyty wynosi s_{yp} [m] to czas poprzecznego przemieszczania się płyty wynosi t_{yp} [s] i może być obliczony z zależności (1), jako moduł ilorazu przemieszczenia poprzecznego płyty i jej prędkości poprzecznej. Jest to pierwsze ograniczenie czasu trwania zaburzenia ruchu pojazdu.

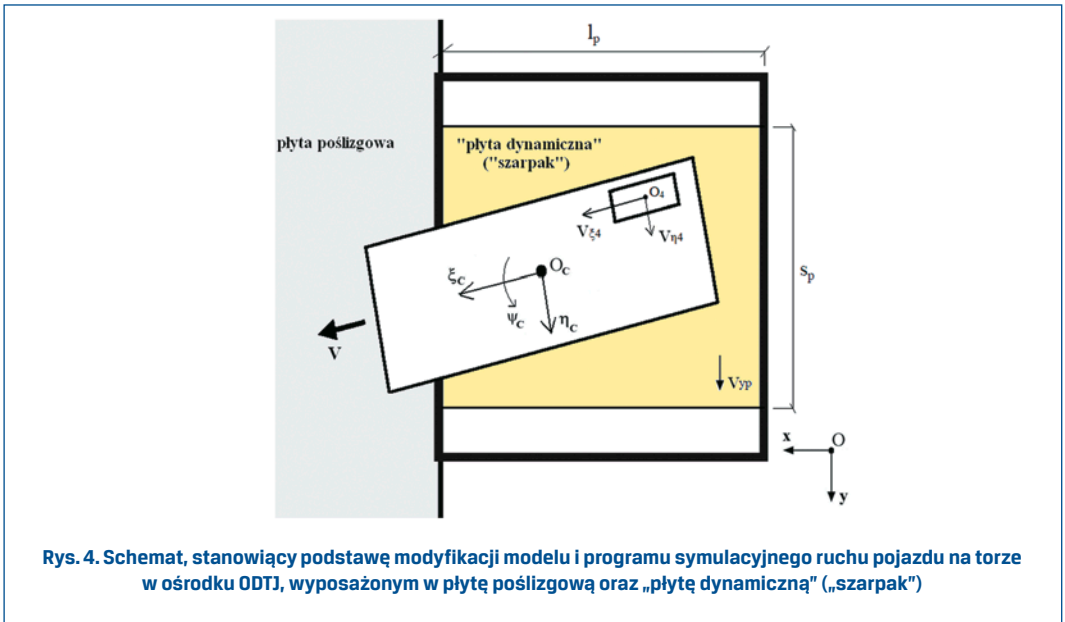
$$t_{yp} = |s_{yp} / v_{yp}| \quad (1)$$

Drugim ograniczeniem jest czas przebywania kół tylnych na „płytcie dynamicznej” t_{np} [s]. Jego wartość maksymalną t_{npmax} [s] można wyrazić wzorem (2), gdzie v [m/s] jest prędkością pojazdu w chwili pojawienia się zakłócenia a l [m] jest rozstawem osi pojazdu.

$$t_{npmax} = l / v \text{ for } l \leq l_p \quad \text{and} \quad t_{npmax} = l_p / v \text{ for } l > l_p \quad (2)$$

Założono tu, że zmiana kąta odchylenia (kąta kierunkowego) pojazdu ψ_C [rad] i prędkości pojazdu v [m/s] w czasie t_{np} [s] jest na tyle mała, że dla fazy ruchu pojazdu na „płytcie dynamicznej” można przyjąć przybliżenie (3).

$$v_x = v_\xi = v \quad (3)$$



Rys. 4. Schemat, stanowiący podstawę modyfikacji modelu i programu symulacyjnego ruchu pojazdu na torze w ośrodku ODT, wyposażonym w płytę poślizgową oraz „płytę dynamiczną” („szarpak”)

Wspomniane wprowadzenie do modelu ruchu pojazdu [9, 10] zakłócenia w postaci przemieszczenia poprzecznego „płyty dynamicznej” polega na zmodyfikowaniu wartości prędkości wzdłużnej $v_{\xi k}$ [m/s] i poprzecznej $v_{\eta k}$ [m/s] rzutu na płaszczyznę drogi prędkości środka k-tego koła O_k . Są one obliczane w układzie lokalnym $O_k \xi_k \eta_k$ związany z kołem jezdny. Modyfikacja ta, opisana zależnościami (4) i (5), uwzględnia skutki ruchu poprzecznego, umieszczonej przed wjazdem na płytę poślizgową, „płyty dynamicznej” z prędkością v_{yp} [m/s]. Na rys. 4 przedstawiono te wielkości dla koła prawego tylnego ($k = 4$).

$$v_{\xi kw} = v_{\xi k} - v_{yp} \cdot \sin \psi_C \quad (4)$$

$$v_{\eta kw} = v_{\eta k} - v_{yp} \cdot \cos \psi_C \quad (5)$$

gdzie $v_{\xi kw}$ [m/s] i $v_{\eta kw}$ [m/s] to składowa wzdłużna i poprzeczna rzutu na płaszczyznę drogi prędkości środka k-tego koła O_k , mierzona względem ruchomej „płyty dynamicznej”.

5. Przyjęte dane badanego pojazdu, zakłócenia oraz warunków ruchu

Dane pojazdu odpowiadają danym nominalnym samochodowi Kia Cee'd SW w stanie gotowości do jazdy, obciążonemu kierowcą i instruktorem jazdy. Masa całkowita wynosiła 1570 kg. Rozstaw osi dla tego pojazdu to $l = 2,655$ m, odległość środka masy od osi przedniej $l_1 = 0,976$ m, od osi tylnej $l_2 = 1,679$ m, statyczna wysokość środka masy $z_{Oc} = 0,516$ m.

Dane „płyty dynamicznej” wzorowano na parametrach urządzenia polskiego producenta UNIMETAL [17]. Długość płyty $l_p = 3,0$ m, szerokość $s_p = 2,7$ m, prędkość przesuwu poprzecznego $v_{yp} = 1,5$ m/s, ekstremalne przemieszczenie poprzeczne płyty wynosi $s_{yp} = \pm 0,3$ m przyjęto $s_{yp} = 0,3$ m. Płyta pokryta jest materiałem o maksymalnej wartości współczynnika przyczepności równego 0,8. Autor interpretuje ją jako wartość współczynnika przyczepności dla prędkości poślizgu bliskiej zeru. Ze wzoru (1) otrzymano (dla dodatniego przemieszczenia poprzecznego płyty s_{yp}) $t_{yp} = 0,2$ s. Dla płyty poślizgowej przyjęto maksymalną wartość współczynnika przyczepności równą 0,5. Założono, że nawierzchnia drogi i płyt stanowiska testowego jest pozioma, równa.

Badania symulacyjne wykonano dla siedmiu wartości prędkości ruchu pojazdu V : 20, 30, 40, 50, 60, 70 i 80 km/h. Prędkość pojazdu v [m/s] występująca we wzorach (2) i (3) jest związana z V [km/h] ogólnie znaną zależnością ($v = V / 3,6$).

Założono, że w chwili rozpoczęcia testu samochód porusza się ruchem prostoliniowym ze stałą prędkością V , torem równoległym do osi Ox układu związanego z drogą (rys. 4), przecinającym środek części ruchomej „płyty dynamicznej”. Przyjęto typowy test „otwarty” a więc bez sprzężenia zwrotnego w układzie sterowania kierowca-pojazd-otoczenie-kierowca [9]. W trakcie testu kierowca nie reaguje, czyli nie zmienia kąta obrotu kierownicy, położenia „pedału gazu”, nie naciska na pedał hamulca ani sprzęgła. Układy asystenckie (EBS, ASR i ESP) są wyłączone, co często ma miejsce w trakcie szkolenia kierowców na wyższym (niż podstawowy) poziomie.

6. Przykładowe wyniki symulacji w dziedzinie czasu

Rysunki 5, 6 i 7 przedstawiają wyniki obliczeń symulacyjnych wybranych wielkości w funkcji czasu dla prędkości pojazdu $V = 60$ km/h. Skalę czasu zmieniono tak, aby $t = 0$ odpowiadało chwili, gdy koła przednie opuszczają „płytę dynamiczną” (koła tylne, dla parametrów badanego pojazdu i płyty, znajdują się na płycie); rozpoczyna się wtedy ruch poprzeczny płyty.

Na rysunku 5 przedstawiono następujące wielkości:

- przemieszczenie poprzeczne środka masy pojazdu y_{Oc} (na rysunku: „yOC”);
- kąt odchylenia (kąt kierunkowy) pojazdu ψ_C (na rysunku: „psiC”);
- prędkość kątową odchylenia d_{ψ_C}/dt (na rysunku: „psiCp”);

- przyspieszenie poprzeczne pojazdu $a_{\eta h}$ (na rysunku: „actah”).

a na rys. 6:

- moment na kole kierownicy EMK;
- sumę sił poprzecznych kół tylnych F_{boczt} (na rysunku: „Fboczt”);
- niezbędną moc efektywną urządzeń wzbudzających wymuszenie na „płycie dynamicznej” P_{boczt} (na rysunku: „Pboczt”) – jest ona obliczana jako iloczyn F_{boczt} i prędkości płyty v_{yp} ;
- wskaźnik kontaktu k -tego koła ($k = 1, \dots, 4$) z płytą (wskaźnik obecności k -tego koła na „płycie dynamicznej”) $INAP(k)$ (0 – gdy koło k nie przebywa na płycie, 1 – gdy się na niej znajduje).

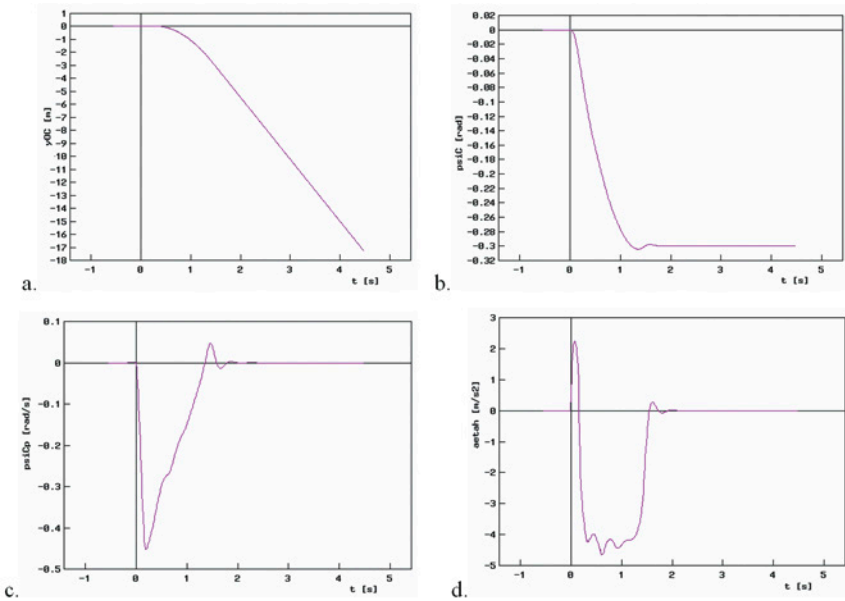
Na rys. 7 przedstawiono przebiegi czasowe reakcji normalnych kół jezdnych N_k (na rysunku $ENC(k)$) k -tego koła ($k=1,\dots,4$).

Kierowca odczuwa zaburzenie ruchu pojazdu przede wszystkim poprzez następujące wielkości:

- przyspieszenie poprzeczne pojazdu $a_{\eta h}$ i prędkość kątową odchylenia $d_{\psi C}/dt$ (określają one siłę bezwładności działającą na ciało kierowcy, odbieraną układem równowagi ucha wewnętrznego i receptorami czuciowymi kończyn i tułowia);
- przemieszczenie poprzeczne środka masy pojazdu y_{Oc} i kąt odchylenia ψ_C (kąt kierunkowy) odbierane wzrokiem;
- moment na kole kierownicy EMK odbierany przez ręce (ściślej: receptory czuciowe kończyn górnych).

To przebiegi czasowe i ekstrema tych wielkości mają decydujący wpływ na reakcje kierującego pojazdem.

Przedstawione na rys. 5 i 6 wyniki wskazują na duże znaczenie zastosowanego zaburzenia ruchu w postaci przemieszczenia poprzecznego „płyty dynamicznej”. W ciągu czterech sekund po wystąpieniu zaburzenia przemieszczenie poprzeczne pojazdu przekracza (podawane są moduły obserwowanych wartości) ponad 15 m, kąt odchylenia stabilizuje się na poziomie ponad 0,3 rad, prędkość kątowa odchylenia osiąga ekstremum na poziomie 0,45 rad/s a przyspieszenia poprzeczne 4,5 m/s². Moment na kole kierownicy (obliczany na podstawie momentów stabilizacyjnych kół jezdnych oraz przełożeń układu zwrotniczego i przekładni kierowniczej, a więc bez uwzględnienia efektu działania wspomaganie) przekracza 10 Nm. Wymagana moc efektywna urządzeń wzbudzających wymuszenie na „płycie dynamicznej” dochodzi do wartości około 5500 W. Następuje znaczne zróżnicowanie reakcji normalnych drogi (rys. 7). Wyniki te wskazują na duży wpływ zastosowanego zaburzenia na ruch, dynamikę samochodu, w którym znajduje się badany, szkolony kierowca.



Rys. 5. Wyniki obliczeń symulacyjnych wybranych wielkości w funkcji czasu. $V = 60 \text{ km/h}$:
a - przemieszczenie poprzeczne środka masy pojazdu y_{Oc} (na rysunku: yOC);
b - kąt odchylenia (kąt kierunkowy) pojazdu ψ_C (na rysunku: $psiC$);
c - prędkość kątowna odchylenia $d_{\psi C}/dt$ (na rysunku: $psiCp$);
d - przyspieszenie poprzeczna pojazdu $a_{\eta h}$ (na rysunku: $aetaH$)

7. Przyjęte kryteria wyboru prędkości pojazdu w teście zaburzenia ruchu na „płycie dynamicznej”

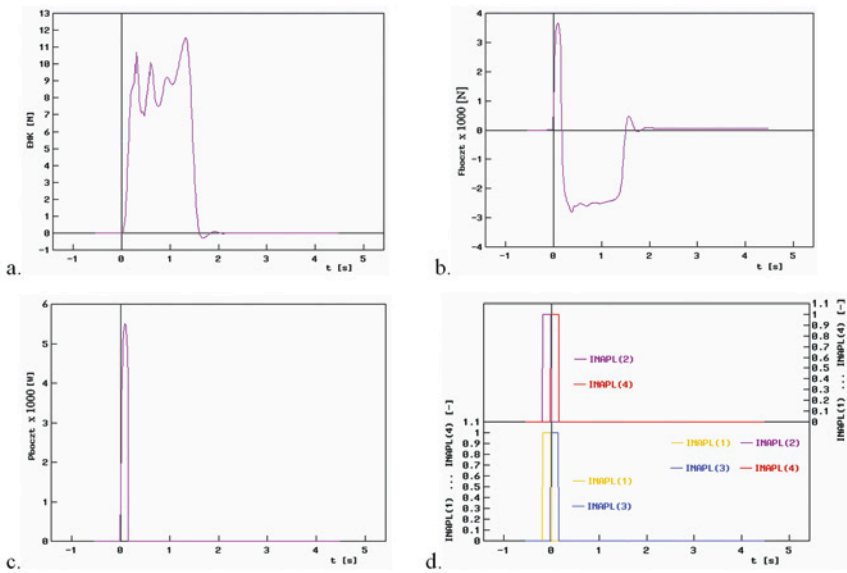
W celu wyboru prędkości pojazdu w trakcie testu zaburzenia ruchu na „płycie dynamicznej” przyjęto dziewięć kryteriów oceny. Przedstawiono je poniżej.

Kryterium 1: moduł ekstremum przemieszczenia poprzecznego środka masy pojazdu y_{Oc} [m] (na rysunku: ekstremum yOC) w trakcie pierwszej sekundy od wystąpienia zaburzenia.

Kryterium 2: moduł ekstremum kąta odchylenia bryły nadwozia ψ_C [rad] (na rysunku: ekstremum $psiC$) w trakcie pierwszej sekundy od wystąpienia zaburzenia.

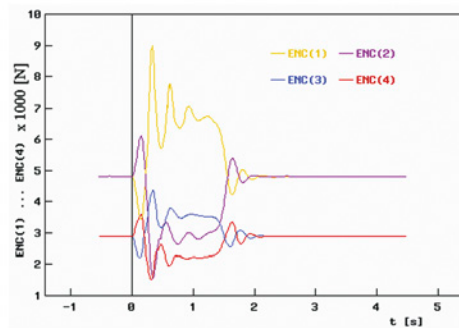
Kryterium 3: moduł ekstremum prędkości kątowej odchylenia bryły nadwozia $d_{\psi C}/dt$ [rad/s] (na rysunku: ekstremum $psiCp$) w trakcie pierwszej sekundy od wystąpienia zaburzenia.

Kryterium 4: moduł ekstremum przyspieszenia poprzecznego środka masy pojazdu $a_{\eta h}$ [m/s²] (na rysunku: ekstremum $aetaH$) w trakcie pierwszej sekundy od wystąpienia zaburzenia.



Rys. 6. Wyniki obliczeń symulacyjnych wybranych wielkości w funkcji czasu. $V = 60 \text{ km/h}$.

- a - moment na kole kierownicy EMK;
- b - suma sił poprzecznych kół tylnych F_{boczt} (na rysunku: F_{boczt});
- c - moc związana z sumą sił poprzecznych kół tylnych P_{boczt} (na rysunku: P_{boczt});
- d - wskaźnik obecności k-tego koła na „płyty dynamicznej” $INAP(k)$



Rys. 7. Wyniki obliczeń symulacyjnych w funkcji czasu. $V = 60 \text{ km/h}$.

Reakcje normalne kół jezdnych N_{Ck} (na rysunku oznaczono $ENC(k)$) k-tego koła ($k=1, \dots, 4$; 1 - koło lewe przednie, 2 - koło prawe przednie, 3 - koło lewe tylne, 4 - koło prawe tylne)

Kryterium 5: moduł ekstremum momentu na kole kierownicy EMK [Nm] (na rysunku: ekstremum EMK) w trakcie pierwszej sekundy od wystąpienia zaburzenia.

Kryterium 6: moduł ekstremum sumy sił poprzecznych na kołach tylnych F_{boczt} [N] (na rysunku: ekstremum F_{boczt}) w trakcie pierwszej sekundy od wystąpienia zaburzenia.

Kryterium 7: moduł ekstremum mocy oporów (sił poprzecznych P_{boczt}) na powierzchni płyty przesuwnej F_{boczt} [W] (wymagana moc efektywna urządzeń wzbudzających wymuszenie na „płyce dynamicznej”) (na rysunku: ekstremum P_{boczt}) w trakcie pierwszej sekundy od wystąpienia zaburzenia.

Kryterium 8: czas kontaktu kół tylnych z płytą (czyli przebywania kół tylnych na „płyce przesuwnej”) [s]; dla koła lewego / prawego.

Kryterium 9: czas przebywania kół tylnych na „płyce przesuwnej”, gdy płyta wykonuje ruch poprzeczny [s]; dla koła lewego / prawego.

W kryteriach 1-7 uwzględniano moduł wartości ekstremalnej w trakcie pierwszej sekundy od wystąpienia zaburzenia. Przyjęto, że w typowym czasie reakcji kierowcy równym 1 s [1] nie może on wykonać żadnych czynności (działań na elementach sterowania pojazdem), które mogłyby zmienić stan ruchu pojazdu. Dopiero w kolejnych sekundach (czego nie przedstawiają wykonane testy symulacyjne) jego reakcje wpływają na ruch pojazdu, co jest podstawą oceny kierującego w przeprowadzanym badaniach, szkoleniach.

8. Wyniki obliczeń prowadzących do wyboru prędkości pojazdu w teście zaburzenia ruchu na „płyce dynamicznej”

Rys. 8 i 9 przedstawiają wyniki obliczeń symulacyjnych wielkości wykorzystywanych w kryteriach 1-9. W kryteriach 1-6 im większy jest moduł badanych wielkości: γ_{Oc} , Ψ_C , $d_{\Psi C}/dt$, $a_{\eta h}$, EMK i F_{boczt} tym lepsza jest ocena układu zakłócającego i prędkości ruchu pojazdu.

W kryterium 7 im mniejszy jest moduł P_{boczt} tym mniejsze są wymagania dla układu zakłócającego, jego zespołu napędowego.

W kryterium 9 istotnym jest aby czas przebywania kół tylnych na „płyce dynamicznej” był zbliżony do czasu przemieszczania się tej płyty. Duże prędkości ruchu pojazdu zmniejszają ten czas poniżej wartości t_{yp} (w przypadku badanego rozwiązania „płyty dynamicznej” $t_{yp} = 0,2$ s), gdyż jest on zdeterminowane rozstawem osi jezdnych pojazdu ($l = 2,655$ m).

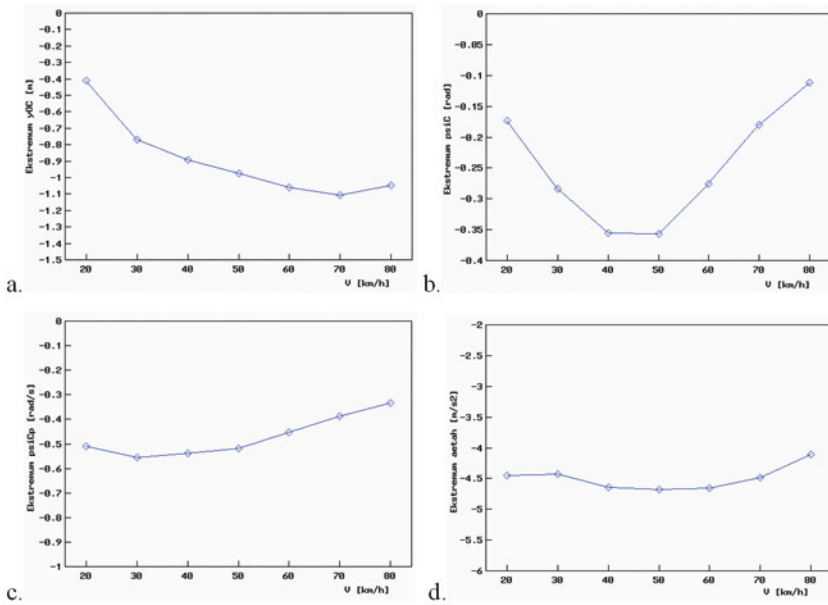
Obserwując wyniki przedstawione na rys. 8 i 9, wyznaczono preferowane zakresy prędkości ze względu na wymienione kryteria oceny.

Dla kolejnych kryteriów oceny są to przedstawione poniżej zakresy prędkości.

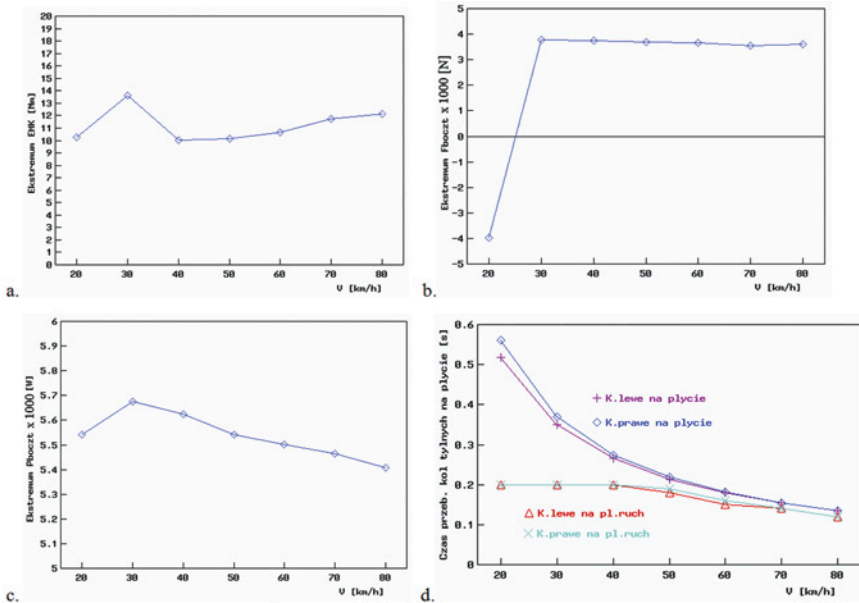
Kryterium 1: <50, 80km/h>.

Kryterium 2: <40, 50km/h>.

Kryterium 3: <20, 50km/h>.



Rys. 8. Wyniki obliczeń symulacyjnych wielkości wykorzystywanych w kryteriach: a – kryterium 1; b – kryterium 2; c – kryterium 3; d – kryterium 4



Rys. 9. Wyniki obliczeń symulacyjnych wielkości wykorzystywanych w kryteriach: a – kryterium 5; b – kryterium 6; c – kryterium 7; d – kryterium 8 i 9

Kryterium 4: <40, 60km/h>.

Kryterium 5: <20, 80km/h>.

Kryterium 6: <20, 80km/h>.

Kryterium 7: <20km/h> plus <50, 80km/h>.

Kryterium 8: <20, 50km/h> (gdyż w tym przedziale wielkość kryterialna jest $\geq 0,2s$).

Kryterium 9: <20, 40km/h> (gdyż w tym przedziale wielkość kryterialna jest równa $0,2s$).

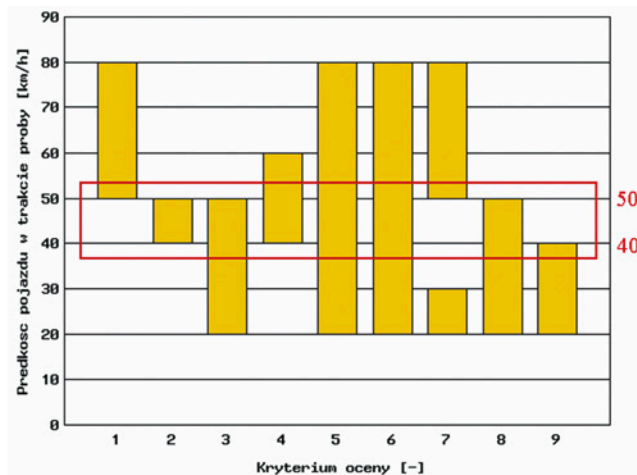
Łącząc wymienione oceny, poszukując ich części w jak największym stopniu wspólnej, **otrzymano zakres prędkości <40, 50 km/h>**, gdyż dla niego co najwyżej dwa kryteria nie są spełnione (kryterium 1 i 7 dla 40 km/h; kryterium 9 dla 50 km/h).

Wynik tej oceny można także przedstawić w postaci tabelarycznej. Tabela 1 przedstawia preferencje osoby oceniającej (tutaj: autora pracy). Stanowi zobrazowanie wyniku procesu poszukiwania zakresu prędkości ruchu pojazdu, spełniającego w jak najwyższym stopniu przyjęte kryteria oceny. Liczbę 0 (zero) przypisano wartości prędkości pojazdu, dla której nie uzyskano w danym kryterium zadowalających wartości badanych wielkości, zaś liczbę 1 (jeden) dla wielkości spełniającej oczekiwania osoby oceniającej. W ostatnim rzędzie tabeli („ocena”) zsumowano wyniki oceny dla każdego z kryteriów. Najwyższe sumy oceny dotyczą wspomnianych wyżej prędkości 40 i 50 km/h.

Tabela 1. Tabela preferencji osoby oceniającej (autora pracy)

Kryterium oceny	Prędkość samochodu w trakcie próby V [km/h]						
	20	30	40	50	60	70	80
1	0	0	0	1	1	1	1
2	0	0	1	1	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	0
4	0	0	1	1	1	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1
7	1	0	0	1	1	1	1
8	1	1	1	1	0	0	0
9	1	1	1	0	0	0	0
Ocena:	6	5	7	8	5	4	4

Rys. 10 obrazuje wynik przedstawionego procesu poszukiwania zakresu prędkości ruchu pojazdu, spełniającego w jak najwyższym stopniu przyjęte kryteria oceny.



Rys. 10. Zobrazowanie wyniku poszukiwania zakresu prędkości ruchu pojazdu spełniającego w jak najwyższym stopniu przyjęte kryteria oceny

9. Podsumowanie

Wykonywane w ośrodkach doskonalenia techniki jazdy, testy, w których przed wjazdem na płytę o obniżonej przyczepności zaburza się ruch pojazdu za pomocą „płyty dynamicznej”, zmuszają kierowcę do wykonania manewrów obronnych. W artykule przedstawiono model ruchu, dynamiki samochodu oraz sposób wprowadzenia opisanego zaburzenia. Zaprezentowano wyniki symulacji obrazujące skalę zaburzenia ruchu pojazdu, na które musi zareagować szkolony kierowca. Przedstawiono metodykę i wyniki wyboru prędkości ruchu pojazdu w trakcie testu.

Przeprowadzone symulacje z użyciem zaawansowanego, zweryfikowanego eksperymentalnie modelu matematycznego ruchu samochodu osobowego umożliwiają określenie kluczowych parametrów konstrukcji „płyty dynamicznej”, takich jak wymagana siła wymuszająca zakłócenie ruchu pojazdu i moc efektywna zespołu generującego szarpnięcie płyty a także wyznaczenie optymalnej prędkości ruchu badanego pojazdu w trakcie testu, w zależności od przyjętego kryterium oceny. Oceniane jest zachowanie tylko pojazdu, bez udziału wpływającego na niego kierowcy. Wartość użyteczna wyników odnosi się więc do okresu, który odpowiada czasowi reakcji prowadzącego pojazd.

Informacja

Wykorzystywany w pracy model symulacyjny ruchu samochodu osobowego powstał jako efekt projektu Nr O ROB 0011 01/ID/11/1 *Symulator kierowania pojazdami uprzywilejowanymi podczas działań typowych i ekstremalnych*, dotyczącego budowy symulatora kierowania pojazdami uprzywilejowanymi przez firmę ETC-PZL AI z Warszawy.

Literatura

- [1] Arczyński, S.: *Mechanika ruchu samochodu*. WNT. Warszawa 1993 r.
- [2] Bosch. *Automotive handbook*. Robert Bosch GmbH. SAE International. 3rd-8th edition, 1993 - 2011.
- [3] Bosch. Praca zbiorowa. *Układ stabilizacji toru jazdy ESP*. WKŁ. Warszawa 2000 r. ISBN 83-206-1365-5.
- [4] Dugoff H., Fancher P.S., Segel L., *An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance*. SAE Technical Paper 700377.
- [5] Fancher P.S. Jr., Bareket Z., *Including roadway and tread factors in semi-empirical model of truck tyres*. Supplement to Vehicle System Dynamics, Vol. 21 (1993), pp. 92-107.
- [6] Gutowski R., *Mechanika analityczna*. PWN. Warszawa 1971 r.
- [7] Kamiński E., Pokorski J., *Teoria samochodu. Dynamika zawiesznień i układów napędowych pojazdów samochodowych*. WKŁ. Warszawa 1983 r.
- [8] Lozia Z., *Symulatory jazdy samochodem*. WKŁ Warszawa 2008. ISBN: 978-83-206-1663-7.
- [9] Lozia Z., *Analiza ruchu samochodu dwuosowego na tle modelowania jego dynamiki*. Monografia. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport. Zeszyt 41. Warszawa 1998 r.
- [10] Lozia Z., *Modele symulacyjne ruchu i dynamiki dwóch pojazdów uprzywilejowanych*. Czasopismo Techniczne, zeszyt 8, rok 109. Mechanika, zeszyt 3-M/2012. Str. 19-34.
- [11] Maryniak J., *Dynamiczna teoria obiektów ruchomych*. Politechnika Warszawska. Prace Naukowe. Mechanika. Nr 32. WPW. Warszawa 1976 r.
- [12] Rozporządzeniu Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 16 stycznia 2013r. w sprawie doskonalenia techniki jazdy. Dziennik Ustaw RP. Warszawa, dnia 18 stycznia 2013 r. Poz. 91.
- [13] http://www.hytronics.at/index.php?option=com_content&view=article&id=11&Itemid=52&lang=en (Dostęp 15.05.2015 r.).
- [14] <http://www.kia-forums.com/kia-ceed-forum/65944-problems-watch-out-potential-new-kia-2.html> (Dostęp: 03.04.2015 r.).
- [15] <http://odtj.lublin.pl/osrodek.html> (Dostęp 15.05.2015 r.).
- [16] <http://www.szc-zasada.pl/odtj-bednary/tor-szc> (Dostęp 15.05.2015 r.).
- [17] <http://www.unimetal.pl/pl/diagnostyka/oferta/andere-gerate/plyta-dynamiczna/> (Dostęp 09.05.2015 r.).