

**Leon PROCHOWSKI**

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

**Stanisław KOZIOŁ**

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

## **ZAGROŻENIA W RUCHU POJAZDÓW Z WYSOKO POŁOŻONYM ŚRODKIEM MASY**

### **Słowa kluczowe**

Transport, samochody specjalne, bezpieczeństwo ruchu, stateczność pojazdu.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono analizę procesów dynamicznych zachodzących podczas ruchu pojazdów, które mogą być przyczyną niebezpiecznych zdarzeń drogowych. Procesy te występują powszechnie podczas eksploatacji samochodów, a związane z nimi niebezpieczeństwo wynika między innymi z wysokiego położenia środka masy pojazdu. Dotyczy to w szczególności samochodów specjalnych wykorzystywanych przez służby ratownicze.

### **Wprowadzenie**

Pojazdy straży pożarnej, jako głównej służby ratowniczej powinny wypełniać swoje zadania w czasie różnorodnych zdarzeń, sytuacji niebezpiecznych czy klęsk żywiołowych. Zatem powinny wykazywać bardzo dobre właściwości ruchowe nie tylko na drogach dobrej jakości, ale także drogach zniszczonych lub zalanych wodą oraz bezpiecznie pokonywać niektóre przeszkody terenowe i drogowe.

Zadania wykonywane przez pojazdy służb ratowniczych i gaśniczych wskazują zakres wymagań względem ich konstrukcji i eksploatacji. Sprecyzowanie

zadań stanowi podstawę do określenia tych wymagań, wśród których można wydzielić:

- wymagania ogólne względem konstrukcji samochodu,
- wymagania szczegółowe, skierowane przede wszystkim do wyposażenia tych pojazdów.

Wśród ważnych wymagań jest możliwość osiągnięcia dużych przyspieszeń i prędkości jazdy oraz wyższe niż przeciętne wartości prześwitu, dopuszczalnego przechyłu, zwrotności, a także mniejszy niż przeciętnie minimalny promień skrętu czy szerokość korytarza w ruchu krzywoliniowym i podczas zawracania w ograniczonej przestrzeni [1–3].



Rys. 1. Samochód ratowniczo-gaśniczy i samochód z drabiną

Do grupy pojazdów stanowiących główne wyposażenie służb ratowniczych należą samochody ratowniczo-gaśnicze, ratownictwa technicznego, drabiny automatyczne i podnośniki pożarnicze. Pojazdy te, ze względu na konstrukcję i wyposażenie, często charakteryzują się wysoko położonym środkiem masy. Są one budowane na bazie samochodów ciężarowych poprzez dodanie specjalnego nadwozia i różnego rodzaju wyposażenia, co często wiąże się ze znacznym pod-

niesieniem środka masy. Warto tu wymienić: zbiornik wody o pojemności do 7m<sup>3</sup>, pompę pożarniczą, sprzęt gaśniczy, narzędzia ratownictwa technicznego, urządzenia ratownictwa wysokościowego, takie jak drabiny automatyczne czy podnośniki z osprzętem hydraulicznym i sterującym. Rysunek 1 przedstawia przykłady pojazdów specjalnych, wykorzystywanych przez straż pożarną.

W Polsce działa kilka firm zajmujących się zabudową nadwozi pojazdów specjalnych przeznaczonych dla służb ratowniczych. Ze względu na ograniczony rynek i ograniczony potencjał firm produkcja ta ma charakter małoseryjny lub wręcz jednostkowy. Trudno z tak małej liczby bardzo kosztownych pojazdów wydzielić kilka z nich do badań w niebezpiecznych sytuacjach drogowych, prowadzonych w warunkach rzeczywistych, które w przypadku pojazdów produkowanych wielkoseryjnie są podstawą oceny ich bezpieczeństwa.

W artykule opisano zagadnienia, których dalsze rozwijanie powinno prowadzić do programowania badań dynamicznych w zakresie bezpieczeństwa użytkowania samochodów specjalnych, a następnie wyznaczania istotnych właściwości tych pojazdów. Celowe jest zatem sklasyfikowanie sytuacji niebezpiecznych występujących podczas ruchu pojazdów specjalnych, charakteryzujących się wysoko położonym środkiem masy, dobranie odpowiednich metod testowania ich bezpieczeństwa oraz utworzenie odpowiedniej bazy badawczej w instytucji dopuszczającej takie pojazdy do użytkowania.

Podczas ruchu prostoliniowego i krzywoliniowego pojazdów kołowych występują procesy, które mogą stanowić przyczynę lub źródło zagrożenia bezpieczeństwa dla załogi oraz ruchu drogowego. Złożony, nieprzewidywalny i niepowtarzalny w ogólności charakter działań ratowniczych powoduje, że trudno usystematyzować rozważane zagrożenia w kolejności ich wagi, znaczenia lub prawdopodobieństwa wystąpienia. Biorąc pod uwagę zadania wykonywane przez pojazdy ratownicze, szczególnie pojazdy z wysoko położonym środkiem masy, analizie poddano następujące procesy dynamiczne związane z ruchem samochodów [3, 4, 5]:

- hamowanie i możliwość zarzucenia pojazdu,
- jazda na łuku drogi,
- pokonywanie skarp o dużym nachyleniu, rowów i nasypów oraz innych znacznych nierówności terenowych,
- omijanie nagle pojawiających się przeszkód w ruchu drogowym lub zmiana pasa ruchu,
- oddziaływanie wiatru bocznego na samochody o dużej powierzchni bocznej.

W każdej z wymienionych sytuacji drogowych wysokie położenie środka masy stwarza zagrożenia prowadzące do utraty stateczności (stabilności) ruchu, powodując zarzucenie lub wywrócenie pojazdu.

## 1. Hamowanie i możliwe zagrożenia związane z wysokim położeniem środka masy

Wysokość położenia środka masy wpływa na dynamikę procesu zmian nacisków kół na drogę podczas hamowania. Im wyżej jest położony środek masy, tym większe jest odciążenie kół tylnych podczas hamowania, co sprzyja wyczerpaniu przyczepności kół do drogi. Zatem podczas hamowania z tego powodu dysponujemy mniejszą (niż w innych pojazdach) możliwością wytworzenia reakcji stycznych bocznych i już niewielka siła boczna spowodować może utratę stateczności podczas hamowania. Z kolei zwykle występujący w pojazdach niesymetryczny rozkład masy (naciski kół lewej i prawej strony pojazdu nie są równe) podczas hamowania w prostoliniowym ruchu pojazdu stwarza zagrożenie zarzucania samochodu przy wysokim położeniu środka masy.

Podczas hamowania w takiej sytuacji linie działania siły bezwładności (w środku masy) i wypadkowej siły hamowania kół będą oddalone od siebie o wielkość  $e$  (rys. 2). Moment powstający podczas hamowania:

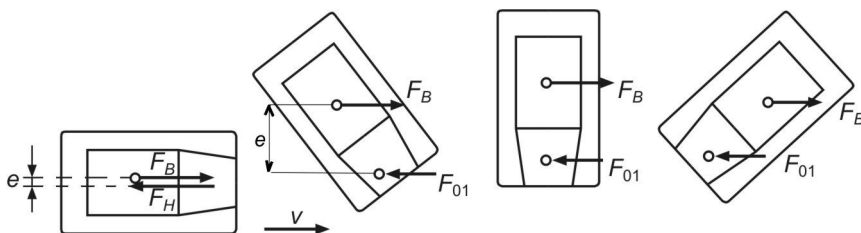
$$M_0 = F_B e \cong F_H e \quad \text{bo} \quad F_H \cong F_B \quad (1.1)$$

gdzie:  $M_0$  – moment obracający pojazd,

$F_B$  – siła bezwładności w środku masy pojazdu,

$F_H$  – wypadkowa sił hamowania na kołach pojazdu,

będzie dążył do obrócenia pojazdu.



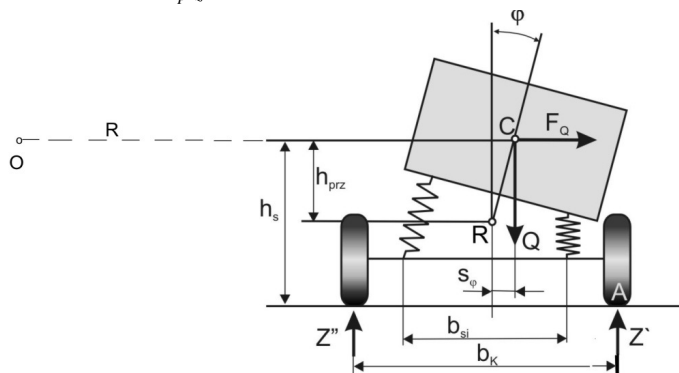
Rys. 2. Zarzucenie osi kół tylnych podczas hamowania

Obrotowi temu powinny przeciwdziałać reakcje styczne boczne na kołach hamowanych, ale przy wysokim położeniu środka masy ich wartości mogą być zbyt małe.

## 2. Jazda na łuku drogi

Podczas jazdy na łuku drogi siły boczne działające na pojazd mogą spowodować jego zarzucenie lub wywrócenie. Możliwość uniknięcia tych niebezpiecznych sytuacji zależy od właściwości samochodu i umiejętności kierowcy.

Analiza procesów zachodzących w ruchu krzywoliniowym i sił działających na pojazd pozwala wyznaczyć m.in. wartość prędkości, której nie należy przekraczać podczas jazdy na łuku o promieniu  $R$ . Na rys. 3 pokazano układ sił działających na pojazd poruszający się na łuku drogi. Proces jego wywracania zależy od wielu parametrów, m.in. od wysokości położenia środka masy  $h_s$  i osi przechyłu poprzecznego  $h_{prz}$  oraz charakterystyki sztywności zawieszenia [5].



Rys. 3. Siły działające na pojazd na łuku drogi

Proces wywracania się pojazdu pod działaniem siły  $F_Q$  jest sygnalizowany zbliżaniem się do zera wartości reakcji normalnych  $Z_1''$  i  $Z_2''$  na kołach wewnętrznych (przednim i tylnym) do łuku drogi. Zatem:

$$Z_1'' + Z_2'' = Z'' \rightarrow 0 \quad (1.2)$$

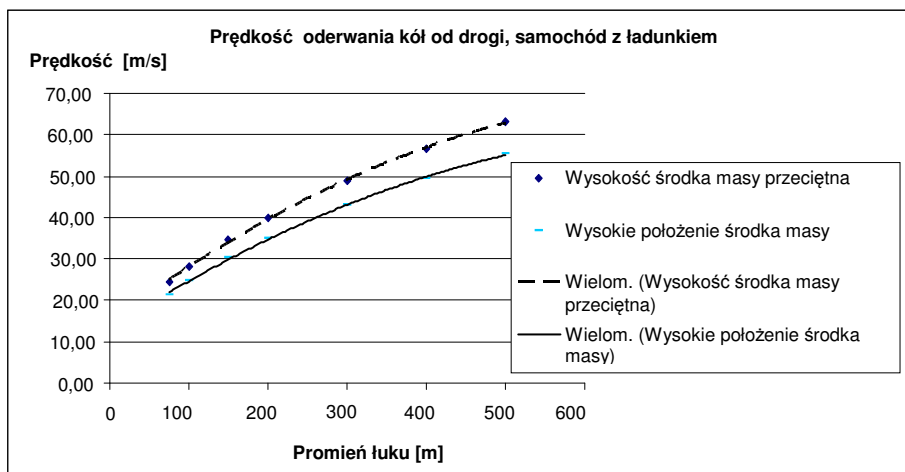
gdzie  $Z_1''$  i  $Z_2''$  są reakcjami normalnymi na kołach samochodu.

Wywrócenie pojazdu może nastąpić po uprzednim zarzuceniu, w trakcie procesu zarzucania samochodu, ale także bez wcześniejszego wystąpienia zarzucenia. Wartość maksymalna prędkości jazdy, której przekroczenie może spowodować oderwanie kół jednej strony pojazdu od drogi podczas jazdy na łuku wynosi:

$$v_{MAX} = \sqrt{\frac{b_K g R}{2h_S}} \quad (1.3)$$

gdzie  $b_K$  i  $h_S$  oznaczają rozstaw kół i wysokość położenia środka masy, a  $R$  jest promieniem łuku drogi.

Wartość prędkości jazdy, przy której może rozpocząć się proces wywracania samochodu jest zależna od wysokości położenia środka masy pojazdu, co pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Zależność prędkości początku wywracania od wysokości położenia środka masy pojazdu; wyniki obliczeń symulacyjnych (program PC Crash) z uwzględnieniem elastyczności zawieszenia samochodu o masie ok. 18 000 kg

Proces wywracania się pojazdu na łuku drogi zwykle obejmuje kilka etapów, wśród których wyróżnić można:

- oderwanie kół od drogi (po jednej stronie pojazdu);
- dalsze narastanie przechyłu nadwozia (wraz ze wzrostem siły bocznej) do osiągnięcia stanu równowagi chwiejnej (nietrwałej [6]), w którym środek masy pojazdu znajduje się w najwyższym położeniu;
- przekroczenie stanu równowagi chwiejnej i dalsze narastanie przechyłu aż do położenia pojazdu na boku lub dachu.

Wartość  $v_{MAX}$  zależy od cech konstrukcyjnych pojazdu ( $b_K, h_S$ ) i ułożenia ładunku. Stałym dążeniem konstruktorów jest utrzymanie relacji, w której prędkość wystąpienia zarzucania (przypadek ruchu swobodnego na łuku drogi):

$$v \rightarrow v_{GR} = \sqrt{\mu g R} \quad (1.4)$$

gdzie  $\mu$  jest wartością współczynnika przyczepności,

spełnia relację:

$$v_{MAX} > v_{GR}.$$

Z tych podstawowych zależności wynika ważny warunek konstrukcyjny dla samochodów:

$$\frac{b_K}{2h_s} > \mu \quad (1.5)$$

Warunek ten istotnie zależy od wysokości położenia środka masy pojazdu.

Spełnienie warunku (1.5) na drogach o wysokiej przyczepności zapewnia pewien margines bezpieczeństwa podczas użytkowania samochodu. Wynika to z faktu, że przy zwiększaniu prędkości jazdy  $v$  lub zmniejszaniu promienia skrętu (zacieśnianie skrętu) pojazd na łuku drogi swoim zachowaniem „sygnalizować będzie” (przez pojawienie się zarzucania) zbliżające się niebezpieczeństwo wywrócenia.

Przyczyną wywrócenia się pojazdu na łuku drogi może być nie tylko działanie sił odśrodkowych, ale także napór wiatru bocznego, uderzenie boczne (kolizja) lub oddziaływanie niesymetrycznie rozłożonych nierówności o znacznej wysokości [6].

### 3. Pokonywanie przeszkód drogowych o dużym nachyleniu

Pokonywanie skarp o dużym nachyleniu, rowów i nasypów oraz innych nierówności o znacznym nachyleniu może spowodować utratę stateczności podłużnej lub poprzecznej.

Przyjmując, że ruch odbywa się w warunkach dostatecznej siły przyczepności kół do drogi, ogólny warunek stateczności dla pojazdu dwuosiowego (który może być rozszerzony na pojazdy wieloosiowe) można odnieść do reakcji normalnych na kołach jezdnych, a mianowicie:

- utrata stateczności podłużnej pojazdu zachodzi po oderwaniu się kół osi przedniej lub tylnej od drogi:

$$Z_1 = 0 \quad \text{lub} \quad Z_2 = 0 \quad (1.6)$$

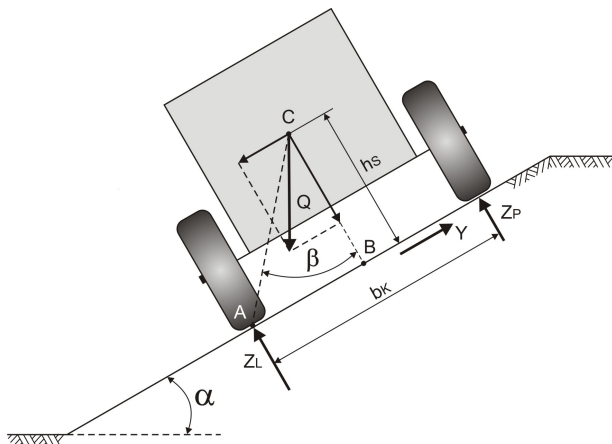
- utrata kontaktu z drogą kół lewej lub prawej strony pojazdu może doprowadzić do jego bocznego wywrócenia (utrata stateczności poprzecznej):

$$Z_L = 0 \quad \text{lub} \quad Z_P = 0 \quad (1.7)$$

gdzie:  $Z_L$  i  $Z_P$  są reakcjami normalnymi od drogi na koła po lewej lub prawej stronie samochodu.

Problem ma istotne znaczenie dla samochodów z wysoko położonym środkiem masy. Na przebieg procesu utraty stateczności tych pojazdów znaczący

wpływ mają siły bezwładności, uciążu oraz siły aerodynamiczne (wiatr boczny). Niebezpieczeństwo bocznego wywrócenia podczas jazdy samochodu po zboczu, skarpie lub nasypie o znacznym nachyleniu pokazuje rysunek 5. W ruchu prostoliniowym decydujące znaczenie ma oddziaływanie składowej siły ciężkości w środku masy pojazdu na tzw. ramieniu wywrotu, czyli wysokości  $h_s$ . Rysunek pokazuje układ sił oraz położenie linii przechodzącej przez punkt A styku z podłożem kół jezdnych niżej położonych, czyli tzw. linii wywrotu [5, 6].



Rys. 5. Ruch pojazdu przy znacznym nachyleniu poprzecznym podłoża

#### 4. Omijanie nagle pojawiających się przeszkód w ruchu drogowym

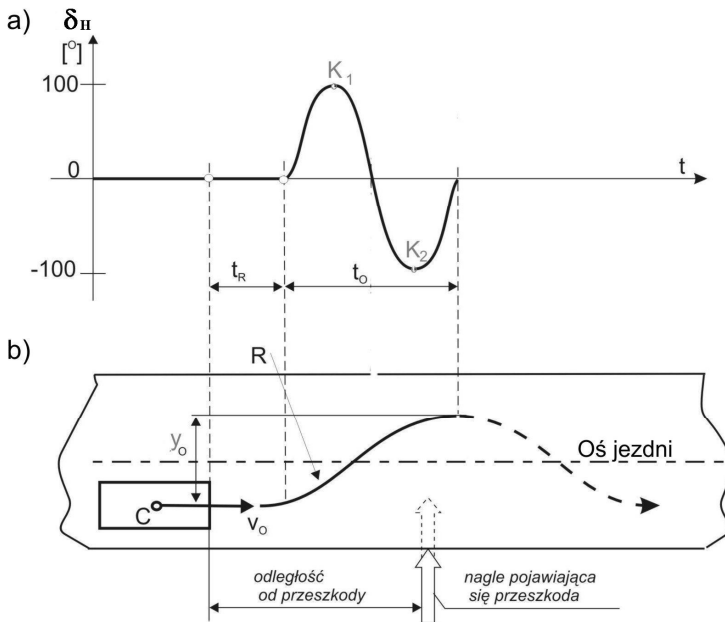
Manewr ominięcia nagle pojawiającej się przeszkody jest tym trudniejszy do bezpiecznego wykonania, im wyżej jest położony środek masy pojazdu. Trudności z wykonaniem takiego manewru wynikają z faktu, że wartość promienia toru ruchu  $R$  ulega ciągłym zmianom w czasie jego wykonywania (rys. 6).

W przykładowej sytuacji pokazanej na rysunku 6 odległość do pojawiającej się na pasie drogowym przeszkody może być krótsza niż długość drogi zatrzymania samochodu. Zatem konieczne jest jej ominięcie, a skuteczne hamowanie w ruchu omijania nie zawsze jest stabilnym procesem. Zatem kierowca wykonuje szybki obrót koła kierownicy, stosownie do zakresu koniecznej zmiany toru jazdy. Wówczas samochód z ruchu prostoliniowego przechodzi do krzywoliniowego, po łuku o zmiennym promieniu  $R$ . Pojawia się przyspieszenie dośrodkowe:

$$a_c = \frac{v^2}{R} \quad (1.8)$$

gdzie  $v$  jest prędkością jazdy, które jest źródłem znacznej siły bezwładności.





Rys. 6. Manewr omijania przeszkody; a – przebieg zmian kąta obrotu koła kierownicy, b – tor ruchu środka masy pojazdu

Na rysunku 6 czas  $t_R$  jest czasem reakcji kierowcy,  $v_o$  jest prędkością początkową manewru,  $\delta_H$  jest kątem obrotu koła kierownicy, a  $R$  jest zmiennym promieniem krzywizny toru jazdy samochodu.

Gwałtownie wykonywany manewr omijania przeszkody doprowadzić może do zarzucenia lub wywrócenia pojazdu. Wysoko położony środek masy powoduje, że wartości prędkości jazdy, przy której manewr ten można wykonać bezpiecznie stają się niskie. Na nawierzchniach o obniżonej przyczepności zagrożeniem jest niebezpieczeństwo zarzucenia. Na nawierzchniach o dobrej przyczepności, ale także na podłożach odkształcalnych i nierównych wykonywanie gwałtownego manewru omijania może doprowadzić do wywrócenia samochodu. Identyczne rozważania można odnieść do manewru gwałtownej zmiany pasa ruchu

## 5. Oddziaływanie wiatru bocznego

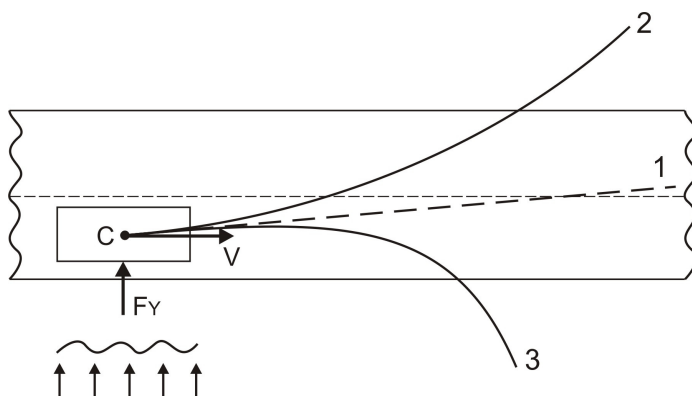
Oddziaływanie wiatru bocznego na samochody o dużej powierzchni bocznej (zwykle wysoko położony środek masy jest połączony ze znaczną powierzchnią boczną pojazdu) stwarza zagrożenie naruszenia stateczności ruchu (nadsterowność spowodowana działaniem naporu wiatru bocznego) i może doprowadzić do zarzucenia lub wywrócenia pojazdu.

Skutkiem działania siły bocznej na ogumienie koła jezdnego jest jego znośnienie. Zatem oddziaływanie siły bocznej na samochód (napór wiatru itp.) spowoduje zmianę toru ruchu pojazdu.

Rozpatrując zachowanie się samochodu w ruchu prostoliniowym przy zadziałaniu siły bocznej, należy podkreślić, że wówczas samochód przechodzi samoczynnie do ruchu krzywoliniowego, a jego tor ruchu opisuje promień obliczany z przybliżonej zależności:

$$R \cong \frac{L}{\operatorname{tg} \delta + (\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (1.9)$$

gdzie:  $R$  jest chwilowym promieniem toru jazdy,  $\delta$  jest średnią wartością kąta skrętu kół, a  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  to wartości kąta znośnienia kół osi przedniej i tylnej.



Rys. 7. Zachowanie się pojazdu pod działaniem naporu wiatru bocznego: linie 1, 2, 3 oznaczają możliwy tor ruchu środka masy pojazdu, zależnie od jego właściwości dynamicznych

Ogólne ujęcie skutków oddziaływania sił bocznych na samochód pokazano na rys. 7. Zaznaczono tam w sposób przykładowy, jak napór wiatru bocznego zmienia tor jazdy samochodu.

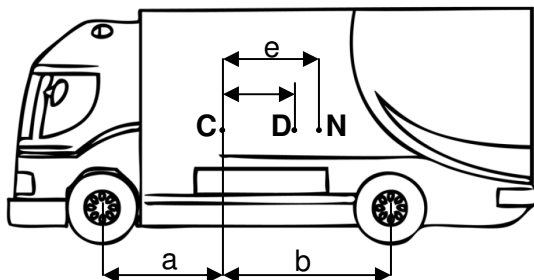
Zachowanie się pojazdu podczas naporu wiatru bocznego charakteryzuje zapas stateczności  $d$  (rys. 8). W celu jego wyznaczenia, na przekroju podłużnym pojazdu należy wyróżnić położenie trzech punktów:

$C$  – środek masy pojazdu,

$N$  – środek naporu wiatru bocznego,

$D$  – środek bocznego znośnienia pojazdu, czyli punkt, w którym umowne przyłożenie siły bocznej  $F_Y$  do samochodu wywoła jednakowe kąty znośnienia na kołach osi przedniej i tylnej [5].

W celu ułatwienia rozważań przyjęto, że punkty te leżą na tej samej wysokości.



Rys. 8. Schemat do wyznaczania zapasu stateczności samochodu pod działaniem wiatru bocznego

Bliskie względem siebie położenie punktów *C*, *D* i *N* jest najbardziej korzystne. Wówczas oddziaływanie sił bocznych wywołuje najmniejsze zmiany toru ruchu pojazdu. Jednak położenie tych punktów nie jest stałe. Ulega ono zmianie m.in. wraz ze zmianą stopnia wykorzystania ładowności i ułożenia ładunku. Także zmiana ciśnienia powietrza w ogumieniu, typu ogumienia i jego zużycie mają tu istotny wpływ. Wielkością decydującą o zachowaniu się pojazdu pod działaniem wiatru bocznego jest odległość *e* (rys. 8), która wyznacza ramię działania wypadkowej siły naporu wiatru.

## Podsumowanie

Przedstawiona analiza wybranych procesów dynamicznych, występujących podczas ruchu pojazdów wskazuje na ich właściwości wywołujące zagrożenia bezpieczeństwa ruchu, w szczególności pojazdów z wysoko położonym środkiem masy. Identyfikacja tych procesów i możliwość ich opisu pozwala na opracowanie sposobów badań właściwości jezdnych samochodów specjalnych. Badania prowadzone w celu rozpoznania właściwości pojazdów w pierwszej kolejności powinny zawierać etap doboru postaci sygnałów wymuszających ich ruch. Przeprowadzona analiza dostarcza informacji na temat wymuszeń występujących w charakterystycznych, niebezpiecznych sytuacjach drogowych. Właściwości badanych obiektów powinny być oceniane na podstawie odpowiedzi na wymuszenia. Charakter tego wymuszenia powinien być zbliżony do struktury wymuszeń eksploatacyjnych, niekiedy o większych amplitudach, prędkości czy częstotliwości, ale jednak charakteryzujących stan rzeczywistych oddziaływań zewnętrznych na pojazd.

Celem takich badań jest rozpoznanie właściwości dynamicznych pojazdu oraz ustalenie ewentualnych lub koniecznych ograniczeń jego właściwości ruchowych. Ograniczenia te powinny jasno wskazywać kierowcy zakres bezpiecz-

nej eksploatacji. Dzięki temu możliwe jest wyeliminowanie wielu błędów kierowców, które w większości powstają z braku rozpoznania zachowania się pojazdu w różnych sytuacjach, wynikających z zadań ratowniczych i innych.

### **Bibliografia**

1. Andrzejewski R.: Stabilność ruchu pojazdów kołowych, WNT, Warszawa 1997.
2. Kasprzyk T., Prochowski L.: Teoria samochodu. Obciążenia dynamiczne zawiesznień, WKiŁ, Warszawa 1990.
3. Litwinow A.: Kierowalność i stateczność samochodu, WKŁ, Warszawa 1976.
4. Mitschke M.: Dynamika samochodu, WKŁ Warszawa 1977.
5. Prochowski L.: Pojazdy samochodowe, Mechanika ruchu, wydanie 2, WKiŁ, Warszawa 2009.
6. Prochowski L., Unarski J., Wach W., Wicher J.: Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych, WKiŁ, Warszawa 2009.

Recenzent:  
**Sławomir LUFT**

### **Dangers in the operation and movement of high mass centre cars**

#### **Key words**

Specialist cars, curvilinear motion of the car, stability of the car's movement.

#### **Summary**

The article presents the analysis of dynamic processes that take place when the car is in motion, and which can be the cause for dangerous traffic events and accidents. The occurrence of these processes is most common in the case of the operation of cars, and the dangers that stem from them are most frequently connected to their high centre of mass. This is true, particularly for the specialist cars used by rescue teams.