

dr inż. **Włodzimierz KUPICZ**

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

## **STATECZNOŚĆ POJAZDÓW POŻARNICZYCH – METODY BADAŃ**

### **Fire-fighting vehicles roll stability - tests methods**

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono metody badań stateczności poprzecznej pojazdów pożarniczych, zgodne z wymaganiami normy. Podkreślono niedostateczną ilość informacji uzyskiwanych w statycznych metodach wyznaczania kąta przechyłu bocznego, zaproponowano rozszerzenie zakresu pomiarów o metody dynamiczne, zaprezentowano urządzenie do pomiarów kierowności i stateczności w badaniach drogowych, omówiono metody badawcze i przedstawiono przykładowe wyniki.

#### **Summary**

This article presents methods for transverse stability testing of fire brigade vehicles, in accordance with standard requirements. The insufficient amount of information that is obtained in the static methods for determining the lateral yaw angle has been highlighted, the measurements scope was proposed to be extended by dynamic methods, a device for measuring steerability and stability in road studies was presented, as well as research methods were discussed and exemplary results were presented.

**Słowa kluczowe:** pojazdy pożarnicze, bezpieczeństwo, stateczność pojazdu, badania drogowe;

**Keywords:** fire-fighting vehicles, safety of traffic, vehicle stability, road test method;

### **1. Wprowadzenie**

Stateczność, pewne i przewidywalne zachowanie pojazdów pożarniczych podczas szybkiej jazdy do akcji ratowniczo gaśniczej jest podstawą bezpieczeństwa zastępów Straży Pożarnej.

Pojazdy pożarnicze konstruowane są na bazie standardowych samochodów ciężarowych, na ramie których osadzona jest zabudowa specjalna a w tym zbiorniki na

środki gaśnicze. Zazwyczaj zabudowa ta osadzona jest na ramie pośredniej, która poprzez elementy podatne, np. metalowo-gumowe przymocowana jest do ramy głównej pojazdu. Taki sposób zabudowy sprawia, że w znaczący sposób zwiększa się wysokość położenia środka masy. Sytuację pogarsza również fakt, iż znaczna część pojazdów ratowniczo-gaśniczych wykonywana jest w wersji uterenowionej lub terenowej, o dużych prześwitach i wysokoprofilowych oponach. Tak zabudowany i ukompletowany pojazd jest bardzo podatny na wywrócenie w ruchu krzywoliniowym.

Pojazdy eksploatowane w jednostkach Państwowej Straży Pożarnej zabudowywane są standardowo przez krajowe firmy wyspecjalizowane w produkcji pożarniczej. Są to firmy niewielkie o bardzo małym potencjale badawczym, które nie wykonują kompleksowych badań pojazdów. Potwierdzeniem takiego stanu rzeczy są liczne przypadki wywrócenia pojazdów ratowniczo-gaśniczych w drodze do akcji. Wypadki te były przyczyną obrażeń i śmierci załóg pojazdów Straży Pożarnej. Wypadek pojazdu pożarniczego oprócz zagrożeń miejscowych, niesie za sobą poważne konsekwencje w postaci braku możliwości reakcji na właściwe zdarzenie. A zatem konsekwencje wywrócenia pojazdu to nie tylko straty materialne i ofiary wśród uczestników wypadku, ale również brak możliwości reakcji na zdarzenie do którego została skierowana załoga pojazdu oraz konieczność zaangażowania dodatkowych sił i środków.

## 2. Metody badań stateczności poprzecznej

Norma PN EN 1846-2 „Samochody pożarnicze. Część 2: Wymagania ogólne. Bezpieczeństwo i parametry.” w wykazie zagrożeń występujących podczas eksploatacji pojazdu pożarniczego (tablica 1), wielokrotnie wymienia utratę stateczności poprzecznej pojazdu. Jednak jako metodę badań stateczności poprzecznej przyjęto jedynie wyznaczenie statycznego kąta przechyłu poprzecznego. Parametr ten pozwala tylko na ocenę wpływu położenia środka masy na stateczność poprzeczną w warunkach statycznych. Nie uwzględnia następujących czynników:

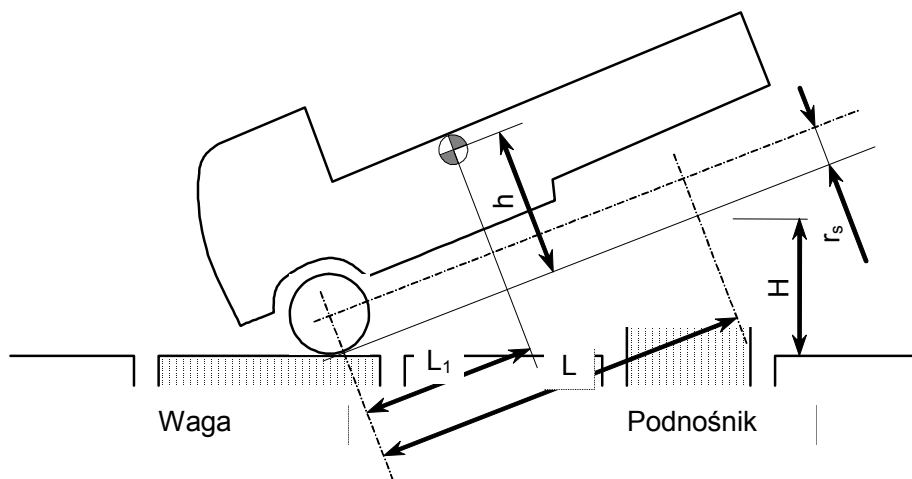
- dynamicznego oddziaływania cieczy na ścianki zbiornika i poprzez jego mocowanie na ramę pojazdu ;
- zjawisk zachodzących w strefie kontaktu koła ogumionego z nawierzchnią drogi;

- dynamicznych oddziaływań zawieszenia pojazdu;
- momentu bezwładności bryły pojazdu.

Statyczny kąt przechyłu boczego wyznaczany jest na dwa sposoby: obliczeniowo po zmierzeniu wysokości położenia środka masy pojazdu oraz na płycie uchyłnej.

### 2.1. Statyczny teoretyczny kąt przechyłu boczego

Stacyjny teoretyczny kąt obliczany po wyznaczeniu wysokości położenia środka masy pojazdu. Środek masy wyznaczany jest doświadczalnie. Schemat metody przedstawiono na rys 1. Jedna z osi pojazdu unoszona jest na wysokość  $H$ . Mierzony jest przyrost masy na osi nieunoszonej. Po uwzględnieniu rozstawu osi oraz statycznego promienia koła, wysokość położenia środka masy obliczana jest z zależności (1).



Ryc. 1. Wyznaczanie położenia środka masy metodą wagową

Źródło: Opracowanie własne

Wysokość położenia środka masy:

$$h = r_s + \frac{M_1' - M_1}{M} \cdot \frac{L}{H} \cdot \sqrt{L^2 - H^2}; \quad (1)$$

gdzie:

$M_1'$  – masa [kg] osi 1 po uniesieniu osi 2;

$M_1$  – masa [kg] przypadająca na oś 1;

$L$  – rozstaw osi [m];

$H$  – wysokość uniesienia osi [m];

$r_s$  – promień statyczny koła [m].

Statyczny teoretyczny kąt przechyłu bocznego wyznaczany jest z zależności (2)

$$\beta = \arctg \frac{0,5 b - e}{h} \quad (2)$$

gdzie:

**b** – rozstaw kół pojazdu [m];

**e** – przesunięcie środka masy w bok od płaszczyzny symetrii pojazdu [m].

Statyczny teoretyczny kąt przechyłu bocznego nie uwzględnia zjawisk związanych z ugięciem zawieszenia oraz odkształceniem opon pojazdu. Rzeczywisty kąt jest mniejszy niż wyznaczony w/w metodą.

## 2.2. Kąt przechyłu bocznego wyznaczany na płycie uchyłnej

Zgodnie z PN EN 1846-2, statyczny kąt przechyłu wyznaczany jest na płycie uchyłnej. Pojazd przechylany jest do chwili oderwania wewnętrznych kół od płaszczyzny płyty. Badanie takie przedstawiono na rys 2. Pomiary przeprowadzane są na obie strony.



**Fot. 1** Wyznaczanie kąta przechyłu bocznego na płycie uchyłnej

Źródło: Opracowanie własne

Kąt przechyłu bocznego wyznaczany metodą płyty uchyłnej, uwzględnia ugięcie zawieszenia oraz odkształcenie opon i jest bardziej zbliżony do wartości rzeczywistej.

### 2.3. Badania drogowe

Zachowanie pojazdu, jego stateczność poprzeczną najdokładniej wyznacza się podczas badań drogowych. Istnieje szereg znormalizowanych metod testowych kierowności i stateczności, które szczegółowo opisują warunki badań: przygotowanie pojazdu, wymuszenia na kierownicy, prędkości jazdy oraz dopuszczalne zachowanie pojazdu.

Podczas testów kierowności rejestrowane są następujące wielkości:

- kąt skrętu kierownicy  $\delta_H$ ;
- moment na kole kierownicy  $M_H$ ;
- przemieszczenie wzdłużne i poprzeczne pojazdu  $x, y$ ;
- prędkości wzdłużna i poprzeczna pojazdu  $v_x$  i  $v_y$ ;
- przyspieszenie poprzeczne pojazdu  $a_y$ ;
- kąt przechyłu bocznego pojazdu  $\varphi$ ;
- prędkość kątowna skrętu pojazdu  $\dot{\psi}$  (yaw velocity).

Do wykonania badań drogowych niezbędna jest kosztowna aparatura oraz tor badawczy o odpowiednich parametrach. W Polsce nie ma toru zbudowanego do celów badawczych. Najczęściej pomiary wykonywane są na pasach nieczynnych lotnisk. Problemem jest odpowiednia jakość nawierzchni – równa o dobrej przyczepności.

Badania wykonywane są przy pomocy kilku rodzajów aparatury. W artykule opisane zostanie jedno z najnowocześniejszych urządzeń i na dzień dzisiejszy jedyne w kraju. Znajduje się ono w posiadaniu Wojskowego Instytutu Techniki Pancерnej i Samochodowej. Jest to robot sterujący SR 60 firmy AB Dynamics. Urządzenie składa się z kilku modułów:

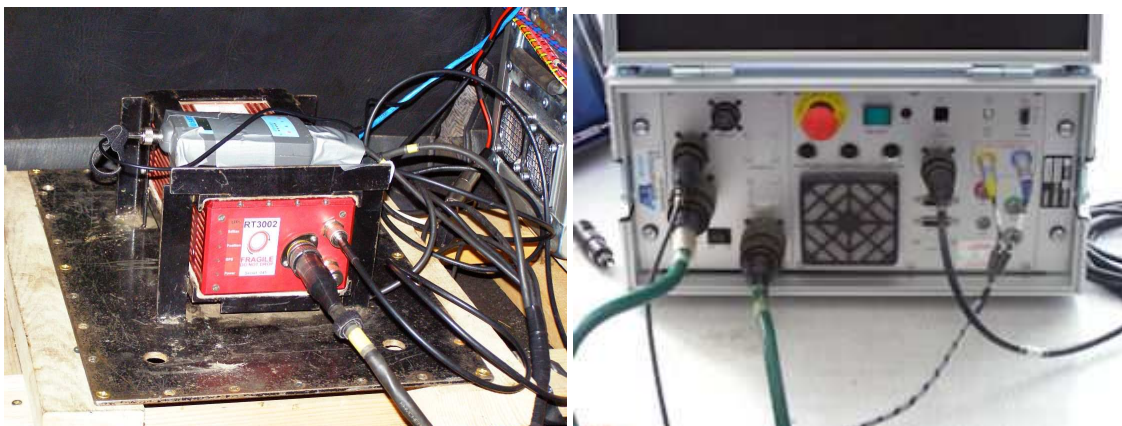
- jednostka centralna o dużej mocy obliczeniowej;
- system pomiarowy inercyjno-satelitarny RT 3002;
- kierownica z silnikiem krokowym i systemem pomiaru kąta i prędkości obrotu, oraz momentu;
- komputer użytkownika do zapisu i wizualizacji danych.

Maksymalny moment wymuszający na kole kierownicy wynosi 70 Nm. Maksymalna prędkość skrętu  $2500^0/s$ .

Tak skonfigurowany układ pozwala na:

- zaprogramowanie dowolnego toru jazdy lub skorzystanie z gotowych szablonów znormalizowanych testów;
- zarejestrowanie i odtworzenie toru ruchu pojazdu podczas jazdy kierowcy;
- pomiary odpowiedzi układu na wymuszenie: mierzone są, prędkości wzdłużne, poprzeczne i pionowe, przemieszczenie i przyspieszenia kątowe pojazdu, przyspieszenia boczne, określana jest charakterystyka kierowności pojazdu;
- test może być prowadzony zawsze w tym samym miejscu co jest szczególnie ważne jeśli dysponujemy małym placem do pomiarów lub o niejednorodnej nawierzchni;
- odtwarzalność toru ruchu pojazdu z dokładnością  $\pm 5$  cm.

Widok robota przedstawiono na fot.2.





**Fot.2.** Robot sterujący. a. system inercyjno satelitarny RT 3002, b. jednostka centralna, c. kierownica pomiarowa z kolumną ustalającą

Źródło: Opracowanie własne

Badania drogowe kierowności pojazdów ciężarowych wykonuje się zgodnie z metodyką opisaną w następujących dokumentach normatywnych:

- ISO 14792 – badania w ruchu ustalonym po torze kołowym;
- ISO 14793 – odpowiedź na wymuszenie skokowe na kole kierownicy;
- STANAG 4357 i 4358 – AVTP 03-30: kierowanie i manewrowość, AVTP 03-160: pojazdu dynamiczna stabilność ruchu.

### **2.1.1. Ruch po okręgu w warunkach quasi statycznych**

Badanie to w założeniu odbywa się w warunkach statycznych tzn. przy niezmiennej prędkości jazdy i przy stałym kącie skrętu kierownicy lub stałym promieniu toru ruchu. Po zarejestrowaniu badanych parametrów zwiększana jest skokowo prędkość jazdy i po ustabilizowaniu ponownie dokonuje się pomiarów. Badania kontynuowane są do osiągnięcia prędkości granicznej przy której dochodzi do nadmiernego (niebezpiecznego) kąta przechyłu bocznego, utraty sterowności (nadmiernej nad lub podsterowności), braku możliwości poruszania się po zadanym

torze jazdy na skutek dużego kąta bocznego znoszenia. [5]

Wyznaczana jest:

- charakterystyka kierowności pojazdu – tzn. czy wraz ze wzrostem prędkości staje się nad czy podsterowny. Miarą jest tzw. gradient nasterowności [2] określony zależnością:

$$GS = \frac{1}{i_s} \frac{d\delta_H}{da_y} - \frac{d\delta_A}{da_y} \quad (3)$$

gdzie:

$\delta_A$  - teoretyczny kąt skrętu kół wynikający z zależności Ackermana, potrzebny do poruszania się po łuku o promieniu  $R$  pojazdu o rozstawie osi  $l$

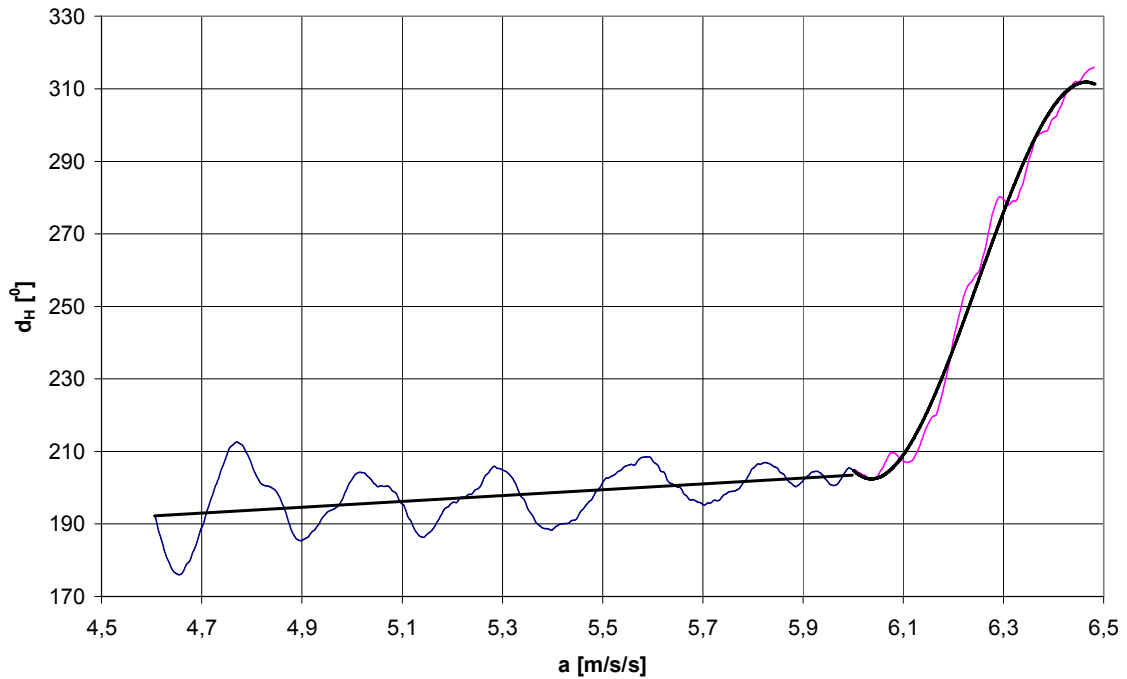
$$\delta_A = \frac{l}{R}$$

- podatność na znoszenie boczne opon – kąt bocznego znoszenia,
- oraz stateczność poprzeczna – kąt przechyłu bocznego w funkcji siły odśrodkowej, której miernikiem jest przyspieszenia poprzeczne.

Charakterystyki te są podstawowymi wyznacznikami zachowania pojazdu w jeździe po łuku, parametry pozostałych testów często odwołują się do wyników badania ruchu po okręgu w warunkach ustalonych.

Na ryc. 2 przedstawiono przykładowe charakterystyki wyznaczone w czasie testów ruchu po okręgu w warunkach ustalonych. Widoczne jest załamanie charakterystyki kąta skrętu kierownicy po przekroczeniu przyspieszenia poprzecznego  $6 \text{ m/s}^2$ . W punkcie tym nastąpił duży poślizg boczny kół osi przedniej i pojazd stał się silnie podsterowny.





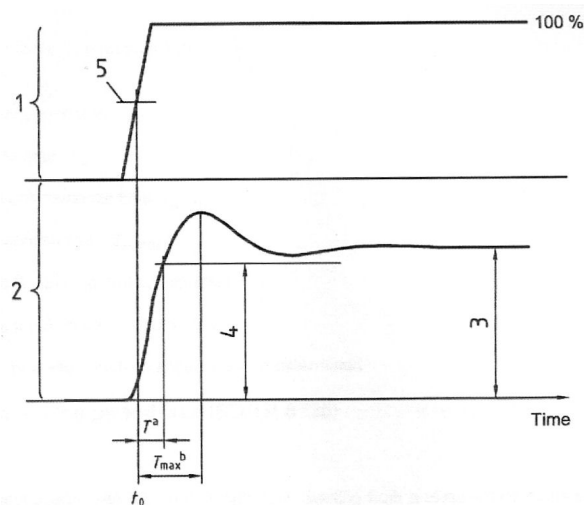
**Ryc. 2.** Charakterystyka kąta skrętu kierownicy w funkcji przyspieszenia poprzecznego

Źródło: Opracowanie własne

### 2.1.2. Wymuszenie skokowe na kole kierowniczym

W ramach normy prowadzone jest kilka testów. [6]

**Wymuszenie trapezowe.** Polega on na szarpnięciu kierownicą z prędkością kątową nie mniejszą niż  $200^{\circ}/s$ , o kąt odpowiadający kątowi potrzebnemu do uzyskania przyspieszenie poprzecznego  $4 \text{ m/s}^2$  podczas jazdy z prędkością  $80 \text{ km/h}$ . Analizowane są następujące wielkości charakteryzujące odpowiedź pojazdu (rys 5):



**Ryc. 3.** Graficzna interpretacja parametrów wymuszenia trapezowego [6]

Źródło: Norma ISO 14793

- przebieg czasowy przyspieszenie boczne – czas osiągnięcia maksimum, czas osiągnięcia 90% wartości ustalonej, wartość maksymalna  $a_{y\max}$ , stosunek przyspieszenia bocznego do kąta obrotu kierownicy w warunkach ustalonych

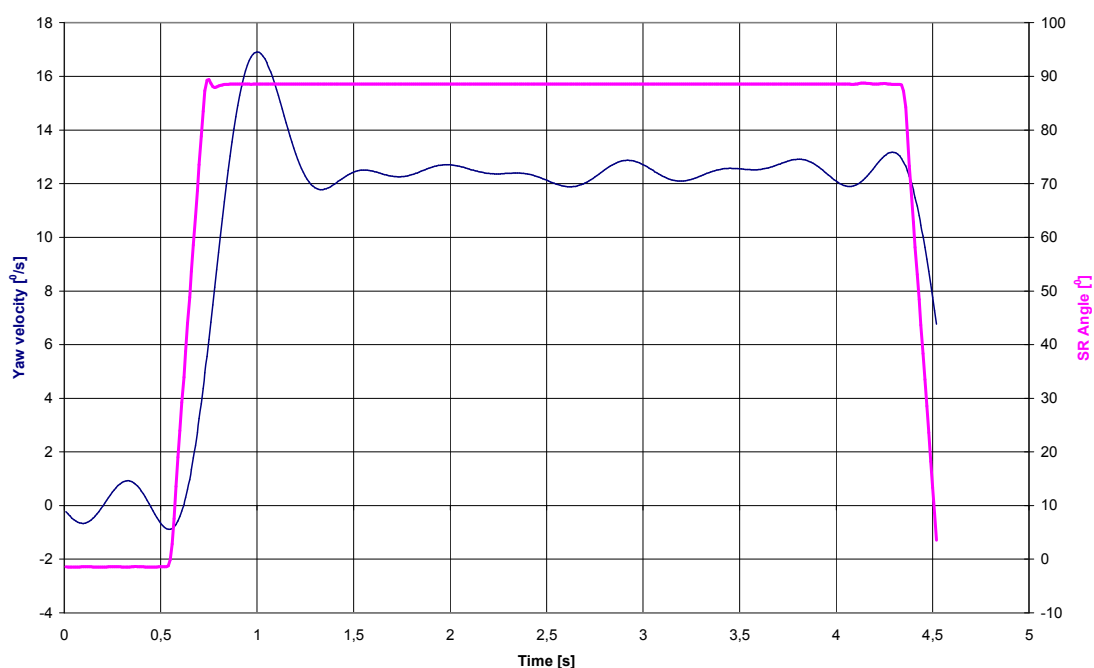
$$\left( \frac{a_y}{\delta_H} \right)_{SS}, \text{ tzw. współczynnik przewyższenia (przesterowania) } \left( \frac{a_{y\max} - a_{y,SS}}{a_{y,SS}} \right);$$

- prędkość kątowna pojazdu (yaw velocity): czas osiągnięcia maksimum, czas osiągnięcia 90% wartości ustalonej, wartość maksymalna, stosunek prędkości

$$\text{kątowej do kąta obrotu kierownicy w warunkach ustalonych } \left( \frac{\dot{\psi}}{\delta_H} \right)_{SS}, \text{ tzw.}$$

$$\text{współczynnik przewyższenia (przesterowania) } \left( \frac{\dot{\psi}_{\max} - \dot{\psi}_{SS}}{\dot{\psi}_{SS}} \right);$$

Przykładowe przebiegi w/w parametrów przestawiono na ryc.4.



**Ryc. 4.** Przebieg kąta skrętu kierownicy i prędkości kątowej pojazdu podczas testu wymuszenia trapezowego

Źródło: Opracowanie własne

Pożądanę zachowanie pojazdu to jak najszybsze podążanie za ruchem kierownicy, oraz niewielkie przesterowania. Przetawiony na rys 6 przebieg prędkości kątowej pojazdu – przesterowanie a następnie gasnące oscylacje świadczy o podsterownej charakterystyce pojazdu.

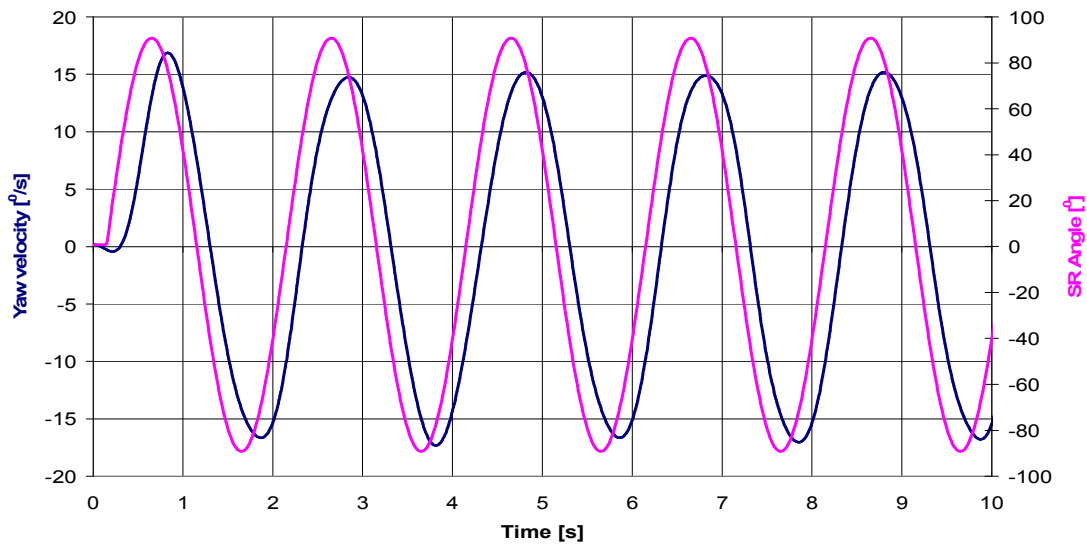
**Wymuszenie sinusoidalne.** Test polega na wymuszeniu na kierownicy sinusoidy o częstotliwości od 0,2 do 2 Hz i kącie skrętu kierownicy wywołującym przyspieszenia boczne  $3 \text{ m/s}^2$  podczas jazdy z prędkością 80 km/h w ruchu po łuku.

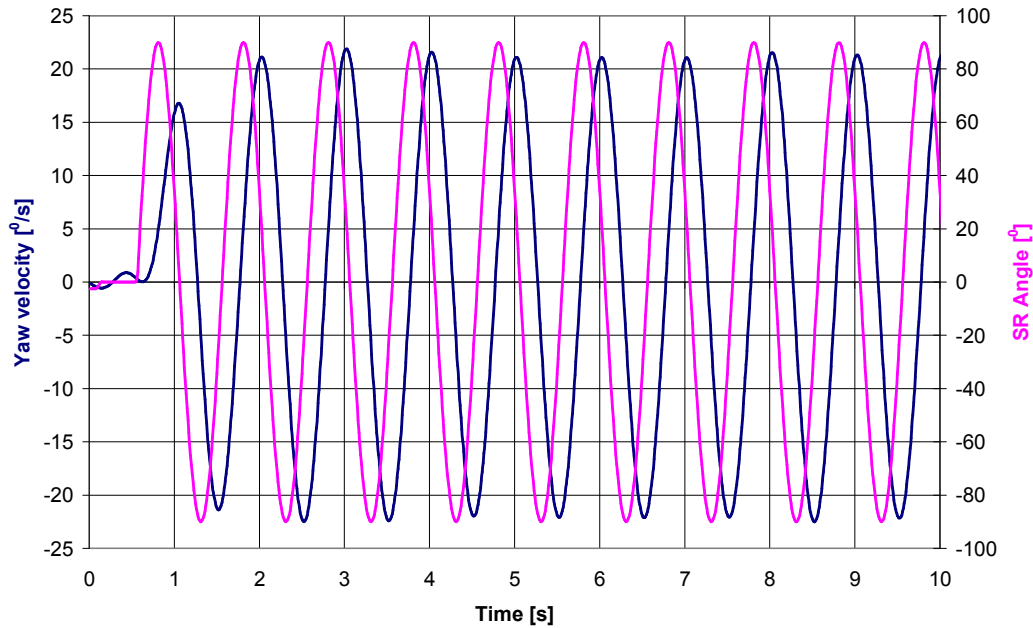
Przeprowadzane są analizy sygnałów w funkcji czasu (przesunięcia fazowe pomiędzy wymuszeniem i odpowiedzią) w funkcji częstotliwości.

Obliczane są:

- współczynnik przyspieszenia poprzecznego – jako amplituda przyspieszenia poprzecznego do amplitudy kąta skrętu kierownicy;
- współczynnik prędkości kątowej pojazdu - jako amplituda prędkości kątowej pojazdu do amplitudy kąta skrętu kierownicy;
- kąt przesunięcia fazowego pomiędzy kątem skrętu kierownicy a przyspieszeniem bocznym oraz prędkością kątową pojazdu.

Przykładowe przebiegi przedstawiono na ryc. 5.





Ryc. 5. Przebieg kąta skrętu kierownicy i prędkości kątowej pojazdu podczas testu wymuszenia sinusoidalnego a. 0,5 Hz, b. 1 Hz

Źródło: Opracowanie własne

**Wymuszenie losowe – szum.** Podczas jazdy z prędkością 80 km/h, kierownicy wymuszane są losowo szarpnięcia o maksymalnej amplitudzie niezbędnej do uzyskania przyspieszenia poprzecznego  $3 \text{ m/s}^2$ . Częstotliwość wymuszenia powinna zawierać się w granicach od 0,1 do 2 Hz.

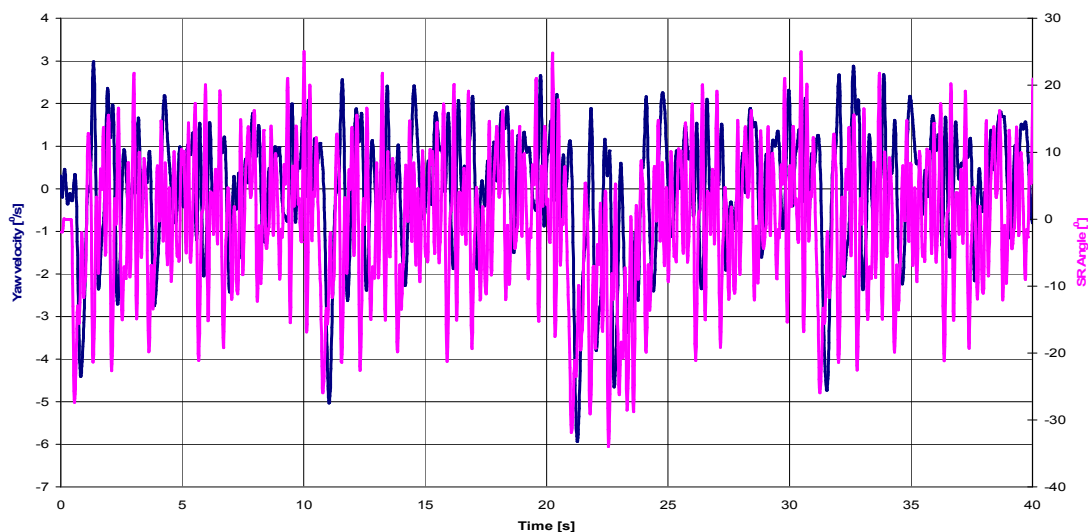
Wyniki pomiarów analizowane są w funkcji częstotliwości. Obliczane są:

- widmo częstotliwościowe kąta skrętu kierownicy;
- widmo częstotliwościowe współczynnika określonego jako stosunek przyspieszenia poprzecznego do kąta skrętu kierownicy;
- widmo częstotliwościowe współczynnika określonego jako stosunek prędkości skrętu pojazdu do kąta skrętu kierownicy;
- widmo częstotliwościowe przesunięcia fazowego pomiędzy przyspieszeniem poprzecznym i prędkością skrętu pojazdu a kątem skrętu kierownicy.

Podstawowym problemem jest losowe wymuszenie na kierownicy o odpowiednich parametrach. Wymaga to ogromnego doświadczenia od kierowcy. Problem ten nie występuje w przypadku zastosowania robota sterującego gdzie można zaprogramować

praktycznie dowolny rodzaj wymuszenia.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono na ryc. 6.



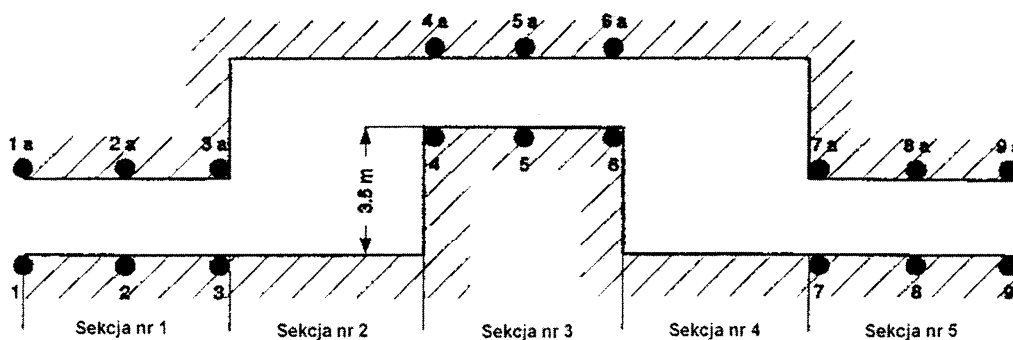
**Rys. 6.** Przebieg kąta skrętu kierownicy i prędkości kątowej pojazdu podczas testu wymuszenia losowego

Źródło: Opracowanie własne

### 2.1.3. Podwójna zmiana pasa ruchu

Metodyka badań opisana jest w dokumencie standaryzacyjnym wojsk NATO AVTP 03-160. Test symuluje ominięcie przeszkody (np. pieszego, który wtargnął na jezdnię) a następnie powrót na swój pas ruchu. Wykonywany powinien być po uprzednim ustaleniu bezpiecznych prędkości jazdy w próbach omówionych wyżej. Jest to test najbardziej zbliżony do rzeczywistych warunków ruchu. Na wynik próby ma wpływ szereg parametrów konstrukcyjnych pojazdu – wysokość położenia środka masy, moment bezwładności bryły pojazdu, charakterystyka sterowności, przełożenie układu kierowniczego, dobór opon, charakterystyka zawieszenia itp. W przypadku wykonywania badań przy wykorzystaniu kierowców testowych bardzo duży wpływ miała powtarzalność wymuszenia przez kierowcę (powtarzalność toru ruchu, prędkości skrętu kierownicą utrzymywanie stałej prędkości jazdy). Problemy te nie występują przy wykorzystaniu robota sterującego gdzie wszystkie te parametry są wykonywane z bardzo dużą powtarzalnością - nieosiągalną dla żadnego kierowcy.

Tor ruchu – jego szerokość oraz długość poszczególnych sekcji uzależnione są od gabarytów pojazdu (ryc. 7).



Rys. 7. Korytarz wyznaczający tor ruchu podczas manewru podwójnej zmiany pasa ruchu [1, 4]

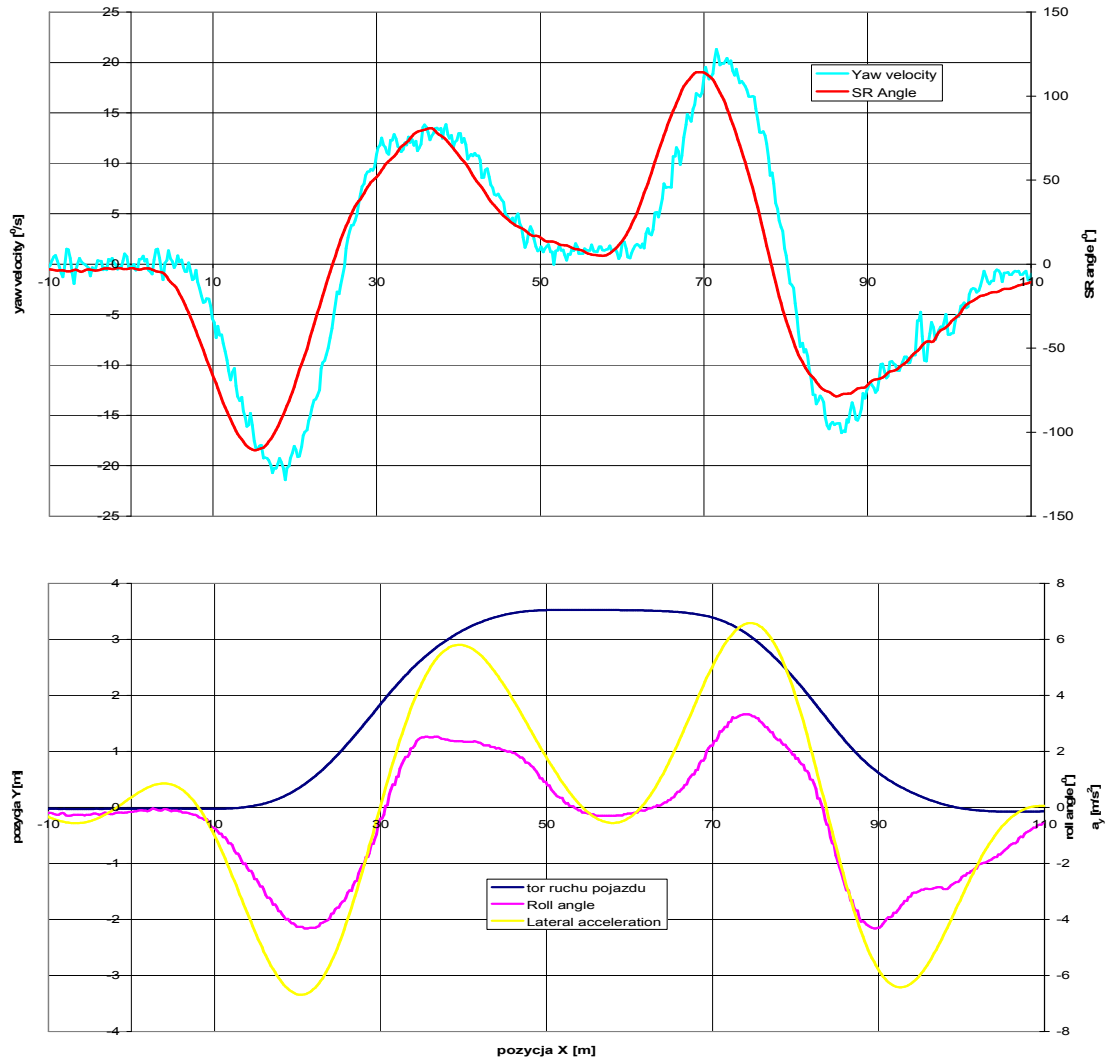
- Sekcja 1: Długość = 1,5 m. Szerokość  $1,1 * \text{szerokość pojazdu} + 0,25 \text{ m}$
- Sekcja 2: Długość = całkowita długość pojazdu (mierzona na poziomie 0,5 m nad jezdnią) + 24 m
- Sekcja 3: Długość = 25 m. Szerokość =  $1,2 * \text{szerokość pojazdu} + 0,25 \text{ m}$
- Sekcja 4: Długość = całkowita długość pojazdu + 24 m
- Sekcja 3: Długość = 15 m Szerokość =  $1,1 * \text{szerokość pojazdu} + 0,25 \text{ m}$

Źródło: STANAG 4357 i 4358, procedura AVTP 03-160

W przypadku pojazdów specjalnych badania rozpoczyna się od minimalnych prędkości jazdy, stopniowo ją zwiększając. Jako graniczna bezpieczna prędkość uznawana jest taka przy której wystąpiło jedno z poniższych zjawisk:

- niebezpieczny przechył boczny;
- nadsterowność pojazdu;
- brak możliwości utrzymania się w wyznaczonym korytarzu ruchu.

Na ryc. 8 przedstawiono parametry ruchu pojazdu podczas wykonywania manewru podwójnej zmiany pasa ruchu.



Rys.8. Parametry ruchu pojazdu podczas manewru podwójnej zmiany pasa ruchu

Źródło: Opracowanie własne

### 3. Wnioski

Stateczność poprzeczna pojazdu uzależniona jest od szeregu czynników i zjawisk statycznych i dynamicznych. Niemożliwe jest wyznaczenie stateczności poprzecznej - a zatem stwierdzenie czy pojazd pożarniczy jest dostatecznie bezpieczny - jedynie na podstawie statycznego kąta przechyłu bocznego. Pełną informację można uzyskać jedynie na podstawie obszernych badań kierowności i stateczności poprzecznej w warunkach drogowych.

## Literatura

1. Kupicz W., *Opracowanie procedury badań dynamicznej stabilności ruchu pojazdów*, Praca statutowa, Sprawozdanie WITPiS nr 57/ZP/2006. Sulejówek 2006;
2. Reński A., *Budowa samochodów*, Politechnika Warszawska, Warszawa 1997;
3. Norma PN EN 1846-2 „Samochody pożarnicze. Część 2: Wymagania ogólne. Bezpieczeństwo i parametry.”
4. STANAG 4357 i 4358, procedura AVTP 03-160: „Dynamiczna stabilność ruchu”.
5. ISO 14792 Road vehicles- Heavy commercial vehicles and buses- Steady-state circular tests.
6. ISO 14793 Road vehicles- Heavy commercial vehicles and buses- Lateral transient response methods.

### Recenzenci:

dr inż. Bogdan Kosowski

dr Tomasz Węsierski