MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-M/2012
ZESZYT 8
ROK 109
ISSUE 8
YEAR 109

WIESŁAW PIENIĄŻEK*, STANISŁAW WALCZAK**, GRZEGORZ MOTRYCZ***

BADANIE REAKCJI POJAZDU CZTEROOSIOWEGO NA WYMUSZENIE LOSOWE OBROTEM KIEROWNICY

FOUR AXLE VEHICLE'S RESPONSE ON RANDOM STEERING WHEEL INPUT

Streszczenie

W artykule pokazano charakterystyki częstotliwościowe reakcji specjalnego pojazdu czteroosiowego o masie ponad 18 ton na wymuszenie losowe obrotem kierownicy. Pojazd posiada niezależne zawieszenie i napęd na wszystkie osie, z których I i II są kierowane. Charakterystyki zostały wyznaczone na podstawie danych z badań eksperymentalnych przeprowadzonych i opracowanych zgodnie z normą ISO 14791. Przy analizie wyników wykorzystano także wyniki innych prób przeprowadzonych w ramach badań eksperymentalnych stateczności i kierowalności tego pojazdu.

Słowa kluczowe: pojazdy specjalne, stateczność i kierowalność, badania eksperymentalne, wymuszenia losowe obrotem kierownicy

Abstract

This is a cognitive type paper. The set of main frequency characteristics calculated on the basis of transient open loop response test with random steering wheel input for four vehicle special vehicle has been presented. This is 8WD vehicle 18000 kg total mass equipped with independent suspension and two steering axles. All frequency characteristics were calculated on the basis of experimental tests carried out according to ISO 14791 standard. The results of others stability and steerability tests conducted for this vehicle were applied in general analysis.

Keywords: special vehicles, stability and steerability, experimental researches, random steering wheel input

* Dr inż. Wiesław Pieniążek, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.
** Dr inż. Stanisław Walczak, Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej.
*** Mjr mgr inż. Grzegorz Motrycz, Pracownia Pojazdów Samochodowych, Zakład Pojazdów Samochodowych, Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej.

1. Wstęp

Badanie procesów przejściowych realizowanych w pętli otwartej zostało omówione w normie ISO 7401, wydanej po raz pierwszy w 1988 r. Norma ta dotyczy samochodów o dopuszczalnej masie całkowitej nieprzekraczających 3,5 tony. Prawie równocześnie opracowano Raport Techniczny ISO/TR 8726 dotyczący badania reakcji na wymuszenie pseudolosowe. Norma ISO 14791, wydana w 2001 r. obejmuje ciężkie pojazdy i zespoły drogowe. W obydwu normach – ISO 7401 oraz ISO 14791 opisano badanie reakcji pojazdów na różne typy wymuszeń (skokowe, impulsowe, sinusoidalne i inne, w tym także losowe). Badanie na wymuszenia losowe jest polecane szczególnie dla pojazdów, od których – jak to określono w normie [16] – oczekuje się „zachowania liniowego". Z praktyki autorów wiadomo, że ciężkie pojazdy charakteryzują się na ogół takimi cechami szczególnie w normalnych warunkach pracy. Bardzo ważną zaletą opisywanych prób jest brak wymagania posiadania specjalnego toru badawczego. Próbę można wykonać na prostym odcinku drogi z dobrą nawierzchnią, o małym natężeniu ruchu (wybierając np. odpowiednią porę doby). Wymagany jest jednak prosty odcinek drogi o długości około 12 km. Ponieważ warunek ten jest trudny do spełnienia, próbę można wykonać, przejeżdżając kilkakrotnie krótszy odcinek drogi.

Badanie reakcji na wymuszenie losowe nie daje tak wyraźnych informacji o właściwościach pojazdu jak inne próby (np. próba reakcji na wymuszenie skokowe czy sinusoidalne). Wynika to także z faktu małej jeszcze bazy danych. W celu poprawy sytuacji i określenia odpowiednich korelacji próby losowe powinny być wykonywane dla różnych kategorii pojazdów, równolegle z próbami ustalonej jazdy po okręgu oraz próbami badania reakcji na skokowe wymuszenie obrotem kierownicy. Obecnie próby te mogą być ważne do eksperymentalnej weryfikacji badań symulacyjnych.

Odpowiednie charakterystyki są sporządzane w dziedzinie częstotliwości. Przedział częstotliwości wymuszeń losowych, możliwych do realizacji przez kierowcę, mieści się w granicach od 0,1 do 4,5 Hz, z tym że dla ciężkich pojazdów górna granica jest mniejsza (z doświadczeń autorów wynika, że nie przekracza 3 Hz). Wymuszenia mogą być (i powinny być) realizowane przez odpowiednią maszynę-robota. W naszym kraju robot tego typu posiada Wojskowy Instytut Techniki Pancernej i Samochodowej w Sulejówku. W niniejszym artykule nie wykorzystywano tego urządzenia.

W dostępnej literaturze brakuje wspomnianych wyżej charakterystyk częstotliwościowych dla samochodów ciężarowych i ciężkich pojazdów. Zespół pracowników Politechniki Krakowskiej, zajmujący się badaniami eksperymentalnymi stateczności i kierowalności, zrealizował badania reakcji na wymuszenia losowe między innymi dla kilku typów ciężkich pojazdów, a część z nich została opublikowana [4, 6, 7].

Badania reakcji na wymuszenia losowe powinny odbywać się w zakresie liniowym, a więc dla przyspieszeń poprzecznych nieprzekraczających wartości 2,5 do 3 m/s^2. Dla tego zakresu można wyznaczyć transmitancję, przesunięcie fazowe oraz funkcję koherencji. Ta ostatnia wskazuje na spójność sygnałów wyjścia-wejścia. Na podstawie przebiegu funkcji koherencji można również wnioskować o liniowości lub nieliniowości badanego systemu oraz, co jest bardzo ważne, o obecności szumów w sygnałach wejścia-wyjścia, które są trudne do wyeliminowania. Sprawa nie jest łatwa, ale badania dostarczają wielu cennych informacji i powinny być realizowane, chociażby ze względu na potrzebę gruntownego poznania problemu.

Autorzy niniejszego artykułu uczestniczą w rządowym projekcie badawczym O R00 0083 0012 dotyczącym problematyki stateczności i kierowalności transportera wojskowego w wybranych stanach awaryjnych układu jezdnego. Wyniki są odnoszone do pojazdu sprawnego, dla którego przeprowadzono badania w stosunkowo szerokim zakresie.

2. Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych

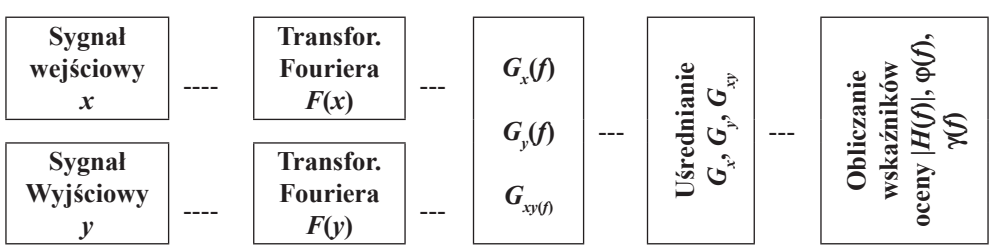
Charakterystyki częstotliwościowe są wyznaczane na podstawie analizy spektralnej zarejestrowanych sygnałów wyjścia-wejścia [1]. Jeśli dla tych sygnałów wyznaczymy widma amplitudowe oraz gęstości widmowe mocy (własne i wzajemne), to – opierając się na znanych z teorii procesów stochastycznych zależnościach – można wyznaczyć pożądane wskaźniki oceny: transmitancję, kąt przesunięcia fazowego oraz funkcję koherencji, odpowiednio wg wzorów [16]:

$$|H(f)| = \frac{|G_{\mathrm{we/wy}}|}{G_{\mathrm{we}}} \tag{1}$$

$$\phi(f) = \operatorname{arc\,tg} \frac{\mathrm{Im}(G_{\mathrm{we/wy}})}{\mathrm{Re}(G_{\mathrm{we/wy}})} \tag{2}$$

$$\gamma^2_{\mathrm{we/wy}}(f) = \frac{|G_{\mathrm{we/wy}}(f)|^2}{G_{\mathrm{we}}(f) \times G_{\mathrm{wy}}(f)} \tag{3}$$

We wzorach (1), (2) i (3) oznaczono przez: $H(f)$ – transmitancję, $\varphi(f)$ – kąt przesunięcia fazowego, $\gamma^2_{\mathrm{we/wy}}(f)$ – funkcję koherencji, $G_{\mathrm{we}}(f) = G_x(f)$ – widmową gęstość własną mocy sygnału wejściowego (wymuszenia), $G_{\mathrm{wy}}(f) = G_y(f)$ – widmową gęstość własną mocy sygnału wyjściowego (reakcji na wymuszenie), $G_{\mathrm{we/wy}}(f) = G_{xy}(f)$ – widmową gęstość wzajemną badanych sygnałów, $\mathrm{Im}(G_{\mathrm{we/wy}}(f))$ – część urojoną gęstości widmowej wzajemnej, $\mathrm{Re}(G_{\mathrm{we/wy}}(f))$ – część rzeczywistą gęstości widmowej wzajemnej, f – częstotliwość wymuszenia. Na rysunku 1 pokazano schemat blokowy, obrazujący procedurę obliczeń, stosowaną podczas obróbki wyników.



Rys. 1. Schemat blokowy obróbki wyników (na podstawie [16])

Fig. 1. Block scheme of results elaboration (according to [16])

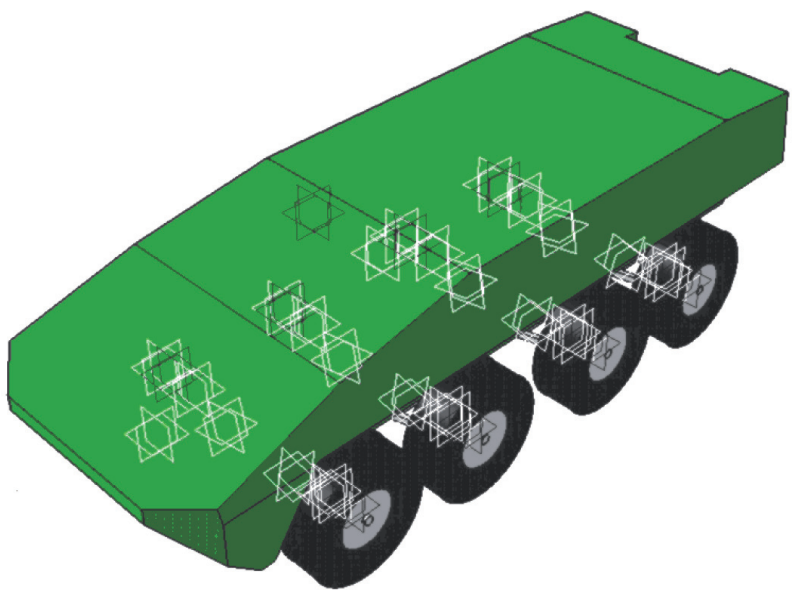
Do obróbki wyników został zbudowany przez jednego z autorów pracy odpowiedni program o dużym stopniu automatyzacji, wykorzystujący elementy środowiska MatLab. [10]. Program ten zweryfikowano za pomocą elementów innego, sprawdzonego programu, opracowanego wcześniej przez Janusza Pokorskiego z Instytutu Pojazdów Politechniki Warszawskiej [11].

3. Uwagi o przebiegu badań poligonowych

Badano czteroosiowy pojazd specjalny długości 8 m i masie całkowitej podczas badań około 18 000 kg, z ogumieniem wielozadaniowym o wymiarach 14.00R20. Wcześniej, zbadano rozkład mas przypadających na poszczególne osie, położenie środka masy, obliczono momenty bezwładności bryły nadwozia względem osi układu współrzędnych związanego z pojazdem.

Stosunki rozkładu mas przypadających na poszczególne osie, w odniesieniu do I osi pojazdu, są odpowiednio: 0,877; 0,748; 0,597. Środek mas leżał na wysokości 1,24 m od jezdni i znajdował się w odległości 1,945 m od I osi kierowanej, a ponadto był przesunięty 0–0,015 m, względem podłużnej płaszczyzny symetrii pojazdu. Momenty bezwładności bryły nadwozia, względem osi układu współrzędnych związanego z pojazdem, wynosiły: I_x = 21220 kg · m^2, I_y = 90720 kg · m^2, I_z = 98000 kg · m^2 i zostały wyznaczono na drodze obliczeniowej.

Model badanego pojazdu pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Model badanego pojazdu (zbudowany przez Stanisława Walczaka)

Fig. 2. Model of tested vehicle

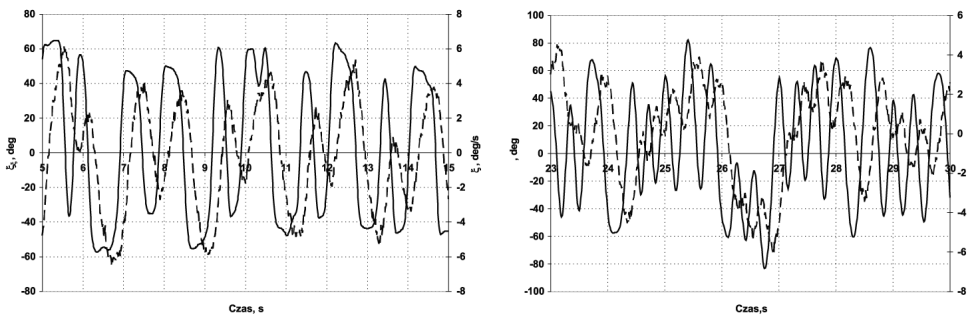
Próby reakcji na wymuszenie losowe zostały przeprowadzone przy prędkości pojazdu 80±3 km/h, na zamkniętym odcinku o długości 2 km. Kierowca wykonywał ruchy kierownicą wg dwóch sygnałów o różnych wysokościach tonu, otrzymywanych w słuchawkach odtwarzacza osobistego. Kierowca nie musi wiernie naśladować otrzymywanych sygnałów,

nie może jednak „wpaść” w jedną, własną częstotliwość, co jak się okazuje nie jest łatwe do realizacji w praktyce. Sprawdzeniem poprawności realizowanego wymuszenia jest wygląd widma amplitudowego wymuszenia (wejścia), wykonanego w skali decybelowej, na początku obróbki wyników.

W programie badań mierzono ponad 20 różnych parametrów kinematycznych i dynamicznych pojazdu, za pomocą dwóch systemów pomiarowych, w tym także systemu GPS. W niniejszym artykule wykorzystano sygnał prędkości podłużnej, kąta obrotu kierownicy, prędkości odchylenia oraz przyspieszenia poprzecznego.

4. Wyniki badań

Na rysunku 3 pokazano wycinki zapisanych sygnałów – kąta obrotu kierownicy δ_H i prędkości odchylenia ψ, dla różnych częstotliwości wymuszenia.



Rys. 3. Wycinki przebiegów wymuszenia δ_H (linia ciągła) i reakcji pojazdu ψ (linia przerywana). Fragment przedstawiony po lewej stronie – wymuszenie około 1 Hz, po prawej stronie, wymuszenie około 3 Hz

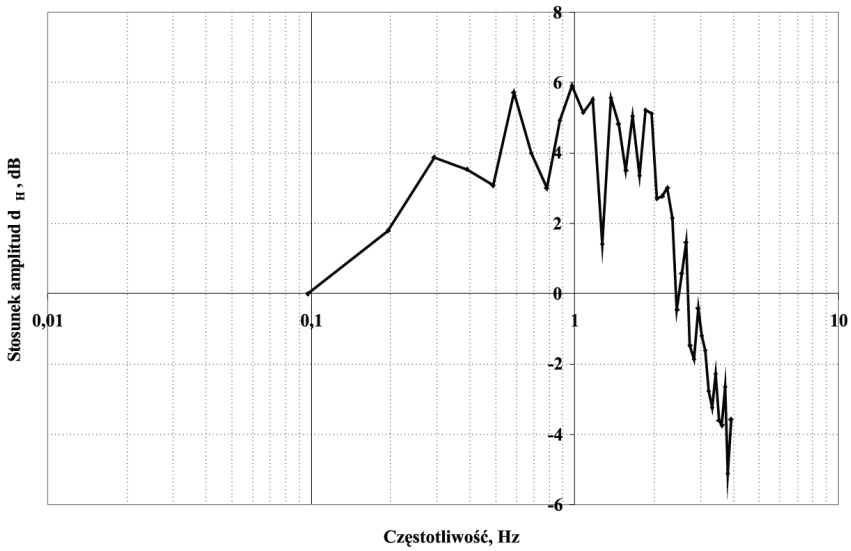
Fig. 3. The fragments of input δ_H (solid line) and output ψ (broken line). Left side view – forcing input with frequency 1 Hz, right side view – with forcing input frequency about 3 Hz

Na podstawie rys. 3 widać, że na wymuszenie 1 Hz pojazd reaguje pełnym sygnałem prędkości odchylenia. Przy wymuszeniu 0,3 Hz nie są osiągane pełne amplitudy przebiegów, ze względu na dużą bezwładność pojazdu (moment bezwładności $I_z = 98000$ kg · m^2).

Na rysunku 4 pokazano widmo amplitudowe wymuszenia δ_H, w skali decybelowej. Widmo obrazuje zróżnicowanie amplitud wymuszenia w funkcji częstotliwości wymuszenia. Wg zaleceń normy [16], maksymalna różnica poziomów amplitud nie powinna przekraczać 12 dB. Jak widać, warunek ten jest spełniony.

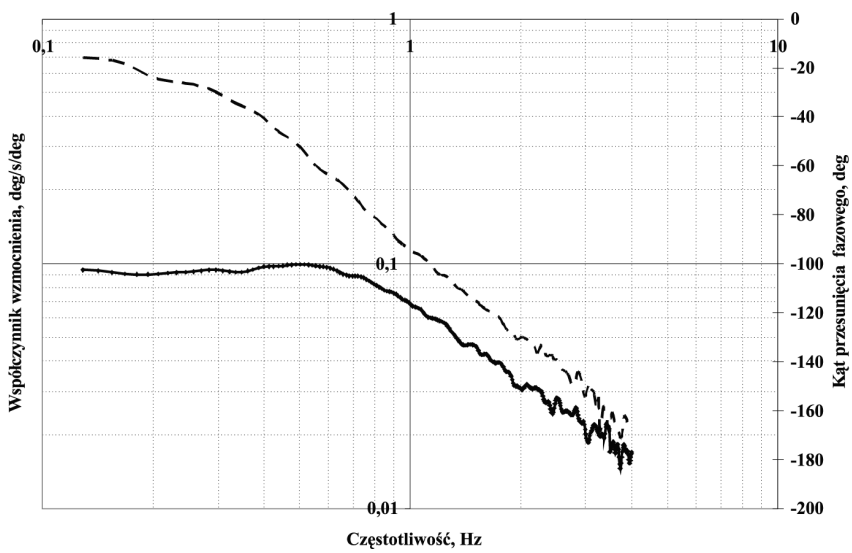
Na rysunku 5 przedstawiono wykresy współczynnika wzmocnienia i kąta przesunięcia fazowego, a na rys. 6 funkcję koherencji zwyczajnej.

Przedstawione graficznie wskaźniki oceny właściwości badanego pojazdu są wynikiem uśrednienia 32 zbiorów po 1024 próbki, poddanych analizie widmowej wg schematu na (rys. 1). Zbiory te wydzielono z 4 plików wyników odpowiadających badaniu na odcinku łącznym około 8 km. Biorąc pod uwagę wartość funkcji koherencji, wyniki są reprezentatywne dla tego typu pojazdu w przedziale częstotliwości od 0,2 do 2 Hz.



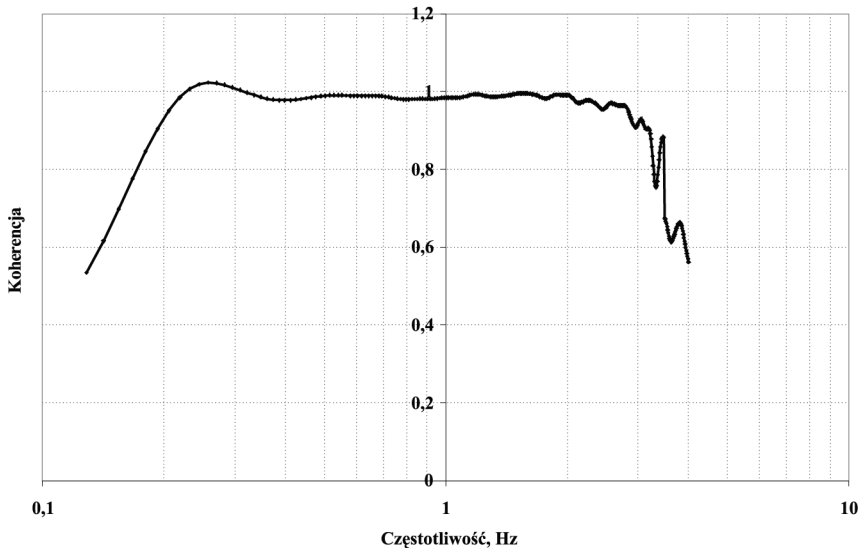
Rys. 4. Skład amplitudowy sygnału wymuszającego – δ_H

Fig. 4. The harmonic content of input – δ_H



Rys. 5. Przebiegi współczynnika wzmocnienia i kąta fazowego

Fig. 5. Yaw rate responses to steering wheel input (gain and phase angle)



Rys. 6. Przebieg funkcji koherencji sygnałów

Fig. 6. A coherence of output/input signals

5. Wnioski

Inne próby wykonane przedmiotowym pojazdem w pętli otwartej (ustalona jazda po okręgu ze stałym kątem obrotu kierownicy, reakcja na wymuszenie skokowe obrotem kierownicy, wejście w zakręt bez korekty toru) wykazały podsterowność w całym zakresie osiągniętych przyspieszeń poprzecznych. Dla zakresu liniowego, gradient podsterowności wyznaczony z pierwszej próby osiągał wartość 0,011 rad · s^2m^{-1}, a przewyższenie stanu ustalonego prędkości odchylenia (w próbie reakcji po wymuszeniu skokowym obrotem kierownicy), nie przekraczało 20%. Przeprowadzono także próby w pętli zamkniętej (np. pojedynczą i podwójną zmianę pasa ruchu), które potwierdziły te właściwości pojazdu.

Uwzględniając powyższe i przechodząc do oceny właściwości pojazdu na podstawie wyników próby reakcji na wymuszenie losowe, można stwierdzić, że:

– W przedziale częstotliwości wymuszenia 0,25 do około 3 Hz, funkcja koherencji, osiąga wartość bliską 1, co wskazuje na bardzo dobrą spójność sygnałów wejścia–wyjścia, czyli na cechy liniowości badanego systemu dynamicznego.
– Przesunięcie fazowe sygnałów zwiększa się regularnie, w rozpatrywanym zakresie częstotliwości.
– Współczynnik wzmocnienia dla prędkości odchylenia, ma prawie płaski przebieg do częstotliwości około 0,35 Hz. Następnie, przy częstotliwości około 0,5 Hz, uzyskuje maksimum i dalej, jego wartość zmniejsza się w dość regularny sposób aż do częstotliwości nieco ponad 2 Hz. Należy zauważyć, że krzywa przebiegu współczynnika wzmocnienia jest, jakościowo, bardzo podobna do uzyskiwanych dla samochodów osobowych, co potwierdza subiektywnie odczucia i opinie badających o bardzo dobrych właściwościach pojazdu. Ilościowo, krzywa jest przesunięta w kierunku niższych częstotliwości i mniejszych wartości współczynnika wzmocnienia, co wydaje się oczywiste dla pojazdów tej kategorii.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt rozwojowy nr O R00 0083 12 oraz ze środków na naukę w latach 2011-2012 jako projekt badawczy O N509 192340.

Literatura

[1] Bendat J.S., Piersol A.G., *Random Data. Analysis and Measurent Procedures. Second edition (revised and expanded*), A Wiley-Interscience Publication, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapure 1986.

[2] Pieniążek W., *The Car Steerability Research on the Basis of Frequency Response Characteristic to Random Steering Input*, [in:] *Selected Problems of Structural Mechanics Mechine Design Production Engineering Motor and Railway Vehicles Ogranic Chemistry*, Anniversary Inssue Vol. No. 3, Kraków 1995 (praca była także opublikowana jako, *Experimental Research of Car Steerability by Means of Random Steering Input*, Perodica Politechnica, Ser. Transp. Eng., Vol. 21, No. 3, 1993).

[3] Pieniążek W. (współautor), *Badanie kierowalności samochodu przy wymuszeniu stochastycznym obrotem kierownicy*, Teka Komisji N-P Motoryzacji PAN w Krakowie, z. 16, 1998.

[4] Pieniążek W., *Experimental Research of the Movement of Multiaxle Vehicles*, (współautorzy. Z. Bielecki i W. Grzegożek), Papers of the Symposium MVM'90, Kragujevac 1990 (rozszerzona wersja pracy: *Badania stateczności i kierowalności żurawi na podwoziach wieloosiowych*, (współautorzy Z. Bielecki, W. Grzegożek), Prace PIMB Warszawa, Numer Specjalny, 1989).

[5] Pieniążek W. *Badania symulacyjne reakcji samochodu na wymuszenie losowe obrotem kierownicy*, Mat. IV Konfer. „Badania Symulacyjne w Technice Samochodowej", Lublin 1993.

[6] Pieniążek W. (współautor), *The Trial of Evaluation of the Bus Dynamical Properties by Means of the Experimental Test with Random Steering Input*, Proceedings of XXIV Meeting of Bus and Coach Experts, Budapest 1993.

[7] Pieniążek W., *Truck Steerability Research by Means of Transient Open Loop Response Test Method with Random Steering Input*, Proc. of V Mini Conference VSDIA, TU Budapest 1966 (praca była także publikowana jako referat na VI Sympozjum IPM WAT, Rynia 1966).

[8] Pieniążek W. (współautor), *The analitical Research of Response of the Car witch Freedom to Roll on Stochastic Steering Input*, Proceedings of 7th Mini Conference VSDIA, Budapest 2000.

[9] Pieniążek W., *Experimental Research of Car Steerability by Means of Random Steering Input*, Perodica Politechnica Ser. Transp. Eng., Vol. 21, No. 3, 1993.

[10] Pokorski J., *Zestaw programów w języku FORTRAN 77L, do analizy spektralnej sygnałów czasowych* [w:] Kamiński E., Pokorski J. *Teoria Samochodu. Dynamika zawieszeń i układów napędowych pojazdów samochodowych*, WKiŁ, Warszawa 1983.

[11] Walczak S., *BADACZ – zintegrowany program w środowisku MatLab, do kompleksowej obróbki wyników badań eksperymentalnych*, Kraków 2010-2012.

[12] Zomotor A., *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*, Vogel Buchverlag, Würzburg 1987.

[13] ISO 7401-1998 Road vehicles – Lateral transient response test methods – Open – loop test methods. Second edition 2003-02-15.
[14] ISO 14791-2000 Road vehicles – Heavy commercial vehicle combinations and articulated buses – Lateral stability test methods. First edition 2000-04-15.
[15] ISO 14793-2000 Road vehicles – Heavy commercial vehicles and buses – Lateral transient response test methods. First edition 2003-02-15.
[16] ISO/TR Road Vehicles – Transient Open-Loop Test Method with Pseudo Random Steering Input Response.