

**Eksperymentalna weryfikacja procedury symulacji  
pionowych obciążeń samochodu  
przy braku sygnałów kryterialnych**

**TADEUSZ M. GROMADOWSKI, JAN W. OSIECKI,  
BRUNON ST. STĘPIŃSKI**

Przemysłowy Instytut Motoryzacji w Warszawie

Realizacja standardowej procedury symulacji pionowych obciążeń samochodu wymaga pomiaru i rejestracji sygnałów kryterialnych podczas badań trakcyjnych. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentu fizycznego iteracyjnej procedury kształtowania sygnałów symulacyjnych bez konieczności realizacji badań trakcyjnych. Wyniki badań przedstawiono w formie wykresów. Oceniono zbieżność metody.

## **1. Wprowadzenie**

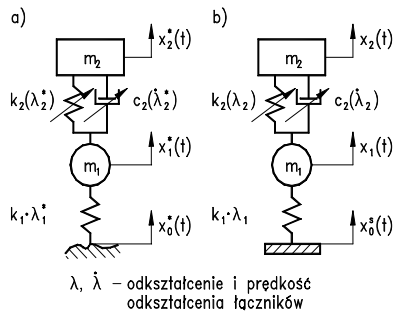
Podstawowym badaniem samochodu na symulatorze drogi (np. firmy MTS) jest symulacja pionowych obciążeń pojazdu, którą stosuje się między innymi w ocenie jakości nadwozia i zawieszenia w aspekcie trwałości i własności dynamicznych (charakterystyk). Symulacja polega na wygenerowaniu takich sygnałów wejściowych na koła, realizowanych przez wzbudniki elektrohydrauliczne symulatora, które powodują pożądane sygnały wyjściowe w wybranych punktach badanego obiektu. Sygnały pożądane - nazywane kryterialnymi - są rejestrowane podczas zaprogramowanych jazd badanego samochodu po wybranych odcinkach dróg. Niedogodności takiego wymagania są oczywiste. Egzemplarz samochodu przeznaczonego do badań musi być wykonany kompletnie z możliwością przejazdu po wybranych trasach. Dlatego celowym jest opracowanie metody badań pionowej dynamiki samochodu na symulatorze drogi bez potrzeby jego wstępnej jazdy po obranych trasach, tj. kształtowania sygnałów wejściowych przy braku sygnałów kryterialnych. Koncepcję takich badań zaprezentowano w pracy [1], a procedurę kształtowania sygnałów zrealizowano na drodze cyfrowej na przykładzie „ćwiartki” samochodu (quarter car).

W niniejszym opracowaniu streszczono procedurę dla rozwiązania podjętego zadania, opisano obiekty fizyczne i zaprezentowano wyniki eksperymentu.

## 2. Kształtowanie sygnałów wejściowych

Procedura kształtowania sygnałów wejściowych sterujących stanowiskiem symulacyjnym przy braku sygnałów kryterialnych polega na identyfikacji charakterystyk ogumienia samochodu innego niż badany, czyli samochodu czujnika, a następnie wyznaczenia metodą iteracyjną tego sygnału dla samochodu badanego. Samochód-czujnik jest wykonany w dwóch wersjach A i B, które różnią się charakterystykami zawiesznień, np. samochód A ma amortyzatory sztywne (raidowe), zaś samochód B ma amortyzatory standardowe. Sztywność zawiesznień i ogumienie są w obu wariantach identyczne. Obydwa samochody przejeżdżają po tej samej drodze. Rejestrujemy przyspieszenia środków osi kół  $\ddot{x}_{1Ai}^*(t)$ ,  $\ddot{x}_{1Bi}^*(t)$  jako funkcje czasu, gdzie  $i = 1, 2, \dots, 4$ , oznacza numer koła. Traktując te sygnały jako kryterialne, generujemy znaną procedurą [2] sygnały sterujące stanowiskiem (sygnały wejściowe)  $x_{0Ai}^s(t)$ ,  $x_{0Bi}^s(t)$  takie, że:

$$\ddot{x}_{1Ai}^s(t) \cong \ddot{x}_{1Ai}^*(t), \quad \ddot{x}_{1Bi}^s(t) \cong \ddot{x}_{1Bi}^*(t) \quad (\text{rys. 1}).$$



Rys. 1. Samochód-czujnik: a) na drodze, b) na stanowisku symulacyjnym.  
Fig. 1. Car-sensor: a) on the road, b) on the road simulator.

Identyfikacja charakterystyk ogumienia samochodów-czujników polega na wyznaczeniu funkcji  $\alpha_i(\omega)$  [1]:

$$\alpha_i(\omega) = 1 - \frac{F_{x0Ai}^s(j\omega) - F_{x0Bi}^s(j\omega)}{F_{x1Ai}^s(j\omega) - F_{x1Bi}^s(j\omega)} \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (1)$$

gdzie  $F_x(j\omega)$  oznacza transformatę sygnału  $x(t)$ , ( $x(t) \Leftrightarrow F_x(j\omega)$ ).

Zakładamy, że gdyby samochód badany jechał po tej samej drodze (po tym samym śladzie), co samochody czujniki, to funkcje (1) byłyby identyczne dla wszystkich kół.

Sygnały symulacyjne (wejściowe)  $y_{0i}^s(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 4$ ; dla samochodu badanego wyznaczymy metodą kolejnych przybliżeń. Jako przybliżenie (0) przyjmujemy dowolny

(teoretycznie) sygnał  $y_{0i}^{s(0)}(t) \Leftrightarrow F_{y_{0i}}^{s(0)}(j\omega)$ . Sygnał ten podajemy na wzbudnik drgań symulatora drogi i rejestrujemy odpowiedź

$y_{li}^{(0)}(t) \Leftrightarrow F_{y_{li}}^{(0)}(j\omega)$ . Sygnały symulacyjne (wejściowe)  $F_{y_{l1}}^{s(1)}(j\omega) \Leftrightarrow y_o^{s(1)}(t)$

w pierwszym przybliżeniu obliczamy wg wzoru:

$$F_{y_{0i}}^{s(1)} = F_{x_{0Ai}}^s(j\omega) + [\alpha_i(j\omega) - 1] \cdot [F_{x_{lAi}}(j\omega) - F_{y_{l1}}^{(0)}(j\omega)], i = 1, 2, \dots, 4; \quad (2)$$

Podając na wzbudnik symulatora sygnały  $y_{0i}^{s(1)}(t)$  rejestrujemy  $y_{li}^{(1)}(t) \Leftrightarrow F_{y_{li}}^{(1)}(j\omega)$ .

Kolejne przybliżenia ( $k = 2, 3, \dots$ ) otrzymujemy wg. algorytmu:

$$F_{y_{0i}}^{s(k)}(j\omega) = F_{x_{0Ai}}^s(j\omega) + [\alpha_i(j\omega) - 1] \cdot [F_{x_{lAi}}(j\omega) - F_{y_{li}}^{(k-1)}(j\omega)] \quad (3)$$

Oczywiście, powstaje tu problem zbieżności omawianej procedury. W wypadku fizycznej realizacji procedury, ogólnego dowodu zbieżności nie można przeprowadzić, gdyż w każdej iteracji ingeruje eksperyment. Identyczna sytuacja ma miejsce w klasycznych procedurach symulacyjnych.

### 3. Obiekty badań

Obiektami badań były trzy samochody: dwa samochody-czujniki A i B oraz samochód 2 (badany). Wszystkie obiekty były zmodyfikowanymi wersjami pojazdu bazowego, mianowicie samochodu Lanos (prod. Daewoo). Modyfikacja polegała na zmianie tylnego zawieszenia pojazdu bazowego i w wypadku samochodu 2 – masy. Jest to zawieszenie klasyczne; między oś i nadwozie jest wmontowany amortyzator olejowy i metalowa sprężyna śrubowa. Zawieszenie przednie typu Mc Pherson nie podlegało modyfikacji.

Zgodnie z założeniami procedury kształtowania sygnałów symulacyjnych przy braku sygnałów kryterialnych, samochody A i B różniły się jedynie amortyzatorami: pierwszy z nich wyposażony był w olejowe amortyzatory używane (po przebiegu ok. 70 tys. km), zaś w drugim zamontowano nowe tego samego typu.

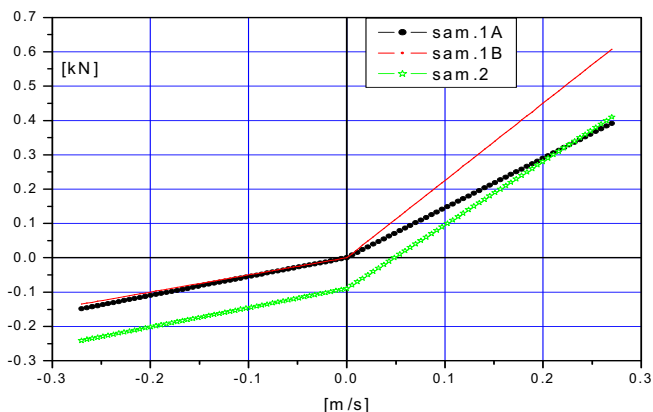
Modyfikacja samochodu 2 polegała na zamontowaniu sprężyn baryłkowych (o zmiennym promieniu nawinięcia) i nowych amortyzatorów gazowo - olejowych. Masa pojazdu była większa w porównaniu z samochodami – czujnikami (1550 kg wobec 1448 kg).

W tabeli 1 podano zestawienia wymienianych elementów zawiesznień badanych pojazdów.

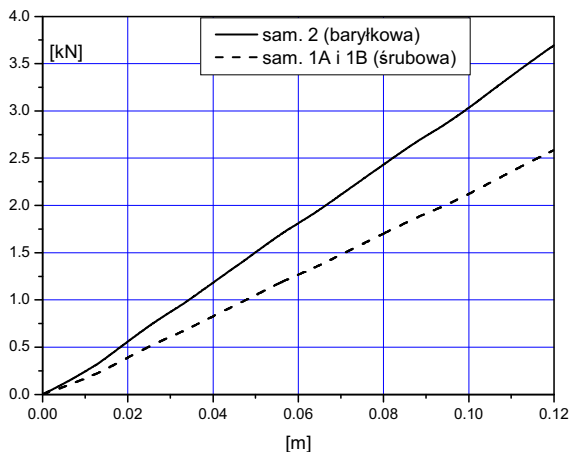
Tabela 1. Elementy zawiesznień badanych pojazdów.  
Table 1. The elements of the testing vehicle suspensions.

Lp.	Samochód	Sprężyna	Amortyzator
1	A	śrubowa	olejowy używany
2	B	śrubowa	olejowy nowy
3	2 (badany)	baryłkowa	gazowo – olejowy nowy

Dla sprawdzenia zgodności doboru elementów zawieszzeń z wymaganiami omawianej procedury, wykonano pomiary ich charakterystyk na maszynie wytrzymałościowej.



Rys. 2. Charakterystyki amortyzatorów tylnego prawego zawieszenia samochodów.  
Fig. 2. Characteristics of the of the rear right suspension dampers of cars.



Rys. 3. Charakterystyki tylnego zawieszenia badanych samochodów.  
Fig. 3. Characteristics of testing rear suspension cars.

Na rysunku 2. pokazano, przykładowo, standardowe charakterystyki prawego tylnego zawieszenia badanych samochodów. Otrzymano je jako zlinearyzowane linie szkieletowe pętli histerez zarejestrowanych przy harmonicznym przemieszczeniu tłoczków z częstotliwością 1 Hz. Pomiar charakterystyk sprężyn wykonano przy quasi-statycznej zmianie odkształceń.

Analizując wykresy należy stwierdzić, że dobór elementów zawieszzeń w badanych pojazdach był zgodny z założeniami procedury: samochody-czujniki różniły się jedy-

nie amortyzatorami. Samochód badany miał zamontowane w zawieszeniu amortyzatory i sprężyny inne niż samochody-czujniki.

#### 4. Badania trakcyjne

Badania trakcyjne polegały na pomiarze i rejestracji przyspieszeń środków osi kół podczas przejazdu samochodu po wybranych odcinkach dróg. Pomiarzy zrealizowano podczas przejazdu po różnych odcinkach dróg publicznych z różnymi prędkościami [3]. Badania wykonywano podczas najmniejszego natężenia ruchu. Umożliwiło to oznakowanie odcinków pomiarowych w sposób zapewniający przejazdy kolejnych samochodów praktycznie po tych samych śladach.

Do badań zastosowano indukcyjne czujniki przyspieszeń firmy Endevco typ 226A-100. Czujniki współpracowały ze wzmacniaczami zestawu pomiarowo-rejestracyjnego Esam Traveller. Wyniki pomiarów były rejestrowane w postaci plików cyfrowych zapisanych w pamięci komputera typu notebook [3]. Czas rejestracji wynosił około 30 s, zaś odstęp próbkowania  $\Delta t = (512)^{-1}$  s.

Badania trakcyjne samochodów-czujników miały na celu pomiar i rejestrację sygnałów kryterialnych dla realizacji standardowej procedury symulacji niezbędnych do obliczenia funkcji identyfikujących ogumienie  $\alpha_i(j\omega)$ ,  $i = 1..4$ . Pomiarzy trakcyjne przyspieszeń środków osi kół samochodu 2 wykonano dla ich porównania z rezultatami zastosowania opisywanej metody.

W niniejszej pracy przedstawiono symulację przejazdu po drodze asfaltowej z prędkością 50 km/godz.

#### 5. Wyniki badań na symulatorze drogi

##### 5.1. Wyniki badań samochodów-czujników

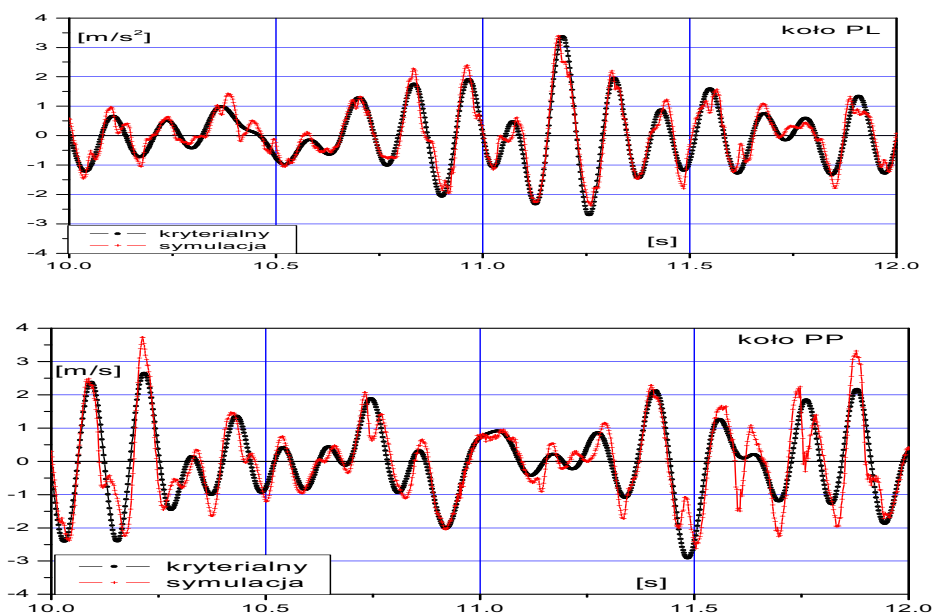
Badania samochodów – czujników na symulatorze, obok ukształtowania sygnałów wejściowych zapewniających podobieństwo sygnałów kryterialnych do wyjściowych, miały na celu pomiar i rejestrację tych ostatnich. Wykorzystano je przy realizacji procedury kształtowania sygnałów symulacyjnych wejściowych bez znajomości sygnałów kryterialnych.

Samochody poddane eksperymentowi na symulatorze drogi MTS 850 (rys. 4.) były wyposażone w te same czujniki, których użyto w badaniach trakcyjnych. Na rysunku 5 pokazano przykładowo wyniki symulacji dla jednego z samochodów-czujników.

Przyjęto oznaczenia: osi kół: PL - przednia lewa, PP – przednia prawa, TL– tylna lewa, TP- tylna prawa



Rys.4. Samochód podczas badań na symulatorze drogi.  
Fig. 4. Car during the test on the road simulator.



Rys.5. Samochód-czujnik A. Sygnały przyspieszeń środków osi kół przednich w symulowanym przejeździe po drodze asfaltowej z prędkością  $v = 50$  km/godz.  
Fig. 5. Car-sensor A. The acceleration signals of the front axes wheels centers at simulated drive on the asphalt road with velocity  $v = 50$  km/h.

Komputer stanowiska symulacyjnego był wyposażony w oprogramowanie umożliwiające realizację procedury kształtowania sygnałów, przy znanych sygnałach kryterialnych, metodą parametru zdalnego RPC [2].

W trakcie realizacji procedury kształtowania sygnałów jest obliczany i rejestrowany w każdym kroku iteracyjnym błąd symulacji, który ma charakter funkcji monotonicznie malejącej. Sposób jego obliczania nie jest znany użytkownikowi, gdyż jest objęty licencją. Producent oprogramowania, firma MTS (USA), zapewnia, że jeśli błąd w ostatnim kroku iteracyjnym wynosi około 20% lub mniej, to ukształtowany w tym kroku sygnał wejściowy (sygnał sterujący wzbudnikami symulatora) wymusza takie drgania obiektu, że przebiegi przyspieszeń środków kół (sygnały wyjściowe) niewiele różnią się od sygnałów kryterialnych. W badaniach obydwu samochodów-czujników błąd symulacji wynosił około 10% [3].

## 5.2. Wyniki badań samochodu 2

Celem badań samochodu 2 na symulatorze drogi była eksperymentalna weryfikacja procedury kształtowania sygnałów symulacyjnych bez znajomości sygnałów kryterialnych, opisana w rozdziale 2.

Realizacja procedury w laboratorium, obok pomiarów i rejestracji sygnałów, wymaga dość złożonych obliczeń. Korzysta się z wyników symulacji opisanych w rozdziale 5.1.

Na wstępie obliczano, z założenia jednakową dla wszystkich kół, funkcję daną wzorem (1). Występują w nim transformaty Fouriera przemieszczeń środków kół. Jednak w procesie symulacji rejestruje się przyspieszenia, dlatego obliczono je korzystając ze związków:

$$F_{x_{1Ai}}(j\omega) = -\frac{I}{\omega^2} F_{\ddot{x}_{1Ai}}(j\omega) \quad F_{x_{1Bi}}(j\omega) = -\frac{I}{\omega^2} F_{\ddot{x}_{1Bi}}(j\omega) \quad (4)$$

Procedura kształtowania sygnałów rozpoczyna się od pomiaru i rejestracji sygnałów wyjściowych (przyspieszeń środków kół) w kroku zerowym przy teoretycznie dowolnych sygnałach wejściowym. W opisywanych badaniach wymuszeniami w kroku zerowym  $y_{0i}^{(0)}(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, 4$ ; były zmodyfikowane sygnały sterujące wzbudnikami w pierwszym kroku procedur kształtowania sygnałów dla samochodu – czujnika A przy znajomości sygnałów kryterialnych (rozdz. 5.1). Modyfikacja polegała na wzmocnieniu sygnałów: ich wartości pomnożono przez wskaźnik  $w = 0,5$ . Mając zarejestrowane sygnały wyjściowe  $\ddot{y}_{0i}^{(0)}(t)$ , obliczano, korzystając ze związków (4), transformaty Fouriera przemieszczeń środków kół  $F_{y_{0i}}^{(0)}(j\omega)$ . Transformatę sygnałów wejściowych w pierwszym kroku iteracyjnym obliczano ze wzoru (2).

Obliczając transformatę odwrotną sygnałów  $F_{y_{0i}}^{(1)}(j\omega)$ , wyznaczano sygnały  $y_{0i}^{(1)}(t)$  podawane na wzbudniki w tym kroku. Rejestrowano sygnały wyjściowe  $\ddot{y}_{0i}^{(1)}(t)$  i obliczając transformatę przemieszczeń  $F_{y_{1i}}^{(1)}(j\omega)$  wyznaczano sygnały

wejściowe w drugim przybliżeniu. Ogólnie, w n-tym kroku iteracyjnym transformaty Fouriera sygnałów wejściowych wyznaczano wg wzoru (3). Wykonując transformację odwrotną wyznaczano przebiegi  $y_{0i}^{(n)}(t)$  wymuszające drgania samochodu na stanowisku. Obliczone sygnały poddawano, podobnie jak w wypadku sygnałów  $y_{0i}^{(0)}(t)$ , różnym wzmocnieniom ( $0 < w < 1$ ).

Na rysunkach 6. i 7. pokazano fragmenty przebiegów sygnałów wyjściowych otrzymanych w procesie symulacji. Pokazano też sygnały „kryterialne” (rys. 8). Czudzylów oznacza, że są to sygnały nieznane, albowiem z założenia samochód 2 nie jeździ po drodze. Przejazdy tym samochodem wykonano jedynie dla weryfikacji procedury.

Oszacowano przebieg zbieżności procedury. Jako miarę „odległości” pomiędzy sygnałami przyjęto różnicę modułów odchyłeń standardowych (tab. 2).

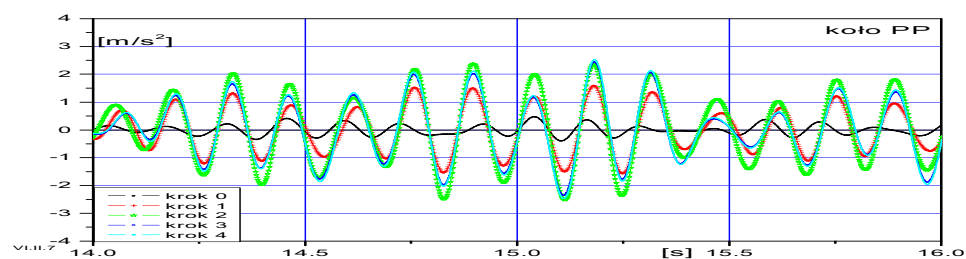
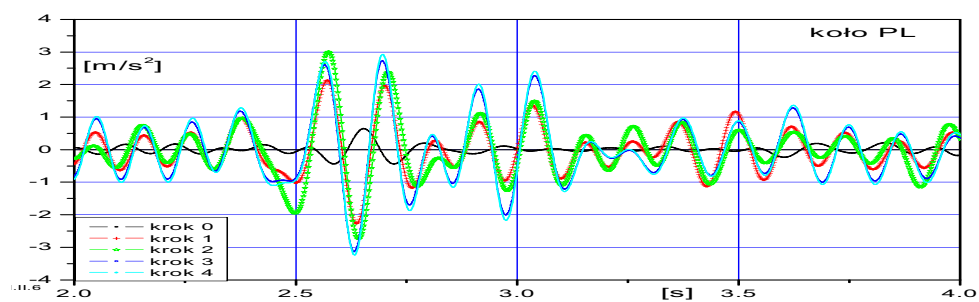
Do obliczeń i sporządzenia wykresów wykorzystano pakiet programów Origin 6.1 i programy własne.

Tabela 2. Różnice modułów odchyłeń standardowych sygnałów rejestrowanych w kolejnych iteracjach.  
Table 2. The differences of the standard variation modulus of the signals recorded in the following iteration steps.

Oś koła	r10	r21	r32	r43	rk
11	0.26108	0.1591	0.1374	0.0491	0.16029
12	0.3349	0.23106	0.0763	0.03527	0.02215
13	0.58599	0.35159	0.18336	0.11055	0.02428
14	0.6821	0.28815	0.11405	0.00716	0.26622

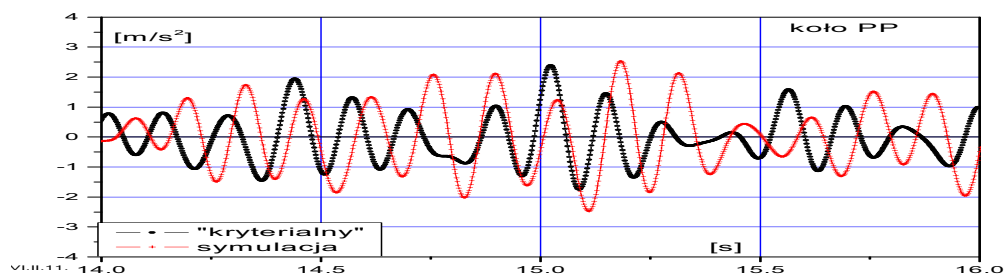
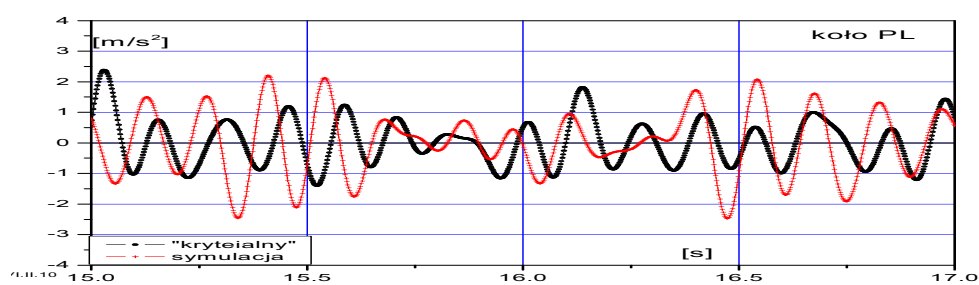
Symbol r10 oznacza różnicę modułów odchyłeń standardowych sygnałów zarejestrowanych w kroku zerowym i pierwszym, 21 – w kroku drugim i pierwszym itd. W ostatniej, prawej kolumnie (rk) podano różnice odchyłeń standardowych sygnałów „kryterialnych” i sygnałów otrzymanych w ostatnim kroku symulacji.





Rys. 6. Przebiegi sygnałów wyjściowych w kolejnych krokach iteracji.

Fig. 6. The output-signals in the ordinary iterations.



Rys. 7. Sygnały wyjściowe: „kryterialny” i z ostatniego kroku iteracji.

Fig. 7. The criterion” output-signal and the last iteration output signal.

## 6. Podsumowanie.

Dane zawarte w tabeli 2 pokazują, że procedura symulacji jest zbieżna: różnice odchyłeń standardowych sygnałów wyjściowych w kroku następnym i poprzednim maleją.

Wobec braku, z założenia, sygnałów kryterialnych, odpowiedź na pytanie o poprawność procedury w takim znaczeniu jak w metodzie standardowej (bliskość sygnałów kryterialnych i z symulacji) jest złożona. Porównanie sygnałów z pomiarów trakcyjnych, z założenia nie znanych, wykazuje pewne podobieństwo, jednak, zdaniem autorów, na korzyść proponowanej procedury przemawia przede wszystkim jej zbieżność wykazana eksperymentalnie. Świadczy to o przybliżaniu się do nieznanych sygnałów kryterialnych.

## Literatura

- [1] GROMADOWSKI T. M., OSIECKI J. W., STĘPIŃSKI B. ST.: O możliwości symulacyjnych badań pionowej dynamiki samochodu na symulatorze drogi MTS bez potrzeby jego wstępnej jazdy po obranych trasach, VI Międzynarodowa Konferencja nt. „Badania symulacyjne w technice Samochodowej”, Kazimierz Dolny, 26-28 maja 1997. Teka komisji Naukowo-Problemovej PAN, Oddz. w Krakowie, Z. 12, s. 37-42.
- [2] GROMADOWSKI T. M., OSIECKI J. W., STĘPIŃSKI B. ST.: Badanie samochodu na automatycznym symulatorze drogi metodą parametru zdalnego. VIII Międzynarodowa Konferencja Badania Symulacyjne w Technice Samochodowej, Kazimierz Dolny 21-23 maja 2001. Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN, Oddz. W Krakowie, Z. 22, s. 321-327.
- [3] Nowa metoda badania pionowej dynamiki samochodu na symulatorze drogi. Raport z wykonania projektu badawczego (grantu) nr 5T12C04822. Realizatorzy projektu: prof. dr hab. inż. Jan W. Osiecki, dr inż. Tadeusz Gromadowski, dr inż. Brunon Stępiński.

### **The experimental verification of the car vertical loads simulation procedure without a criterion signals**

#### S u m m a r y

Performing standard procedure of the vertical vehicle load needs measurement and recording the criterion signals during “on – road” tests. In the paper there are presented the results of physical experiment of the iteration procedure without necessity of the road tests. The results are presented as a graphs. The convergence of the method is estimated.