

## Symulacyjne badania dynamiczne pojazdów

JAN MIARKA, ROMAN ŻUREK

Ośrodek Badawczo Rozwojowy Samochodów Małolitrażowych BOSMAL

W publikacji przedstawiono współczesne metody badań dynamicznych pojazdów i ich zespołów na hydraulicznych stanowiskach laboratoryjnych. Zaprezentowano techniki wykonywania badań poczynając od zdefiniowania sygnałów sterujących obciążeniem dynamicznym, działającym na pojazd w ruchu po drodze o określonym profilu, przez ocenę i edycję tych obciążeń aż po kontrolowane odtworzenie trwałościowych testów drogowych w warunkach laboratoryjnych. Opracowane testy zapewniają powtarzalność przy zachowaniu dokładności na zadanym, wysokim poziomie.

### 1. Wstęp

Tradycyjne badania drogowe polegają na obserwacji stanu samochodu w zależności od zrealizowanego przebiegu na trasach o zadanych charakterystykach. Zwykle określone są: stan nawierzchni, jej rodzaj, udziały procentowe jazdy miejskiej i autostradowej, a także występowanie wzniesień. Badania tego typu są zwykle zbyt długotrwałe, jak na obecne tempo wprowadzania nowych konstrukcji do produkcji. W badaniach drogowych trudno o powtarzalność obciążeń dynamicznych. Wpływ niskich i wysokich temperatur, działanie wody i promieniowania słońca jest losowe i zależne przede wszystkim od warunków atmosferycznych napotkanych w trakcie badań.

Dynamiczne badania laboratoryjne pojazdów odbywają się na stanowiskach zwanych symulatorami drogi. Dotychczasowe podejście do tego typu badań było prezentowane w [1, 2]. Oczywiście posiadany sprzęt determinuje procedury i zakres badań. Przestrzenny symulator drogi pozwala na odtwarzanie obciążeń dynamicznych działających na pojazd poruszający się po drodze. W symulatorze takim na czop każdego koła działają siły pionowe, wzdłużne i poprzeczne a dodatkowo symulowane są siły bezwładności przy napędzie i hamowaniu. Symulatory tego typu są bardzo kosztowne i z tego względu upowszechniły się tzw. czterokolumnowe symulatory drogi, symulujące jedynie pionowe wymuszenia na testowanym pojeździe. Na rysunku 1 przedstawiono stanowisko pracy takiego symulatora, a na rys. 2 system sterowania typu Flex Test II CTC. Ocenia się, że symulatory tego typu pozwalają na odwzorowanie około 85% przypadków obciążeń dynamicznych występujących w eksploatacji, pozostałe 15% wynika z oddziaływania sił niesymulowanych na czterokolumnowym symulatorze.

Na czterokolumnowy symulator drogi składają się:

- system zasilania hydraulicznego,
- cztery siłowniki liniowe o skoku 250 mm,
- elektroniczny system sterujący Flex Test IICTC,
- oprogramowanie RPC III (Remote Parameter Control).

Symulator pozwala na pracę w zakresie częstotliwości do 100 Hz i sile do 25 kN. Często symulatory drogi zabudowywane są w komorach klimatycznych umożliwiających odtworzenie odpowiednich warunków klimatycznych w wymaganym czasie. Do sterowanych parametrów klimatycznych należą: temperatura w zakresie  $-30$  do  $+60$  °C, wilgotność powietrza, parametry (zapewnienie natężenia) promieniowania podczerwonego i ultrafioletowego. Parametry te można sterować według zdefiniowanego programu.

Stosując hydrauliczne symulatory drogi możliwym jest znaczne skrócenie czasu trwania próby. Sygnał zapisany w czasie jazdy po drodze testowej jest poddawany edycji. Eliminowane są z niego odcinki zawierające obciążenia nieistotne z punktu widzenia badań. Przy pewnym doświadczeniu można świadomie zwiększyć obciążenia jednocześnie skracając czas próby [3]. Zapisany sygnał z drogi można odtwarzać wielokrotnie z dostateczną powtarzalnością na kolejnych wersjach pojazdów. W przypadku badań wibroakustycznych można powtarzać wielokrotnie ten sam sygnał w celu oceny wpływu poszczególnych zmian konstrukcyjnych na zachowanie się obiektu badań.

## 2. System sterowania hydraulicznego symulatora drogi

Sygnały sterujące hydraulicznym symulatorem drogi przeważnie są wynikiem odwzorowania rzeczywistego profilu drogi. Do zapisu tych sygnałów stosowane są rejestratory analogowo-cyfrowe zapisujące przebiegi rejestrowanych parametrów w postaci plików cyfrowych na dysku sztywnym. Rejestratory mogą współpracować z dowolnymi czujnikami przetwarzającymi wielkości fizyczne na proporcjonalny sygnał analogowy. Najczęściej rejestrowanymi wielkościami fizycznymi są przemieszczenia, przyspieszenia, siły, odkształcenia i temperatury.

Do odtwarzania obciążeń dynamicznych w warunkach laboratoryjnych powszechnie stosowane są siłowniki hydrauliczne sterowane zaworami o specjalnej konstrukcji zwane zaworami Mooga. Zawory te oprócz funkcji sterującej pełnią również rolę wzmacniaczy hydraulicznych z ujemnym wewnętrznym sprzężeniem zwrotnym. Schemat takiego zaworu przedstawiono na rys. 3a, zaś na rys. 3b przebieg sygnałów sterujących siłownika. Żądany sygnał  $Z$  uzyskiwany w warunkach rzeczywistych przetwarzany jest na sygnał cyfrowy  $Z_0$ . Sygnał ten po przetworzeniu przez kartę cyfrowo-analogową ulega przetworzeniu na sygnał analogowy  $Z_1$  sterujący ruchem zwory połączonej z iglicą wzmacniacza hydraulicznego. Poprzez układ kalibrowanych otworów, ruch iglicy  $Z_2$  steruje zmianą przepływu oleju, co określono przez  $Z_3$ . Zmiany ilości oleju sterują tłoczkiem rozdzielacza. Ruch tłoczka rozdzielacza  $Z_4$  steruje ilością oleju dostarczanego do siłownika  $Z_5$ . W siłowniku sygnał ten jest przetwarzany na przesunięcie tłoka, które oznaczono jako sygnał  $Z_6$ . Ruch tłoka jest rejestrowany przez czujnik przesunięcia w postaci

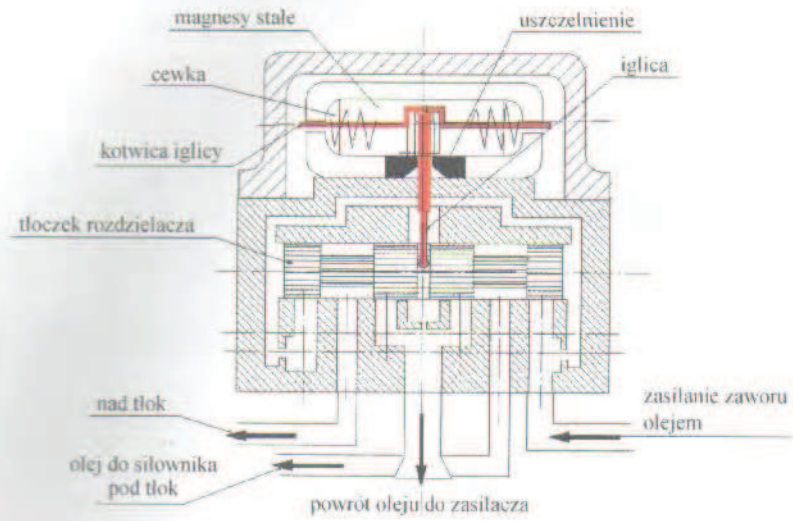




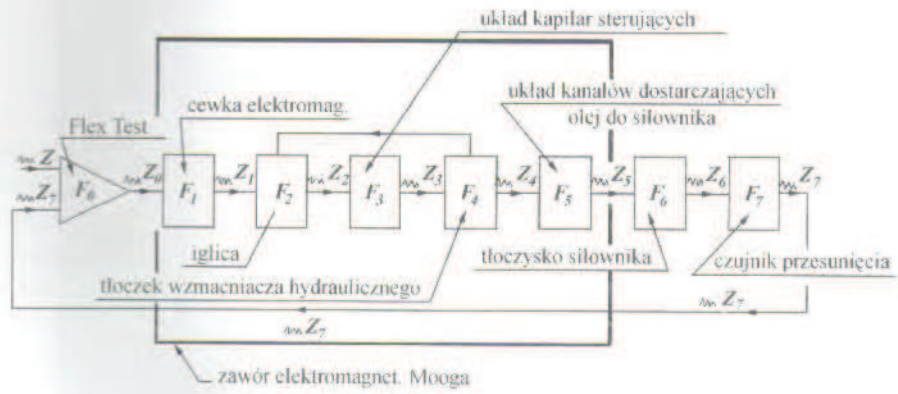
Rys. 1. Widok stanowiska hydraulicznego symulatora drogi.  
Fig. 1. Road simulator view.



Rys. 2. System sterujący Flex Test II CTC.  
Fig. 2. Road simulator controller Flex Test II CTC.



Rys. 3a. Schemat zaworu sterująco-wzmacniającego Mooga.  
 Fig. 3a. How does Moog servovalve work.



Rys. 3b. Schemat przebiegu sygnałów sterujących siłownikiem.  
 Fig.3b. Drive signal for actuator.

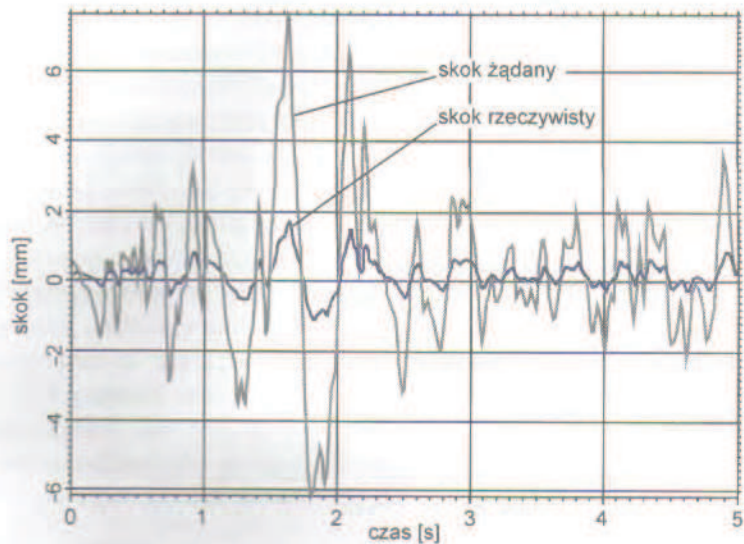


sygnału analogowego  $Z_7$ . Sygnał ten wraca do sterownika Flex Test, gdzie jest porównywany z sygnałem zadany  $Z$ . Wierność realizacji wymuszeń można ocenić przez porównanie sygnału zadanego z sygnałem odpowiedzi. Opisany zawór Mooga realizuje wewnętrzne sprzężenie zwrotne między ruchem tłoczka rozdzielacza i oddziaływania cewki sterującej, czyli między sygnałami  $Z_2$  i  $Z_4$ . Sygnały od  $Z_1$  do  $Z_7$  ulegają kolejnym przekształceniom, które można przedstawić w postaci odpowiednich funkcji przejścia  $F$ . Funkcje te wynikają z istnienia oporów hydraulicznych, tarcia, oporów bezwładności itp., występujących w kolejnych elementach układu. Aby uzyskać równość sygnałów na wyjściu i na wejściu, musi być korygowany sygnał wejściowy  $Z_1$ . W przypadku ruchów powolnych nie następuje to problemów. Komplikacje pojawiają się przy sygnałach losowych o dużej częstotliwości, a taki charakter mają wymuszenia występujące w eksploatacji. Dzięki zastosowaniu odpowiednich programów matematycznych system sterujący RPC III pozwala na realizację takich przebiegów wymuszeń na założonym poziomie dokładności odwzorowań zarówno w dziedzinie amplitud jak i faz. Wymaga to odpowiedniego zdefiniowania przebiegów sygnałów i temu zagadnieniu będą poświęcone kolejne rozdziały.

### 3. Odtwarzanie profilu drogi

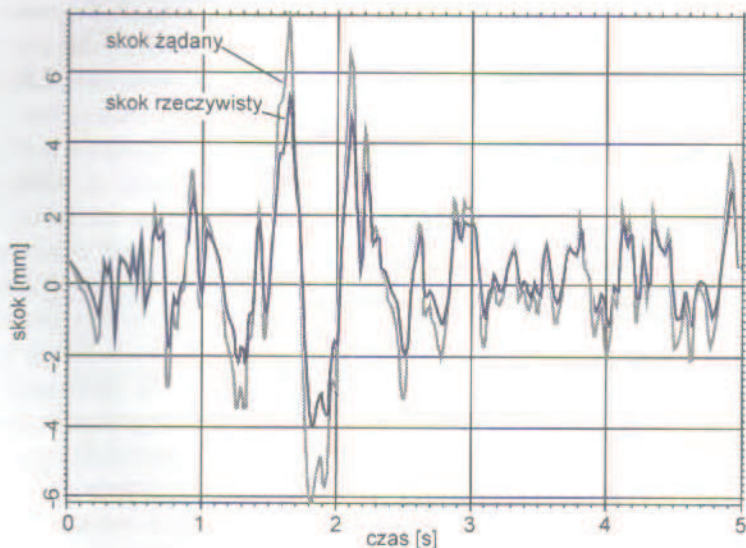
Przy sterowaniu sygnałem pochodzącym od profilu drogi, przetworniki przemieszczenia rejestrują ruchy wybranych punktów zawieszenia zespołów lub nadwozia względem nadwozia dla wszystkich czterech kół pojazdu [4]. Tak zapisany sygnał jest poddawany edycji i ocenie. Edytor sygnałów pozwala na wybranie odcinka pomiarowego drogi i ewentualne usunięcie nieistotnych fragmentów z punktu widzenia badań. Usunięcie fragmentu przebiegu w jednym kanale pomiarowym powoduje usunięcie zapisów w tych samych przedziałach czasowych dla pozostałych kanałów. Oznacza to więc usunięcie określonego odcinka zarejestrowanego toru prób dla wszystkich czterech kół pojazdu. Nieciągłości sygnału są wygładzane przy użyciu odpowiedniego programu. Tak przygotowany sygnał nazywa się sygnałem odpowiedzi pojazdu na wymuszenia pochodzące od drogi, po której pojazd się poruszał. Zadanie układu sterującego symulatorem drogi polega na takim sterowaniu ruchami siłowników, aby w dziedzinie czasu uzyskać taki sam sygnał odpowiedzi z czujników zainstalowanych w samochodzie, jaki uzyskiwano w trakcie jazdy po drodze.

Jak już wspomniano w poprzednim rozdziale, układ sterowania (zawór Mooga) i siłowniki hydrauliczne powodują amplitudowe i fazowe zniekształcenia sygnału odpowiedzi w stosunku do sygnału zadawanego. Zależności te są nieliniowe i inne dla każdego egzemplarza zaworu i siłownika. Różnice w charakterystykach dynamicznych siłowników zależą od wielu czynników, wśród których najistotniejsze to : parametry pętli sprzężenia zwrotnego, charakterystyki dynamiczne zaworów, stan techniczny siłowników itp. W związku z tym koniecznym jest tworzenie indywidualnych charakterystyk dynamicznych siłowników określanych jako funkcje odpowiedzi częstotliwościowej FRF (Frequency Response Function). Funkcję FRF traktowaną jako liniową dla poszczególnych iteracji opracowuje się wprowadzając sygnał szumu białego (o ograniczonym paśmie częstotliwości) na wejście siłownika i rejestrując sygnał odpowiedzi. Funkcja FRF służy do wypracowywania skorygowanych sygnałów sterujących siłownikami tak aby uzyskać zgodność z opracowanymi uprzednio sygnałami odpowiedzi badanego obiektu.



Rys. 4. Przebiegi przemieszczeń koła względem nadwozia.  
 linia gruba przebieg zarejestrowany w czasie badań drogowych  
 linia cienka przebieg uzyskany na symulatorze po pierwszej iteracji.

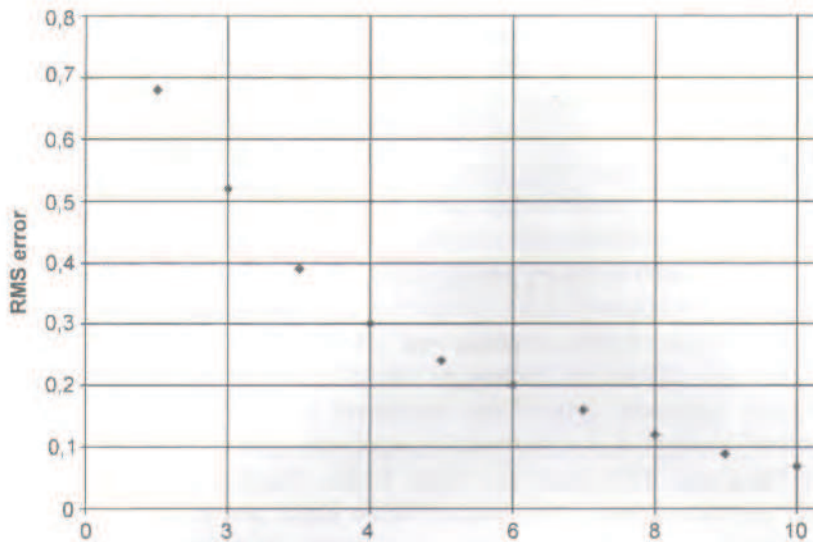
Fig. 4 Tire displacement versus car body:  
 thick line signal recorded on test road  
 thin line response signal on road simulator after first iteration.



Rys. 5. Przebiegi przemieszczenia koła względem nadwozia.  
 linia gruba przebieg uzyskany podczas badań drogowych:  
 linia cienka przebieg po ósmej iteracji.

Fig. 5 Tire displacement versus car body  
 thick line signal recorded on test road  
 thin line response signal on road simulator after first iteration.





Rys. 6. Przebieg błędów RMS po kolejnych iteracjach.

Fig. 6. RMS errors after consecutive iterations.

Początkowo sygnały odpowiedzi są znacząco różne od oczekiwanych to znaczy od tych, które zostały zarejestrowane na torze prób — rys. 4. Różnice między sygnałem odpowiedzi na symulatorze i sygnałem odpowiedzi na drodze w połączeniu z funkcją odpowiedzi częstotliwościowej, stanowią dane do wypracowania następnego sygnału sterującego, który da sygnał odpowiedzi obciążony już mniejszym błędem niż poprzedni i bliższy temu co zarejestrowano na drodze. Metodą kolejnych iteracji weryfikowanych przez system uzyskuje się sygnał o dobrej zgodności z zamierzonym. Na rys. 5 przedstawiono przebiegi sygnałów po ósmej iteracji, a na rys. 6 ich błędy RMS ( Root Mean Square) w kolejnych iteracjach.

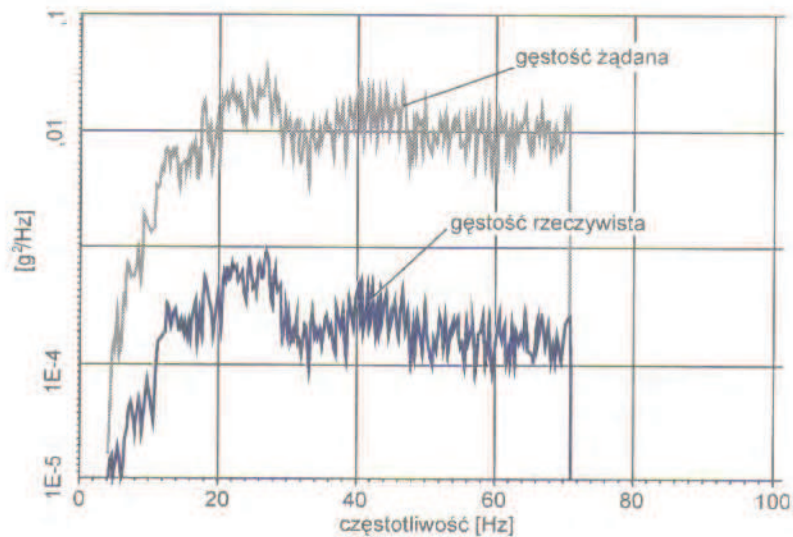
#### 4. Odtwarzanie gęstości widmowej mocy

Symulator drogi może być również wykorzystywany do wibracyjnych badań trwałościowych zespołów pojazdów. Ruch pojazdu w warunkach rzeczywistych powoduje drgania jego podzespołów. Pochodzą one od profilu pokonywanej drogi, drgań wzbudzanych przez zespół napędowy i niewyrównoważenia ciał będących w ruchu obrotowym. Do badań tych drgań mogą być użyte przetworniki przyspieszeń zamontowane na badanym zespole. Zarejestrowany sygnał przetwarzany jest do postaci gęstości widmowej mocy i stanowi opis obciążeń dynamicznych, jakie należy wytworzyć w warunkach laboratoryjnych.

Kolejne kroki postępowania w celu zdefiniowania sygnału ruchu siłownika wzbudzającego drgania symulatora są podobne do tych, jakie podejmowano w czasie badań trwałościowych w przypadku odtwarzania obciążeń dynamicznych w dziedzinie czasu.

Zasadnicza różnica polega zaś na tym, że kolejne kroki iteracji mają dać w wyniku gęstość widmową mocy przyspieszeń, zgodną z zapisaną na torze prób. Wypracowany sygnał sterujący steruje skokiem siłownika hydraulicznego, zaś sygnał odpowiedzi jest czytany z przetwornika przyspieszenia zamontowanego na badanym zespole. Relacje między ruchem siłownika a sygnałem gęstości widmowej mocy przyspieszenia opisuje funkcja odpowiedzi częstotliwościowej FRF siłownika traktowana jako liniowa dla poszczególnych iteracji. Aby utworzyć funkcję FRF należy sterować skokiem siłownika z zamontowanymi elementami mocującymi badany zespół, sygnałem szumu i rejestrować sygnał odpowiedzi z przetwornika przyspieszenia.

Sygnał gęstości widmowej mocy przetworzony przez funkcję FRF daje w wyniku pierwsze przybliżenie sygnału sterującego siłownikiem. Siłownik sterowany tym sygnałem generuje odpowiedź badanego obiektu. Ta odpowiedź jest porównywana z oczekiwanym sygnałem odpowiedzi zapisanym na torze prób. Różnica pomiędzy tymi sygnałami stanowi o wypracowaniu poprawek sygnału sterującego dla kolejnej iteracji. Jednocześnie obliczany jest błąd RMS. Proces wprowadzania kolejnych modyfikacji sygnału sterującego i oceny błędu RMS jest powtarzana wielokrotnie, zwykle do chwili, kiedy błąd osiągnie najmniejsze wartości. Na rysunku 7 przedstawiono dla stanowiska do badań chłodnicy, przebiegi sygnałów gęstości widmowej mocy dla zerowej iteracji, a na rysunku 8 dla piętnastej iteracji. Na rysunku 9 zilustrowano przebieg błędów RMS gęstości widmowej mocy przyspieszeń w funkcji kolejnych iteracji.



Rys. 7. Przebiegi gęstości widmowej mocy w badaniach chłodnicy:

linia górna — przebieg zarejestrowany podczas badań drogowych

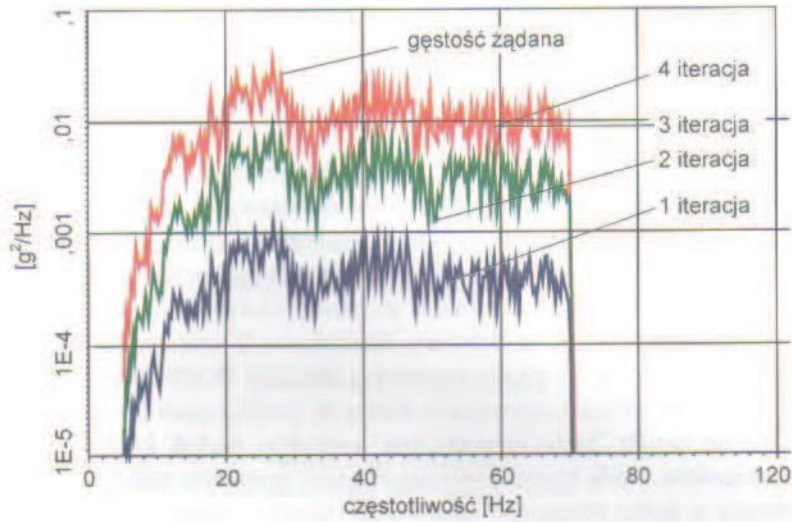
linia dolna — po zerowej iteracji.

Fig. 7. Power spectrum density for cooling system:

upper line — signal recorded on test road

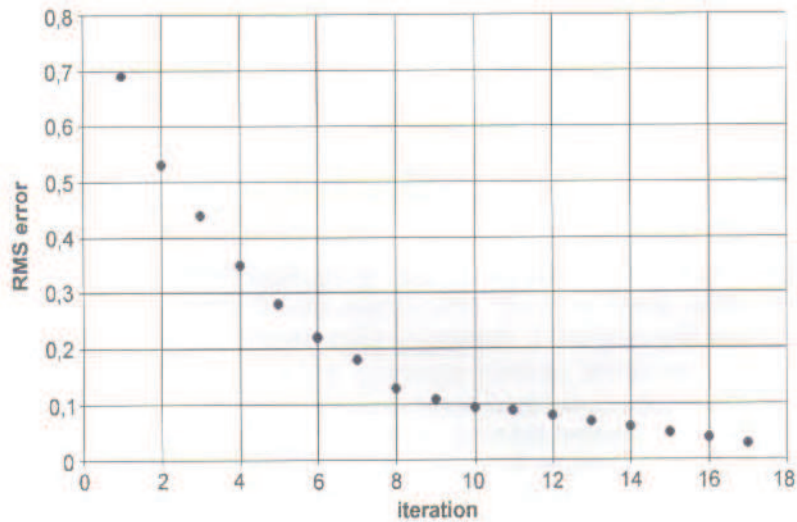
lower line — response signal after iteration number 0.





Rys. 8. Przebiegi gęstości widmowej w badaniach chłodnicy po piętnastej iteracji. Praktycznie przebiegi: realizowany i zadany pokrywają się.

Fig. 8. Power spectrum density for cooling system after 15-th iteration. Required signal and response signal are almost the same.



Rys. 9. Przebieg błędów RMS w funkcji kolejnych iteracji dla badań chłodnicy samochodu.

Fig. 9. RMS errors after consecutive iterations for consecutive iterations of cooling assembly.

## 5. Zakończenie i wnioski

Niniejsza publikacja jest prezentacją możliwości badawczych stanowiska hydraulicznego symulatora drogi. Przedstawiono możliwości definiowania sygnałów sterujących. Oceniono poziom błędów realizacji w stosunku do sygnałów zadanych. Wykazano, że z obszernego zapisu obciążeń dynamicznych rejestrowanych w trakcie badań trakcyjnych można wyodrębnić takie fragmenty, które zastosowane do sterowania wymuszeń na symulatorze drogi pozwolą na skrócenie czasu badań i zmniejszenie ich kosztów.

Prace nad zagadnieniami odwzorowań dynamiki pojazdów i ich zespołów na stanowiskach badawczych są wykonywane w ramach działalności statutowej OBR SM BOSMAL pod kierownictwem dr hab. inż. Kazimierza Romaniszyna. Obszar dalszych prac zespołu został zawarty w planie rocznym OBR SM BOSMAL na lata 2001–2002 i nakreślony w [5]. W przygotowywanych dalszych publikacjach poświęconych tematyce badań dynamicznych, będą przedstawione metodyki badań konkretnych zespołów i całych samochodów. Będą zaprezentowane również metodyki badań akustycznych, tak bardzo istotnych w dobie rosnącego stosowania tworzyw sztucznych w budowie samochodów.

## Literatura

- [1.] KAMIŃSKI E., POKORSKI J.: *Dynamika zawieszzeń i układów napędowych pojazdów samochodowych*. WKŁ Warszawa 1982.
- [2.] KULISIEWICZ M., PIĘSIĄK St.: *Metodologia modelowania i identyfikacji mechanicznych układów dynamicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
- [3.] NEWLAND D.E.: *Random vibrations and spectral analysis*. Longman, New York 1984.
- [4.] KASPRZYK T., PROCHOWSKI L.: *Obciążenia dynamiczne zawieszzeń*. WKŁ Warszawa 1990.
- [5.] ROMANISZYN K. M.: *Propozycja poszerzenia możliwości badawczych hydraulicznego symulatora drogi*, Materiały Konferencji: Polska Mechanika u progu XXI wieku. Kazimierz Dolny — Warszawa, listopad 2001 r. str. 383–387.

## Dynamic tests of vehicles

### Summary

Publication presents contemporary dynamic test methods used for vehicles and assemblies made with hydraulic test rigs. There is presented technology of the tests beginning from load signal definition that are applied to the vehicle during driving on the test road, through the load validation and edition up to exactly controlled and fully monitored fatigue tests in laboratory conditions. Tests prepared this way guarantee high dynamic load re-run accuracy that can be repeated any time.