

## POMIARY PARAMETRÓW SILNIKA POJAZDU Z WYKORZYSTANIEM AKCELEROMETRU

### STRESZCZENIE

W artykule omówiono metodologię wykonywania pomiarów parametrów ruchu pojazdu z wykorzystaniem czujników przyspieszenia. Przedstawiony został sposób kalibracji statycznej czujnika pozwalający m.in. na znaczne ograniczenie błędu wnoszonego do pomiaru wynikającego z niedokładnego zamontowania akcelerometru na obiekcie, którego parametry ruchu są mierzone. Oprócz samego pomiaru trajektorii poruszania się pojazdu, przedstawiono również metodę uzyskiwania informacji na temat głównych parametrów silnika (maksymalny moment i moc) oraz tworzenia ich przebiegów w odniesieniu do prędkości obrotowej.

**Słowa kluczowe:** pomiar przyspieszenia, pomiary momentu i mocy, przenośna hamownia

### MEASURING VEHICLE ENGINES PARAMETERS WITH ACCELEROMETER

In this paper, techniques of vehicle movement parameters measurements using acceleration sensors has been discussed. Author has described a method of acceleration and vehicle speed acquisition and evaluating characteristics of engines torque and power.

**Keywords:** acceleration measurements, torque and power measurements, portable dynamometer

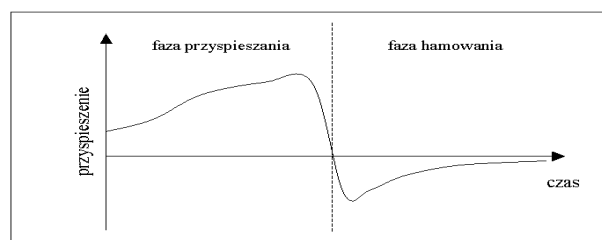
### 1. WSTĘP

Obecnie akcelerometry stają się coraz bardziej popularne. Do niedawna stosowane głównie przez wojsko w układach nawigacyjnych rakiet, dziś dzięki zarówno przystępnej cenie, jak i wciąż wzrastającej dokładności pomiarów realizowanych przez nie, stwarzają nowe możliwości budowania systemów o znacznej integracji, pozwalających na wykonanie całego wachlarza pomiarów, przy znikomej ingerencji w obiekt pomiarowy.

Przykładem może być zastosowanie akcelerometru do pomiaru trajektorii ruchu pojazdu, gdzie przy użyciu tylko tego czujnika jesteśmy w stanie określić przyspieszenie, prędkość, przebytą drogę, ale także moc i moment obrotowy silnika samochodu, w którym go zainstalowano. Cały pomiar odbywa się bez jakiegokolwiek ingerencji w instalację samochodu, bez zastosowania dodatkowych elementów mechanicznych, a także bez specjalnego stanowiska pomiarowego.

Zagadnienie pomiaru przyspieszenia z wykorzystaniem akcelerometrów oraz szczegóły budowy systemu pomiarowego prezentowanego w tym artykule zostały szeroko omówione w pracy magisterskiej autora [1]. Przedstawiony został w niej mikroprocesorowy układ pomiarowy oparty na czujniku przyspieszenia, pozwalający na uzyskanie wyników pomiaru kilku różnych wielkości z dokładnością porównywalną z wyspecjalizowanymi urządzeniami pomiarowymi.

Główną różnicą w działaniu systemu zwiększającą dokładność pomiaru względem innych urządzeń tego typu jest dwustopniowy pomiar, podzielony na fazę przyspieszania i hamowania (rys. 1). Rejestracji podlega zarówno moment rozpędzania się pojazdu, jak i powolnego samoczynnego wyhamowywania pod wpływem sił tarcia i oporów powietrza.



Rys. 1. Przebieg przyspieszenia podczas standardowego pomiaru

Dzięki analizie fazy hamowania, możliwe jest wyznaczenie współczynników założonego modelu charakteryzującego opory działające na pojazd w czasie ruchu [4]. Zaniedbanie ich prowadzi do znacznych zaniżeń wartości mierzonych parametrów, co powoduje znaczny wzrost niedokładności pomiaru w innych urządzeniach działających na podobnej zasadzie.

### 2. UKŁAD POMIAROWY

Do celów badawczych zbudowany został system mikroprocesorowy oparty na czujniku przyspieszenia firmy Analog Devices [5] (rys. 2). Urządzeniem nadrzędnym zarządzającym pomiarem przyspieszenia, mierzącym czas, nadzorującym zapis do pamięci jest procesor ATMEGA 8 [6]. Dane pomiarowe zapisywane są w pamięci nieulotnej DataFlash. Głównymi atutami systemu są: duża integralność i niska cena.

Urządzenie pozwala na rejestrację wartości przyspieszenia wzdłuż jednej z osi akcelerometru. Przy założeniu, że zostało ono przymocowane do karoserii pojazdu wzdłuż jej osi w sposób niepozwalający na ruchy względem niej (np. do dachu lub deski rozdzielczej), jako wynik pomiaru

\* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Metrologii

otrzymuje się przebieg przyspieszenia samochodu w czasie. Sposób zamocowania może mieć wpływ na czułość akcelerometru oraz na offset wartości. W rozdziale 3 opisano po krótko metodę korekcji wyników bazującą na wstępnym rozpoznaniu ustawienia czujnika w przestrzeni.

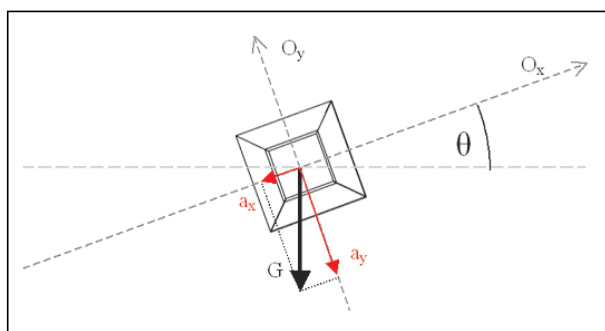


Rys. 2. Wygląd rejestratora zbudowanego do celów badawczych

Integralną częścią systemu jest aplikacja komputerowa dokonująca obliczeń na zarejestrowanych danych oraz przeprowadzająca wizualizację otrzymanych wyników. W rozdziale 5 przedstawiono symulację działania całego systemu poczynając od rejestracji sygnału przyspieszenia, poprzez algorytmy filtracji i korekcji, aż do prezentacji wyników. W rozdziale 6 zaprezentowany został efekt działania systemu w warunkach rzeczywistych. Dokonano również porównania wyników z profesjonalnym urządzeniem pomiarowym [2].

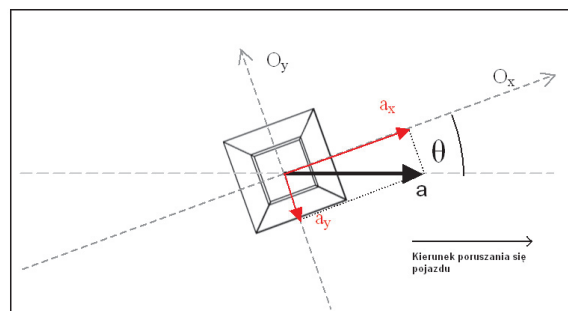
### 3. AUTOKALIBRACJA

Bardzo poważnym problemem przy pomiarach z wykorzystaniem czujników przyspieszenia i zarazem krytycznym warunkiem osiągnięcia poprawnych wyników jest ustawienie aktywnej osi czujnika wzdłuż wektora przyspieszenia pojazdu. System jest w stanie automatycznie zniwelować wpływ odchylenia w płaszczyźnie pionowej.



Rys. 3. Rozkład wektorów przyspieszeń wzdłuż poszczególnych osi akcelerometru w czasie postoju

Pomiar kalibrujący jest wykonywany przed rozpoczęciem pomiaru właściwego. Polega on na pomiarze przyspieszeń wzdłuż osi czujnika w czasie postoju pojazdu (rys. 3). Na tej podstawie estymowana jest wartość kąta  $\theta$ . Przyspieszenie ziemskie wprowadza stały offset do wartości zmierzonego przyspieszenia.



Rys. 4. Rozkład wektorów przyspieszeń w czasie pomiaru

Odchylenie osi akcelerometru od poziomu powoduje również zmianę czułości przyrządu. Wynik pomiaru jest zaniżony w stosunku do rzeczywistej wartości. Sytuację przedstawia rysunek 4. Czułość urządzenia spada wraz ze zwiększaniem kąta  $\theta$ . Aby zniwelować ten wpływ, wartość przyspieszenia wzdłuż osi  $O_x$  otrzymana w wyniku pomiaru zostaje przeliczona zgodnie z zależnością (1).

$$a = a_x \cdot \frac{1}{\cos \Theta} \quad (1)$$

gdzie:

- $a$  – przyspieszenie pojazdu,
- $a_x$  – przyspieszenie wzdłuż osi  $x$ ,
- $\Theta$  – kąt odchylenia od pionu.

### 4. ALGORYTM

#### UWZGLĘDNIAJĄCY OPORY RUCHU

Algorytm eliminacji wpływu oporów powietrza i tarcia mechanicznego ruchomych elementów (opony, łożyska, przełożenia w skrzyni biegów) pozwala na skorygowanie krzywych otrzymanych jako wyniki rejestracji. Dzięki takiemu działaniu wykreślone krzywe w większym stopniu odwzorowują prawdziwe przebiegi mierzonych parametrów.

Podstawą działania algorytmu jest analiza przebiegu przyspieszenia (a dokładnie opóźnienia) w fazie swobodnego toczenia się pojazdu. Dzięki niej algorytm jest w stanie wyznaczyć charakterystykę siły oporu od prędkości. Ponieważ znamy opóźnienie tylko w dyskretnych punktach (w których został wykonany pomiar), istnieje potrzeba uogólnienia charakterystyki, a więc przybliżenie jej pewną krzywą, która najlepiej oddaje charakter zjawiska.

Zależność oporów od prędkości poruszania się pojazdu przedstawia wzór [7]:

$$F = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 \quad (2)$$

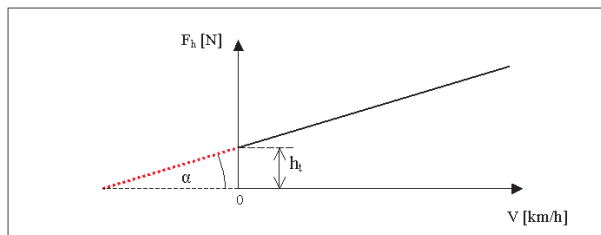
gdzie:

- $F$  – siła oporu,
- $a_0, a_1, a_2$  – współczynniki podstawowego modelu,
- $V$  – prędkość pojazdu.

W praktyce dla małych prędkości wystarczające okazało się zawężenie modelu do dwóch pierwszych członów, dzięki czemu otrzymano liniowe przybliżenie charakterystyki, pozwalające na proste (pod względem obliczeniowym) znajdowanie współczynników metodą najmniejszych kwadratów (rys. 5).

Równaniem opisującym model jest zatem:

$$F = h_t + t g(\alpha) V \quad (3)$$



**Rys. 5.** Uproszczona charakterystyka oporów działających na pojazd w czasie ruchu:  $h_t$  – opór stawiany przez łożyska, opony i przełożenia (niezależny od prędkości),  $\alpha$  – kąt nachylenia charakterystyki

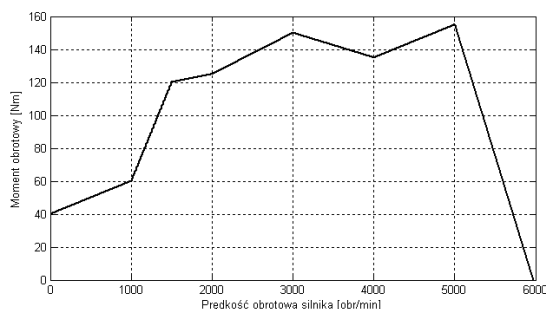
## 5. BADANIA SYMULACYJNE

Celem przeprowadzonych badań symulacyjnych było sprawdzenie poprawności zaproponowanej metody uwzględniającej opory powietrza w czasie wykonywania pomiarów i zbadanie, jak dokładnie pozwala ona oszacować wartości mierzonych wielkości.

Zasymulowano fazę rozpędzania się samochodu od postoju do maksymalnej prędkości na danym biegu, a następnie fazę hamowania pod wpływem oporów powietrza. Pojazdowi nadano niezbędne do przeprowadzenia testu parametry:

- masa 1300 kg,
- promień koła 0,28 m,
- stosunek obrotów do prędkości  $6000/80 \left[ \frac{\text{obr}}{\text{min}} / \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$ .

Przyjęto również arbitralną krzywą opisującą sposób, w jaki silnik generuje moment obrotowy (rys. 6).

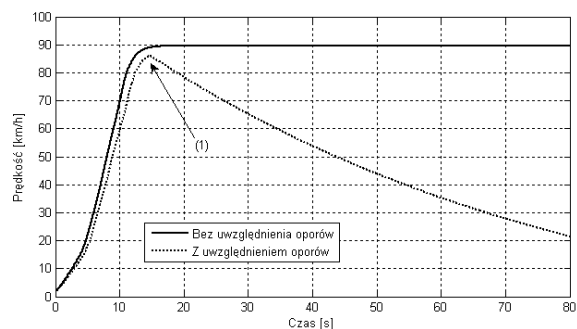


**Rys. 6.** Krzywa momentu obrotowego silnika symulowanego pojazdu

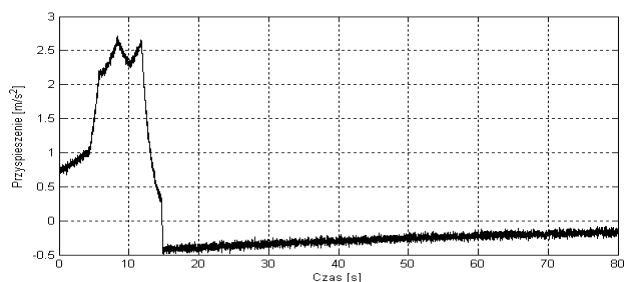
Zgodnie z przyjętymi parametrami samochód poruszał się ze zmiennym przyspieszeniem. Wykres prędkości zarówno z uwzględnieniem, jak i bez uwzględnienia oporów powietrza został przedstawiony na rysunku 7.

Można wyraźnie zaobserwować, że w pierwszym przypadku samochód nie był w stanie osiągnąć prędkości maksymalnej, w momencie kiedy odsprzęgnięto silnik od skrzyni biegów (wciśnięto sprzęgło) (1) jej wartość zaczęła szybko spadać.

Przyspieszenie pojazdu wraz z zakłóceniami (szum normalny o parametrach (0,0.05)) zarejestrowany podczas symulacji przedstawia rysunku 8.

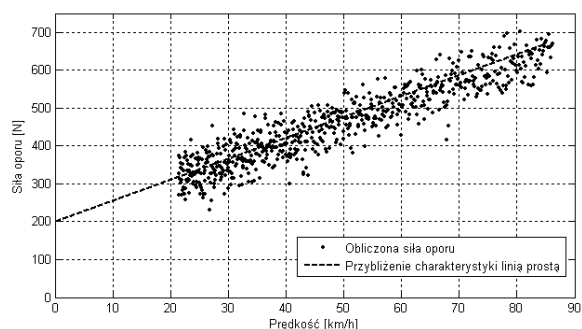


**Rys. 7.** Przebieg prędkości samochodu w czasie symulacji



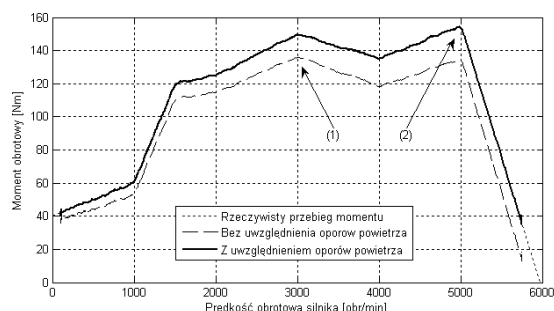
**Rys. 8.** Przyspieszenie pojazdu zarejestrowane w czasie symulacji

W wyniku obserwacji opóźnienia w fazie hamowania została utworzona charakterystyka oporów oddziałujących na pojazd w zależności od jego prędkości (rys. 9) Została ona przybliżona linią prostą z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów [3]



**Rys. 9.** Wykres zależności siły oporu od prędkości pojazdu otrzymany w wyniku rejestracji fazy hamowania

Na rysunku 10 zobrazowany został wynik symulacji pomiaru wykorzystującego algorytm uwzględniający opory powietrza zgodnie z uzyskaną uproszczoną charakterystyką, oraz pomijający występowanie oporów. W drugim przypadku nie dość, że krzywa momentu została poważnie zdeformowana, to wartość maksymalna przebiegu jest znacznie zaniżona oraz wypada ona w zupełnie innym miejscu charakterystyki niż wartość rzeczywista. Błąd rośnie wraz ze zwiększającą się prędkością, osiągając nawet kilka, kilkanaście procent. Oczywiście jest, że taki pomiar nie może zostać uznany za miarodajny.



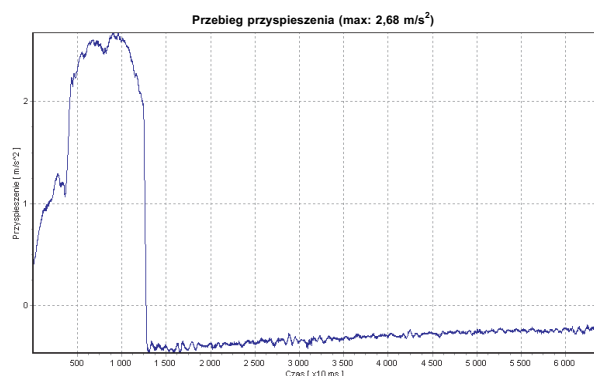
**Rys. 10.** Wykres momentu obrotowego otrzymany w wyniku pomiaru. (1), (2) – Wartości maksymalne przebiegów

Dzięki informacjom zebranych w czasie rejestracji fazy swobodnego wyhamowywania istnieje realna możliwość dokładniejszego wykreślenia krzywej momentu.

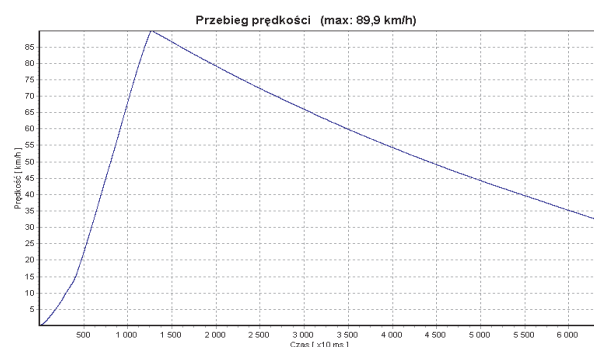
## 6. BADANIA DOŚWIADCZALNE

Wykonanych zostało kilka rejestracji przyspieszenia z przejazdu samochodem Daewoo Nubira. W czasie jazdy testowej samochód przyspieszał na pierwszym lub drugim biegu począwszy od najniższych do najwyższych obrotów osiąganych przez silnik. Pomierzone zostały parametry niezbędne do przeprowadzenia dalszych obliczeń, takie jak: masa, promień kół, zbadało stosunek prędkości do obrotów silnika na danym biegu.

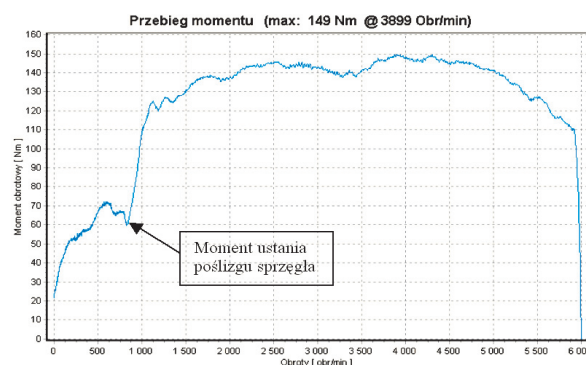
Na rysunkach 11–15 przedstawiono wynik rejestracji oraz kolejne etapy przeliczania danych. Przebiegiem zachowanym w pamięci urządzenia jest przyspieszenie mierzone w odstępach 10 ms (rys. 11).



**Rys. 11.** Przebieg przyspieszenia w czasie jazdy testowej



**Rys. 12.** Przebieg prędkości w czasie jazdy testowej

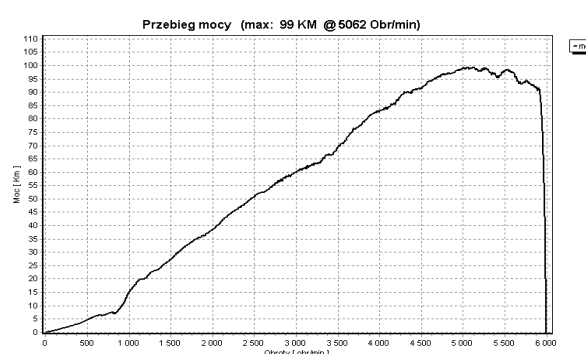


**Rys. 13.** Zależność momentu obrotowego od obrotów (bez korekcji)

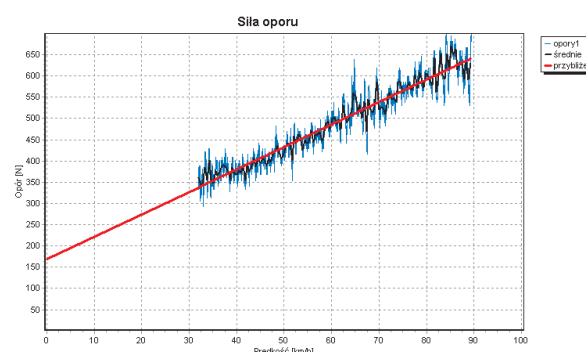
Na drodze całkowania z przebiegu przyspieszenia otrzymano przebieg prędkości (rys. 12).

Dzięki znajomości przełożenia skrzyni biegów (znany jest stosunek obr./prędkość) możliwe jest wykreślenie zależności maksymalnego momentu obrotowego generowanego przez silnik w zależności od obrotów (rys. 13). Wyraźnie widoczne jest zaburzenie przebiegu momentu spowodowane całkowitym sprzęgnięciem silnika ze skrzynią biegów (ustaniem poślizgu sprzęgła) przy niskich obrotach i powstaniem charakterystycznego szarpnięcia.

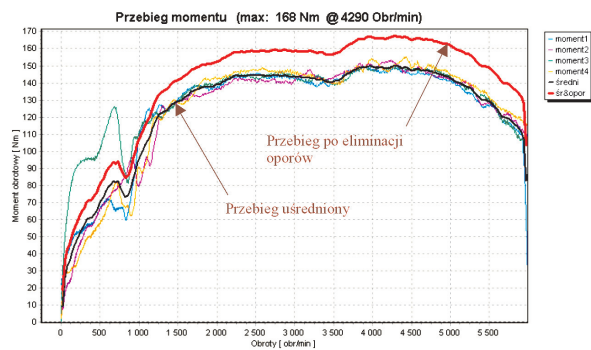
W następnej kolejności obliczana jest moc silnika (rys. 14). Tworzony jest również wykres zależności siły oporu od prędkości (rys. 15). Aplikacja komputerowa pozwala na jednoczesne wyświetlenie wyników rejestracji kilku przejazdów i ich uśrednienie.



**Rys. 14.** Zależność mocy maksymalnej od obrotów



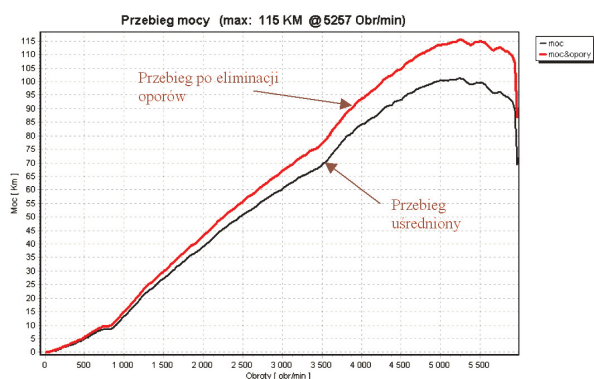
**Rys. 15.** Zależność siły oporu działającej na samochód w zależności od prędkości oraz przybliżenie prostą



Rys. 16. Wynik uśrednień oraz działania algorytmu eliminacji oporów dla przebiegu momentu obrotowego

Dzięki tej operacji możliwe jest zniwelowanie szumów i losowych sygnałów rejestrowanych przez akcelerometr takich jak drgania karoserii samochodu. Na rysunku 16 przedstawiony został ostateczny efekt działania aplikacji. Cztery rejestracje zostały uśrednione oraz naniesione zostały poprawki związane z uwzględnieniem oporów powietrza.

Podobnym obróbkom podany został przebieg mocy. Wynik przedstawiony został na rysunku 17.



Rys. 17. Wynik uśrednień oraz działania algorytmu eliminacji oporów dla przebiegu mocy

W obu przypadkach wyraźnie widać, jak silny wpływ na kształt krzywej miały opory powietrza, które znacznie zaniżały wartości mierzonych parametrów.

## 7. OCENA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

Otrzymane wykresy momentu i mocy silnika zostały porównane z wykresami z hamowni. Firma „Rototest Reserch Institute” udostępniła w Internecie [2] przebiegi momentu i mocy samochodu Daewoo Nubira 2,0 98 kW zarejestrowane na hamowni spełniającej wymogi ISO 1585 (Standard określający metodę badania mocy i momentu silników spalinyowych oraz sposób prezentowania wyników).

Na rysunku 18 porównano wykresy otrzymane poprzez pomiar przyspieszenia oraz na profesjonalnej hamowni.

Zarówno przebieg momentu obrotowego, jak i mocy jest bardzo zbliżony do charakterystyki wzorcowej. System dokładnie wskazał miejsca występowania maksymalnych wartości.



Rys. 18. Porównanie wyników otrzymanych w czasie testów prezentowanego systemu pomiarowego z wykresami otrzymanymi na hamowni [2]. Linie ciągłe – przebiegi otrzymane na hamowni, Linie przerywane – przebiegi otrzymane w wyniku testu

## 8. PODSUMOWANIE

W pracy wykazano, że za pomocą czujników przyspieszenia, pośrednio można dokonywać nie tylko pomiaru prędkości, ale i też mocy i momentu obrotowego silników samochodowych. Cyfrowe urządzenia pomiarowe wykorzystujące akcelerometry otwierają nowe możliwości tworzenia przenośnych, tanich i dokładnych systemów pomiarowych, które mogą stanowić ciekawą propozycję szczególnie dla ludzi zajmujących się tuningiem samochodów.

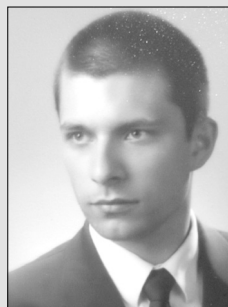
Do zalet przedstawionego systemu pomiarowego można zaliczyć: łatwość zainstalowania systemu w obiekcie pomiarowym (np. samochodzie), brak jakichkolwiek dodatkowych połączeń elektrycznych, wysoka integralność systemu, małe rozmiary, pośredni pomiar wielu wielkości (droga, prędkość, moc, moment, opory powietrza), niska cena elementów konstrukcyjnych, możliwa do osiągnięcia duża dokładność pomiaru dzięki uśrednianiu wyników.

Wadami przedstawionego rozwiązania są: potrzeba wykonywania testu na równym, prostym i długim odcinku drogi, znaczny wpływ nierówności asfaltu oraz drgań karoserii na wynik pomiaru. Bardzo niekorzystnym czynnikiem jest również wiatr wprowadzający dodatkową zmienność oporów powietrza.

**Literatura**

- [1] Nowik M.: *Zastosowanie czujników przyspieszeń do pomiarów parametrów ruchu pojazdów*. Kraków, Wydział EAIiE AGH (Praca magisterska pod przew. dr. hab. inż. A. Bienia)
- [2] Strona internetowa firmy Rotor Reserch Institute ([www.rri.se](http://www.rri.se))
- [3] Zieliński T.P.: *Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Kraków, Wydział EAIiE AGH 2002
- [4] J. Gajda, M. Szyper.: *Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych*. Kraków, Wydział EAIiE AGH 1998
- [5] „ADIS16201 Datasheet” Analog Devices, 2007
- [6] „ATmega 8 Datasheet” Atmel Corporation, 2006
- [7] Resnick R., Halliday D.: *Fizyka*. PWN 2006

Wpłynęło: 14.12.2008

**Mateusz NOWIK**

Urodzony 21 marca 1984 w Tarnowie. Ukończył III liceum ogólnokształcące w Tarnowie. W latach 2004–2008 student Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie na wydziale EAIiE, kierunek elektrotechnika. Członek koła naukowego ECART. W czerwcu 2008 otrzymał tytuł magistra inżyniera. Obecnie student pierwszego roku studiów doktoranckich, pracownik prywatnej firmy na stanowisku „programista systemów wbudowanych”.

Zainteresowania: mikroprocesorowe systemy pomiarowe.

e-mail: [mateusz.nowik@agh.edu.pl](mailto:mateusz.nowik@agh.edu.pl)