

## OKREŚLENIE PARAMETRÓW RUCHU POJAZDU NA PODSTAWIE RÓŻNYCH METOD PRZETWARZANIA SYGNAŁÓW PRZYSPIESZENIA

Józef GROMBA, Sylwester SOBIERAJ, Grzegorz SIEKLUCKI, Andrzej BIENIŃ

1. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
tel.:799-252-469 e-mail:jozefgromba@gmail.com
2. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
tel.:793-922-505 e-mail: sobieraj2@gmail.com
3. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
tel.:607-280-696 e-mail: sieklo@agh.edu.pl
4. AGH w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
tel.:502-657-962 e-mail: abien@agh.edu.pl

**Streszczenie:** Celem pracy jest zaprezentowanie sprawdzenia poprawności tezy, czy możliwe jest określenie wartości chwilowych mocy pojazdu pod kątem ich wykorzystania do wyznaczenia charakterystyki mechanicznej silnika spalinowego, elektrycznego lub napędu hybrydowego, podczas eksperymentów ruchowych pojazdu. Artykuł poświęcony jest różnym sposobom przetwarzania danych pomiarowych, uzyskanych z akcelerometru 3D w trakcie ruchu pojazdu.

**Słowa kluczowe:** akcelerometr, dynamika ruchu, moc, przyspieszenie, prędkość pojazdu, rejestracja ruchu pojazdów.

### 1. WPROWADZENIE

Motoryzacja jest obecnie jedną z najbardziej rozwiniętych gałęzi przemysłu, ponieważ szybki rozwój technologiczny pozwolił na budowę zróżnicowanych, wysokowydajnych jednostek napędowych: spalinowych, hybrydowych, elektrycznych oraz na zastosowanie różnego rodzaju rozwiązań technologicznych mających na celu zwiększenie bezpieczeństwa i komfortu podróżujących oraz zwiększenie wydajności pojazdów. Niektóre z systemów wspomagających kierowcę (np. ESP, ASR) mogą powodować powstawanie problemów podczas próby określenia parametrów silnika pojazdu. Obecnie budowane są specjalistyczne, a co za tym idzie kosztowne hamownie, wykorzystujące możliwie najnowsze technologie. Ich zadaniem jest umożliwienie przeprowadzenia szczegółowej analizy ruchu pojazdu, przyspieszenia, wyznaczenia charakterystyk statycznych oraz dynamicznych silnika.

Niniejsza praca ma na celu przedstawienie możliwości wykorzystania powszechnie stosowanych akcelerometrów do pomiarów parametrów układu napędowego pojazdów. Akcelerometry są obecnie umieszczane w większości z dostępnych na rynku smartphonach, co poprawia ich walory użytkowe. Ich główną zaletą są bardzo dobre parametry oraz łatwość wykorzystania do pomiarów przyspieszeń pojazdu.

W dalszej części pracy opisano pomiar przyspieszenia pojazdu oraz wykorzystanie różnych metod filtracji i aproksymacji uzyskanych pomiarów do oceny

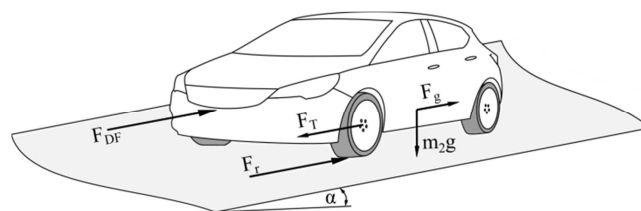
i wyznaczenia parametrów ruchu pojazdu. Omówiono także budowę uogólnionego modelu, przeznaczonego do analizy i optymalizacji parametrów energetycznych pojazdów.

### 2. RUCH PROSTOLINIOWY POJAZDU I OPORY ODDZIAŁUJĄCE NA POJAZD

Jako podstawę rozważań przyjmuje się płaski układ sił, które oddziałują na samochód poruszający się ruchem prostoliniowym. Ruch ten możemy dodatkowo podzielić na ruch jednostajny (ze stałą prędkością) oraz ruch zmienny (prędkość zmienna w czasie) rozpatrywany w dalszych rozważaniach. Podstawowy kierunek prostoliniowego ruchu pojazdu określa oś wzdłużna pojazdu, która na ogół jest równoległa do powierzchni podłoża [1, 2].

Na poruszający się samochód oddziałuje szereg sił, które mogą powodować boczne przemieszczenia pojazdu, poślizg kół napędowych, bądź galopowanie wzdłużne, a co za tym idzie zaburzenia w ruchu prostoliniowym pojazdu [1].

Najistotniejsze siły oddziałujące na poruszający się pojazd przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Siły oddziałujące na pojazd

Należą do nich:

Siła trakcyjna pojazdu:

$$F_T = (M_e(\omega_m) - \Delta M) \frac{2i}{d_w} \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta M$  – moment wprawiający w ruch przekładnię,  $i$  – przełożenie przekładni mechanicznej,  $d_w$  – średnica koła,

$\omega_m$  – prędkość obrotowa silnika,  $M_e$  – moment obrotowy silnika.

Siła związana z całkowitymi oporami tarcia, które zostały wyznaczone jako sumaryczny opór wszystkich kół:

$$F_r = f_r m_2 g, \quad f_r = f_0 \left(1 + \frac{v}{161}\right) \quad (3)$$

gdzie:  $v$  – prędkość pojazdu wyrażona w km/h,  $f_0$  – współczynnik tarcia związany z rodzajem podłoża.

Siła związana z oporem aerodynamicznym:

$$F_{DF} = \frac{1}{2} \rho C_d A (v - v_w)^2 \quad (4)$$

gdzie:  $v_w$  – prędkość wiatru,  $C_d$  – współczynnik oporów powietrza,  $A$  – powierzchnia czołowa pojazdu,  $\rho$  – gęstość powietrza ( $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ).

Siła grawitacji w której uwzględniono kąt nachylenia terenu:

$$F_g = m_2 g \sin(\alpha) \quad (5)$$

gdzie:  $m_2$  – masa pojazdu wyrażona w kg,  $g$  – przyspieszenie ziemskie w  $\text{m/s}^2$ ,  $\sin(\alpha)$  – kąt nachylenia terenu.

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej siły i opory związane z ruchem pojazdu zostały przeniesione na koła pojazdu.

Stosując do powyższych równań drugą zasadę dynamiki Newtona otrzymuje się równanie ruchu pojazdu [6]:

$$m \frac{dv(t)}{dt} = F_T(t) - \underbrace{(F_{DF}(t) - F_r(t) - F_g(t))}_{F'(t)} \quad (6)$$

które stanowi podstawę do dalszych rozważań. Dla uproszczenia rozważań pominięto poślizg, który występuje podczas toczenia się kół. Uproszczenie to jest dopuszczalne w przypadku prezentowanej analizy ruchu bryły pojazdu.

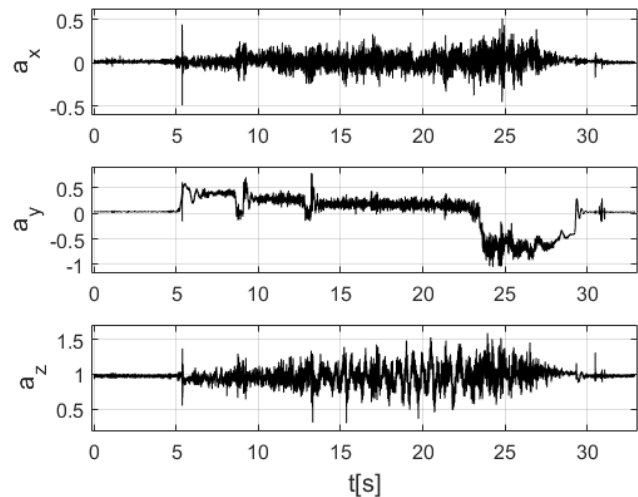
### 3. POMIAR Z WYKORZYSTANIEM TRÓJOSIOWEGO AKCELEROMETRU

Do przeprowadzenia pomiarów przyspieszeń pojazdu wykorzystano telefon Sony Xperia Z1 Compact, który wyposażony jest w akcelerometr firmy BOSCH. Jego istotne parametry to: częstotliwość próbkowania na poziomie 200 Hz, zakres pomiaru od  $-2g$  do  $2g$  oraz 12 bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy.

W celu poprawnego określenia parametrów ruchu pojazdu, przed przystąpieniem do pomiarów przeprowadzono kalibrację urządzenia, w której jako wzorzec przyjęto przyspieszenie ziemskie  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Płaszczyzną niezbędną do poprawnej kalibracji urządzenia była płaska, wypoziomowana powierzchnia na której umieszczono smartphona, a następnie wyznaczono błędy pomiaru przyspieszeń, którym był poddawany [4].

Dla celów pomiarowych, opisany smartphonem umieszczono w pojeździe i skierowano osią Y wzdłużnie do kierunku jazdy [5]. Pomiaru zostały przeprowadzone w bezwietrzny dzień na zamkniętej, pokrytej nawierzchnią bitumiczną drodze o kącie nachylenia  $0^\circ$ . Badanym

obiektem był samochód BMW e30 318is. W celu określenia maksymalnej mocy pojazdu, samochód był rozpędzany z maksymalnym dostępnym momentem do prędkości dopuszczalnej na trzecim biegu. Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi przyspieszeń w trzech osiach pojazdu. Charakteryzują się one znaczną ilością zakłóceń sygnału. Związane jest to między innymi z drganiami przenoszonymi się z układu napędowego pojazdu oraz nierównością nawierzchni.



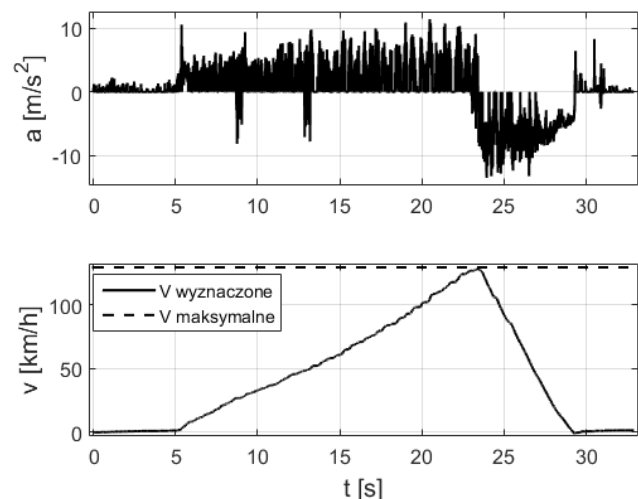
Rys. 2. Pomiar przyspieszeń pojazdu

### 4. PRZETWARZANIE DANYCH POMIAROWYCH

Uzyskane wyniki pomiaru przyspieszeń pojazdu (rys. 2) pozwoliły na wyznaczenie prędkości rzeczywistej samochodu. Do tego celu wykorzystano metodę trapezów (brak filtracji sygnału) z uwzględnieniem zmiennego kroku próbkowania [6]. Ze względu na występujące w sygnale szumy o znacznych amplitudach, do analizy przyspieszenia i prędkości pojazdu wzięto pod uwagę osie Y oraz Z akcelerometru, a wypadkowe przyspieszenie w ruchu prostoliniowym określono jako [4]:

$$a_s = \sqrt{a_z^2 + a_y^2} \quad (7)$$

zaś uzyskane wyniki zostały przedstawione na poniższym rysunku.

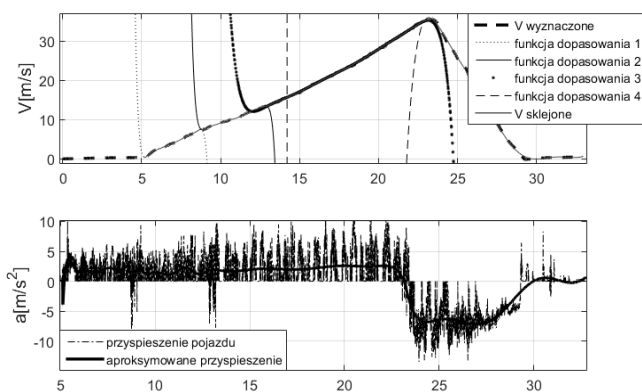


Rys. 3. Przebiegi wypadkowego przyspieszenia i prędkości pojazdu

Z uwagi na fakt, że sygnał przyspieszenia  $a$  nie był poddany filtracji na jego przebiegu widoczne są duże wartości szumów. Natomiast wyznaczona prędkość samochodu (rys. 3) w swoim maksimum osiąga wartość 128,3 km/h i praktycznie pokrywa się z maksymalną rzeczywistą prędkością, którą może osiągnąć pojazd na trzecim biegu. Wartość maksymalną prędkości rzeczywistej pojazdu obliczono na podstawie znajomości maksymalnej prędkości obrotowej silnika, całkowitego przełożenia układu napędowego oraz średnicy kół samochodu.

#### 4.1. Przyspieszenie i prędkość pojazdu – aproksymacja funkcjami sklejanymi

Przy braku filtracji, wypadkowy sygnał przyspieszenia  $a_s$  pojazdu uniemożliwia dalszą rzetelną analizę parametrów ruchu pojazdu ze względu na szereg występujących zakłóceń (rys. 3). Aby tego uniknąć, wykorzystano aproksymację sygnału funkcjami sklejanymi. Jako podstawę do tej aproksymacji wykorzystano prędkość rzeczywistą pojazdu uzyskaną po scałkowaniu wypadkowej sumy przyspieszeń (7) metodą trapezów.



Rys. 4. Przebiegi prędkości i wypadkowej sumy przyspieszeń pojazdu przed i po aproksymacji funkcjami sklejanymi

Po przeprowadzeniu serii prób i obliczeń do aproksymacji funkcjami sklejanymi wykorzystano wielomiany 9-tego rzędu oraz zastosowano cztery funkcje dopasowujące, których punktami sklejen są w tym przypadku największe zmiany pochodnej przebiegu prędkości (rys. 4). W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano zaproksymowany, odfiltrowany z zakłóceń przebieg prędkości pojazdu, na podstawie którego otrzymano wypadkowe sumaryczne przyspieszenie pojazdu w którym nie występują szumy (rys. 4).

Wyznaczone powyżej wartości przyspieszenia i prędkości pojazdu posłużyły następnie do wyznaczenia mocy pojazdu.

#### 4.2. Moc wypadkowa poruszającego się samochodu

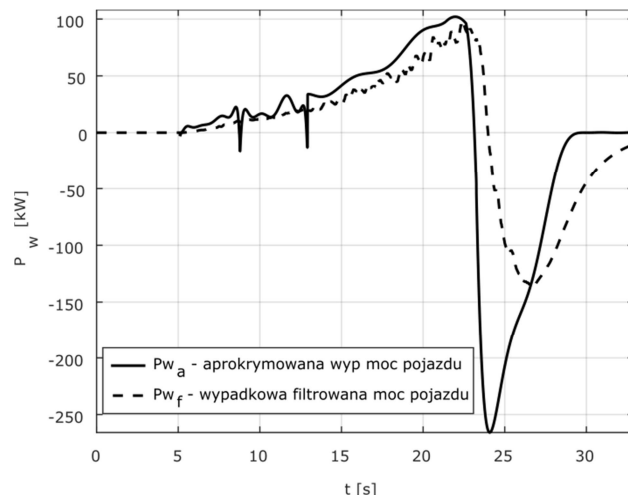
Na podstawie przedstawionych rozważań wyznaczono dostępną wypadkową moc poruszającego się pojazdu, którą określono jako:

$$P_w = mav \quad (8)$$

gdzie:  $m$  – masa pojazdu w kg,  $a$  – przyspieszenie w  $m/s^2$ ,  $v$  – prędkość w km/h.

Moc wypadkową pojazdu wyznaczono na podstawie prędkości i przyspieszenia pojazdu, których wartości zostały

wcześniej obliczone przy użyciu aproksymacji funkcjami sklejanymi oraz filtracji dolnopasmowej, której algorytm został szczegółowo opisany w pracy [4]. Uzyskane przebiegi i wartości mocy wypadkowej  $P_w$  samochodu zostały przedstawione na rysunku 5. Widać, że moc wypadkowa samochodu  $P_{wa}$  uzyskana przy pomocy aproksymacji przebiegu prędkości funkcjami sklejanymi, daje najlepsze wyniki gdy zastosuje się filtrację sygnału. Wartość maksymalna mocy również oscyluje w pobliżu wartości katalogowej 100 kW i wynosi 103 kW. W przebiegu widać również w 9 i 13 sekundzie kolejne zmiany biegów (1→2, 2→3), które powodują chwilowy zanik mocy.



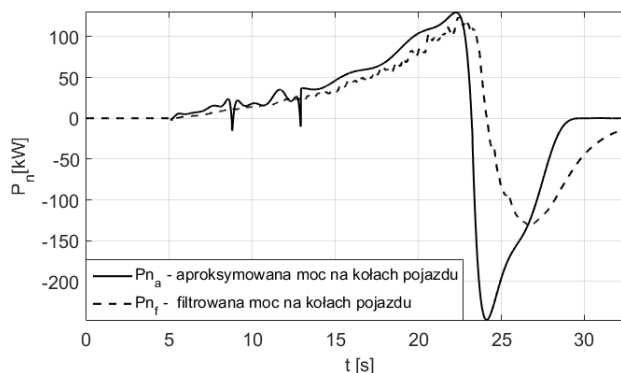
Rys. 5. Przebieg mocy wypadkowej pojazdu przy zastosowaniu różnych metod przetwarzania sygnału

Moc  $P_{wf}$  została wyznaczona przy zastosowaniu filtracji dolnopasmowej. W jej przebiegu występują większe zakłócenia niż w przypadku mocy  $P_{wa}$ . Natomiast biorąc pod uwagę maksymalną wyznaczoną moc pojazdu jest ona również wiarygodna i wynosi 98 kW.

Na podstawie równań sił oddziałujących na pojazd (zależności 1-5) oraz parametrów pojazdu: masy pojazdu i kierowcy, współczynników oporu toczenia  $f_r$  oraz powietrza  $c_d$ , a także znajomości powierzchni czołowej pojazdu  $A$  oraz gęstości powietrza  $\rho$  można oszacować moc  $P_n$  przekazywaną na koła pojazdu zgodnie ze wzorem:

$$P_n = P_w + P_{DF} + P_r \quad (9)$$

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń otrzymano przebiegi, które zostały przedstawione na rysunku 5.



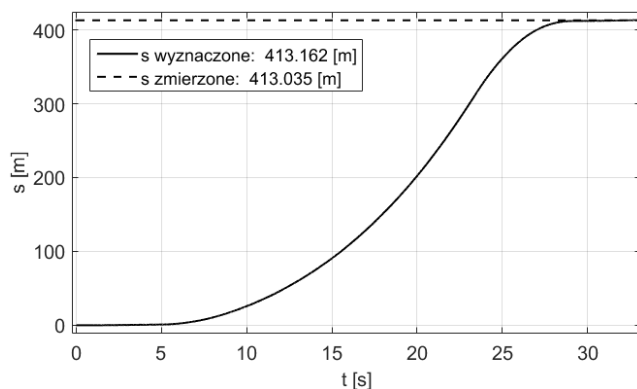
Rys. 6. Przebieg mocy przekazywanej na koła pojazdu

Moc maksymalna na kołach pojazdu  $P_{na}$  wyznaczona za pomocą aproksymacji parametrów przyspieszenia i drogi pojazdu funkcjami sklejanymi wynosi ok. 127 kW, natomiast maksymalna moc  $P_{nf}$  wyznaczona przy zastosowaniu filtracji dolnoprasmowej wynosi ok. 124 kW. Jest to zatem niewielki błąd, który wynika głównie z błędów pomiarowych urządzenia, oszacowania zmierzonych parametrów, a także niedoskonałości zastosowanych metod.

W tym miejscu należy jednak podkreślić, że uzyskane przebiegi nie są dokładnym opisem zjawisk ruchu pojazdu, do badań wykorzystano otaczające nas gadzety a, uzyskane wyniki w przybliżeniu odpowiadają wartościom rzeczywistym.

#### 4.3. Wyznaczenie przejechanego przez pojazd dystansu

Aby potwierdzić zasadność zaproponowanych powyżej rozważań, na podstawie prędkości pojazdu zaproksymowanej funkcjami sklejanymi obliczona została droga, którą pojazd przebył podczas pomiarów. Jako wzorcowy wykorzystano dodatkowy pomiar, który polegał na wykorzystaniu odpowiednio zabezpieczonego mikrokontrolera do akwizycji sygnału z czujnika prędkości pojazdu. W rezultacie na wyjściu z czujnika otrzymano przebieg prostokątny. Przetwarzanie sygnału polegało na zliczaniu zboczy narastających sygnału i interpretacji uzyskanych liczb.



Rys. 7. Wynik porównania dystansu, jaki pokonał pojazd w trakcie pomiarów z wartością wzorcową

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie drogi przebytej przez pojazd z wyznaczoną na podstawie przyspieszeń oraz zmierzonego dystansu. Należy zauważyć, że dystans wyznaczony przy pomocy sygnału prostokątnego z czujnika prędkości pojazdu pokrywa się z drogą wyznaczoną na podstawie przyspieszeń. Wynika stąd wniosek, że kalibracja smartphona opisana w początkowej

części artykułu, opisane pomiary przyspieszeń oraz ich przetwarzanie dają poprawne wyniki.

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania trójosiowych akcelerometrów umieszczonych w smartphonach do pomiarów przyspieszeń, a co za tym idzie do określenia parametrów ruchu, do których zalicza się m.in. przyspieszenie, prędkość oraz moc przekazywaną na koła pojazdu. Istotną rolę w ich wyznaczaniu odgrywają metody przetwarzania i filtracja zmierzonych sygnałów. W artykule przedstawiono wykorzystanie do tego celu aproksymacji za pomocą funkcji sklepanych, a uzyskane w ten sposób przebiegi porównano z przebiegami uzyskanymi na podstawie filtracji dolnoprasmowej.

Zaprezentowane wyniki potwierdzają tezę, że akcelerometry umieszczone w smartphonach, przy wykorzystaniu podstawowych praw fizyki, oprogramowania oraz przy zastosowaniu zmiennie-krokowych metod przetwarzania sygnałów mogą służyć do efektywnego oszacowania parametrów ruchu pojazdu. Należy również podkreślić niski koszt przeprowadzonych badań.

W ramach dalszych badań planowane jest stworzenie bardziej dokładnego modelu, który będzie uwzględniał siły boczne i poślizg oddziałujący na pojazd, a także kąt nachylenia terenu.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Prochowski L.: Mechanika ruchu. WKŁ, 2008.
2. Gillespie T.D.: Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, 1992.
3. Jones T. B., Nenadic N. G.: Electromechanics and MEMS. Cambridge University Press, 2013, str.298-371.
4. Sieklucki G., Bień A., Gromba J., Sobieraj S.: Metoda określenia ruchu pojazdu na podstawie obserwacji przyspieszeń. MKM'2017, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 54, str. 203-206.
5. Han H. Yu J., Zhu H., Chen Y., Yang J., Zhu Y., Xue G., Li M.: SenSpeed: Sensing Driving Conditions to Estimate Vehicle Speed in Urban Environments. *IEEE INFOCOM 2014 - IEEE Conf. on Computer Communications*, Toronto, 2014, str. 727-735.
6. Bień A., Musiał P., Sieklucki G.: Diagnostyka amortyzatora samochodowego na podstawie sygnału przyspieszenia karoserii, *Pomiary Automatyka Kontrola*, R. 45, nr 1, 1999, str. 20-23.

## DETERMINING THE VEHICLE MOTION PARAMETERS ON THE BASIS OF DIFFERENT METHODS PROCESSING SIGNALS

Currently, accelerometers are installed in the majority of commercially available smartphones. The paper proposes the use of a 3D accelerometer installed in a smartphone to measure vehicle motion parameters. The measured values obtained were subjected to filtration using an approximation of the spline function, so that they could be used for further testing. The main purpose of the work is to check if it is possible to estimate the instantaneous power of the vehicle, which can be used to determine the mechanical characteristics of an internal combustion engine, electric engine or hybrid drive during physical experiments. The tests carried out allowed the estimation of vehicle motion parameters.

**Keywords:** accelerometers, sampling frequency, vehicle motion, motion dynamics, acceleration, vehicle power.