

METODA OKREŚLENIA RUCHU POJAZDU NA PODSTAWIE OBSERWACJI PRZYSPIESZEŃ

Grzegorz SIEKLUCKI¹, Andrzej BIEN², Józef GROMBA³, Sylwester SOBIERAJ⁴

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

Streszczenie: Praca opisuje koncepcję wykorzystania akcelerometru trójosiowego, instalowanego w smartphonie, do pomiaru prędkości pojazdu samochodowego oraz oszacowania mocy napędu przekazywanej na koła pojazdu. Analizę wyników przeprowadzono na podstawie pomiarów drogowych. Podstawowymi opisywanymi zagadnieniami są: kalibracja czujnika przyspieszenia oraz przetwarzanie sygnałów przyspieszenia o zmiennym czasie próbkowania urządzenia mobilnego.

Słowa kluczowe: akcelerometr, czas próbkowania, wyznaczenie prędkości pojazdu, dynamika ruchu, moc.

1. WPROWADZENIE

Głównym celem pracy jest prezentacja możliwości akcelerometrów zainstalowanych w smartphonach, które powszechnie są uważane za "gadżety".

Obecnie akcelerometry trójosiowe (3D) są umieszczane w praktycznie każdym smartphonie (urządzeniu mobilnym), dlatego zaproponowano wykorzystanie takiego akcelerometru w pomiarze ruchu pojazdu. Ważne w tej propozycji jest łatwe użycie samych akcelerometrów i ich zaskakująco dobre parametry. Opisana metodyka użycia takiego akcelerometru pozwoli na prowadzenie podstawowych testów stosując powszechnie dostępną technologię, a przede wszystkim wykorzystując mobilność i pracę w sieci informatycznej. Pomiar przyspieszenia dla pojazdów jest prostym rozwiązaniem pozwalającym na ocenę parametrów ich ruchu, a dalej budowanie modelu pojazdu w celu optymalizacji parametrów energetycznych.

Opisane określenie ruchu pojazdu przeprowadza się trój etapowo:

1. Kalibracja przetwornika przyspieszenia w smartphonie.
2. Rejestracja sygnałów przyspieszeń przy pomocy dedykowanego oprogramowania dla smartphonu. Przykładowo, może być to Physics Toolbox Sensor Suite (darmowe oprogramowanie dla systemów iOS i Android), gdzie istnieje możliwość zapisu pomiarów w formacie csv.

3. Odczytanie zapisanych wyników w komputerze PC i ich przetwarzanie cyfrowe.

W badaniach wykorzystano smartphone wyposażony w 12 bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, oznacza to znacznie gorszą kwantyzację niż w przypadku nowszych telefonów (obecnie rozdzielczość przetworników wynosi 16. bitów). Ponadto, wybrany został system iOS z uwagi na większą stabilność czasu próbkowania od systemu Android.

W artykule przedstawione zostało przetwarzanie sygnałów: *przyspieszenie 3D* → *przyspieszenie prostoliniowe* → *prędkość* → *moc wypadkowa* → *moc przekazywana z układu napędowego*. Z uwagi na zmienny czas próbkowania sygnałów przyspieszeń zastosowano zmiennokrokowe przetwarzanie sygnałów, które jest znane z metod numerycznych.

2. KALIBRACJA iPhone4s

W przeprowadzonych pomiarach wykorzystano telefon iPhone 4s (data premiery 10.2011), który wyposażony jest w akcelerometr LIS331DLH (wykonany w technologii MEMS - microelectromechanical systems):

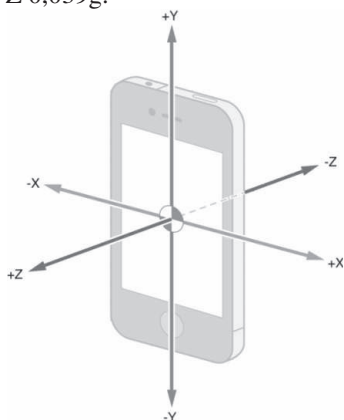
- 12 bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy,
- multiplexer analogowy,
- komunikacja I2C/SPI,
- szybkość transmisji danych w trybie normalnym do 1 kHz.

Zwykle przetwornik przyspieszenia w każdym smartphonie pracuje w zakresie -2g do 2g. Nowsze telefony wyposażone są w akcelerometry o lepszych parametrach i obecnym standardem jest 16 bitowe przetwarzanie sygnałów, ale często w zakresie $\pm 8g$.

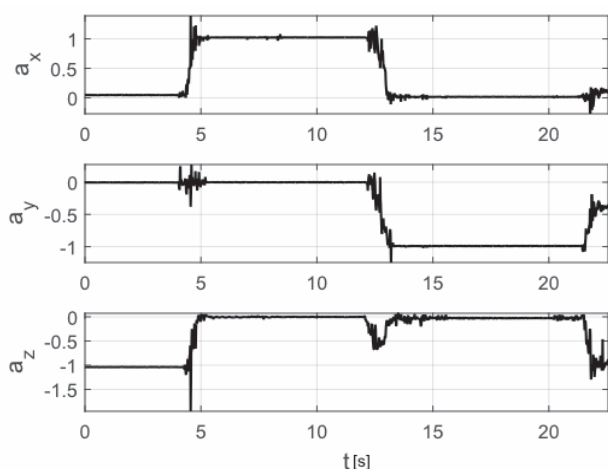
Niewątpliwą zaletą iPhone 4s jest płaska ramka, która umożliwia łatwą kalibrację. Rozkład osi akcelerometru został przedstawiony na rysunku 1. W przeprowadzonych doświadczeniach przyjęto, że ruch będzie odbywał się w osi Y, a oś Z będzie osią przyspieszenia ziemskiego co oznacza, że podczas pomiarów smartphonie leży „płasko”.

Kalibrację przeprowadzono na płaskiej powierzchni, którą ustalono przy pomocy poziomicy, sygnały

akcelerometru prezentuje rysunek 2. Przy założonym ustawieniu akcelerometru określono błędy pomiaru dla 0-4s (na podstawie wartości średniej): w osi X 0,047g, w osi Y 0,004g i w osi Z 0,039g.



Rys. 1. Osie przetwornika przyspieszenia w smartphonie

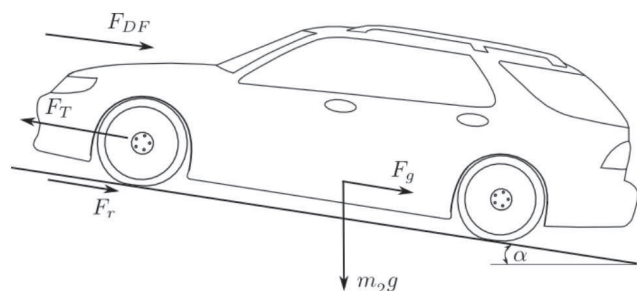


Rys. 2. Kalibracja akcelerometru – jednostka 1g=9.81 m/s²

Uzyskane wartości zostały uwzględnione w pomiarach ruchu pojazdu w trakcie przetwarzania zarejestrowanych sygnałów w komputerze PC.

3. OBIEKT I POMIAR

Siły działające na pojazd podczas jazdy zostały przedstawione na rysunku 3 [1-5].



Rys. 3. Siły działające na pojazd

Ruch pojazdu opisuje druga zasada dynamiki Newtona:

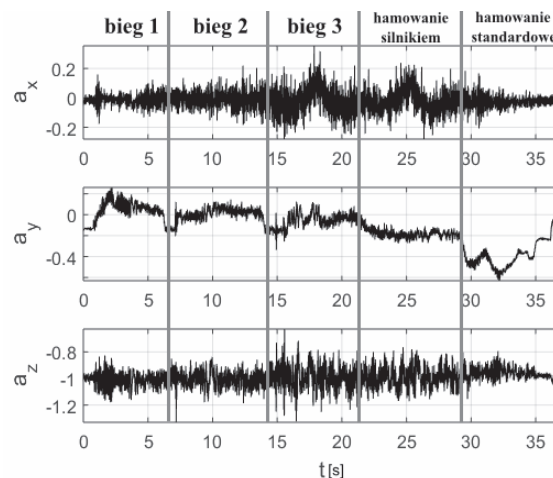
$$m \frac{dv(t)}{dt} = F_T(t) - \underbrace{(F_{DF}(t) + F_r(t) + F_g(t))}_{F(t)} \quad (1)$$

gdzie: F_T jest siłą trakcyjną, F_{DF} siłą oporu powietrza, F_r oporem toczenia, F_g siłą grawitacyjną związaną z

nachyleniem terenu. Natomiast m jest ekwiwalentem masy związanym ze wszystkimi magazynami energii kinetycznej tj.: m_2 – masa pojazdu i pasażerów, m_1 – masa związana z momentem bezwładności napędu (elementy wirujące), który jest przeliczony na karoserię (ruch wzdłużny) oraz m_3 – masa przeliczona z momentów bezwładności bezpośrednio związana z kołami.

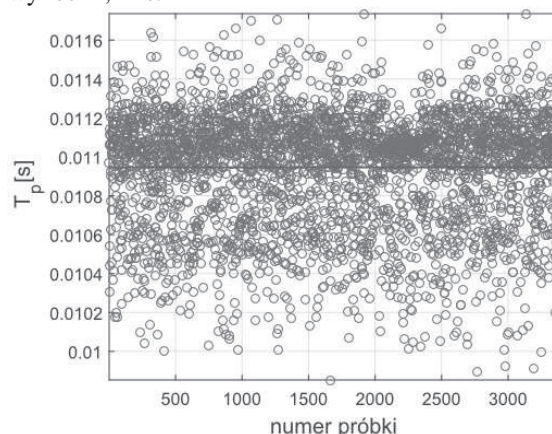
W przeprowadzonym doświadczeniu nachylenie terenu wynosiło 0%, co znacznie ułatwiło analizę sygnałów.

Pomiar przeprowadzono dla samochodu Saab 95 2.0T Kombi (średni ekwiwalent masy przyjęto jako 1900 kg), smartphona umocowano w centralnym punkcie pojazdu do podłokietnika, dlatego jego pozycja nie była idealnie pozioma. Wartość składowej a_y , w zakresie 0-0.8 s wynosiła -0,135 g i stanowiła poziom odniesienia (rys. 4). Do eksperymentów użyto aplikację Physics Toolbox Sensor Suite ustawiając częstotliwość próbkowania na równą 100 Hz (maksymalna możliwa częstotliwość).



Rys. 4. Pomiar przyspieszenia – jednostka 1g=9.81 m/s²

Przedstawione przebiegi charakteryzują znaczącą składową zmienną związaną z drganiami przenoszonymi się z napędu oraz nierównościami drogi. System iOS nie jest systemem czasu rzeczywistego, dlatego stała częstotliwość próbkowania nie jest utrzymywana, jest to widoczne w znacznikach czasu zawartych w rejestrowanych plikach z danymi. Na rysunku 5 przedstawiono zmianę czasu próbkowania T_p podczas dokonanego pomiaru oraz zaznaczono linię wartości średniej. Największa odchyłka od niej wynosi 1,1ms.



Rys. 5. Zmienny krok próbkowania uzależniony od systemu operacyjnego i procesora telefonu

Zmienny krok próbkowania utrudnia zastosowanie standardowych filtrów cyfrowych, dlatego postanowiono

wykorzystać zmiennokrokowe metody numeryczne stosowane do rozwiązywania równań różniczkowych.

4. PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW

Z uwagi na znaczny poziom szumów w analizie przyspieszenia i prędkości pojazdu pominięto pomiary w osi X – przyspieszenie poprzeczne do toru jazdy. Określono wypadkowe przyspieszenie w ruchu prostoliniowym jako:

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

Tak opisane przyspieszenie miało niektóre wartości mniejsze od 1, co jest niemożliwe, więc przyjęto jako metodę eliminacji błędów pomiarowych zależność:

$$\begin{cases} a_s = a_s, & a_s > 1 \\ a_s = 1, & a_s < 1 \end{cases}$$

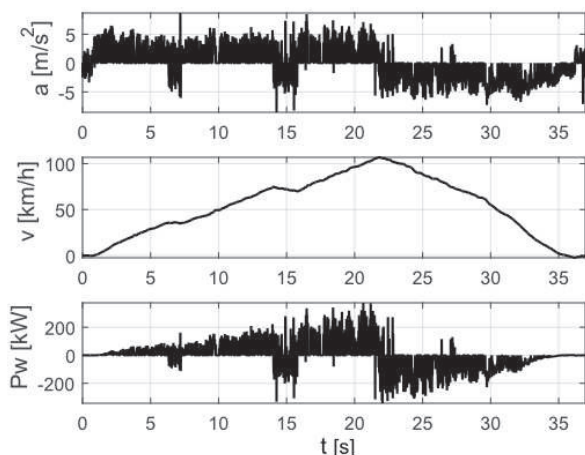
a przyspieszenie w ruchu prostoliniowym (gdzie 0,135g wynika z nachylenia akcelerometru)

$$a = \text{sign}(a_y + 0,135) \cdot \sqrt{a_s^2 - 1} \cdot 9,81 \quad (3)$$

Sygnal a nie był poddany filtracji tylko zastosowano bezpośrednio metodę trapezów do wyznaczenia prędkości pojazdu (uwzględniono tu zmienny krok próbkowania). Przyjmując średni ekwiwalent masy (masa pojazdu, kierowcy, paliwa wraz z przeniesionymi na pojazd momentami bezwładności elementów wirujących) $m=1900\text{kg}$ określono moc poruszającego się pojazdu (moc wypadkowa):

$$P_w = mav \quad (4)$$

Wyniki przedstawiono na rysunku 6, gdzie moc chwilowa osiąga wartości większe od 300 kW i jest to przypadek całkowicie nierealny, ponieważ maksymalna dostępna moc badanego pojazdu to 141 kW. Oznacza to konieczność dodatkowego przetwarzania sygnałów.



Rys. 6. Bezpośrednie określenie prędkości i mocy poruszającego się pojazdu

Z powyższego powodu poddano filtracji sygnał przyspieszenia a i prędkości v , stosując element inercyjny o

stałej czasowej $T=0,2\text{s}$, którego transmitancję zapisuje się jako:

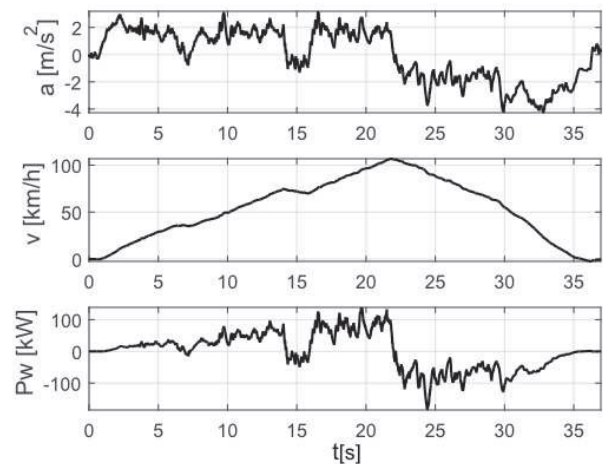
$$G_f(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (5)$$

gdzie y jest sygnałem wyjściowym a u sygnałem wejściowym.

W celu implementacji zastosowano metodę Eulera:

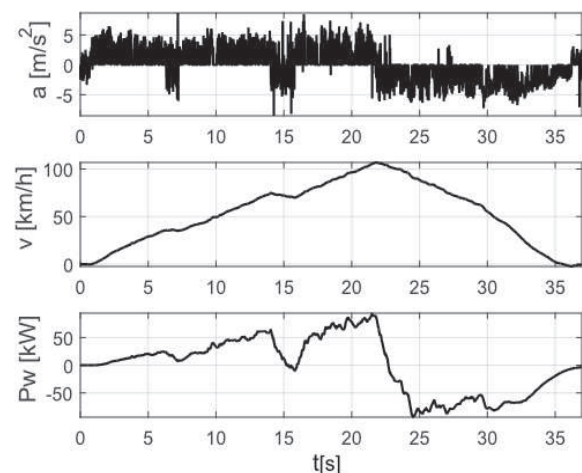
$$y(k+1) = y(k) + \frac{t(k+1) \cdot t(k)}{\tau} (-y(k) + u(k)) \quad (6)$$

Wyniki przedstawiono na rysunku 7, gdzie również widać duże błędy w określeniu mocy na trzecim biegu (maksymalnie 140 kW). Błędy te są wywołane nie uwzględnieniem zmiany momentu bezwładności napędu przenieszonego przez przekładnię (zmiana biegów, im wyższy bieg tym mniejszy moment). Należy zwrócić również uwagę na nadal dużą wartość szumu w sygnałach. Określając średnią moc dla 3 biegu uzyskuje się wartość 95 kW i jest to wartość wiarygodna, mniejsza od mocy maksymalnej.



Rys. 7. Filtracja sygnałów przyspieszenia i prędkości w celu określenia mocy

Stosując prostą zmiennokrokową metodę dla $T=1,1\text{s}$ uzyskuje się najbardziej wiarygodne wyniki (rys. 8), gdzie maksymalna moc wypadkowa wynosi $P_w=90\text{kW}$ (dla $t=21,5 \div 21,8\text{s}$).



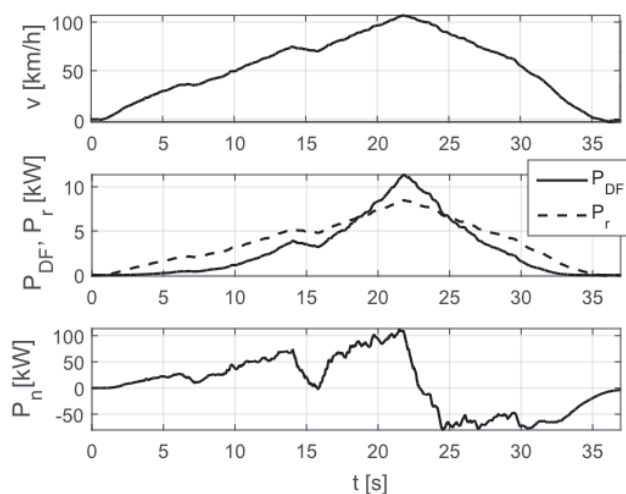
Rys. 8. Filtracja przebiegu mocy - stała czasowa $T = 1,1\text{s}$

Ostatecznie znając parametry pojazdu: masa pojazdu i kierowcy równa 1750 kg, współczynnik oporów toczenia $f_r=0,01$, współczynnik oporów powietrza $c_d=0,31$, płaszczyzna natarcia $A=2,29\text{m}^2$ oraz gęstość powietrza $\rho=1,225\text{kg/m}^3$, można określić moc przekazywaną z napędu na koła pojazdu. Uwzględnia się tu opór toczenia F_r i opór aerodynamiczny F_{DF} [1]:

$$F_r = f_r m_2 g, \quad f_r = f_0 \left(1 + \frac{3,6 \cdot v}{161}\right) \quad (7a)$$

$$F_{DF} = \frac{1}{2} \rho C_d A (v - v_w)^2 \quad (7b)$$

W przeprowadzonych badaniach nie zmierzono prędkości wiatru v_w , więc została ona przyjęta jako zerowa. W efekcie uzyskuje się przebiegi przedstawione na rysunku 9, których wynikiem jest moc $P_n = P_w + P_{DF} + P_r$ na kołach pojazdu dostarczana z napędu. Maksymalna moc wynosiła $P_n \sim 110 \text{ kW}$ dla $t=21,5 \div 21,8\text{s}$.



Rys. 9. Analiza ruchu pojazdu - bilans mocy

Zaprezentowane przebiegi nie są dokładnym opisem zjawiska ruchu pojazdu, ale pozwalają oszacować zapotrzebowanie na moc w trakcie rozpędzania i hamowania. Autorzy nie przeprowadzili w tej pracy analizy niepewności pomiarów uzasadniając ten fakt znacznymi uproszczeniami i celem badań, którym była próba wykorzystania prostych narzędzi i sprawdzenie możliwości ich stosowania.

THE METHOD OF VEHICLE MOTION DETERMINATION BY ACCELERATIONS MEASUREMENT

Currently, triaxial (3D) accelerometers are installed in every smartphone, so paper proposes to use such an accelerometer in vehicle motion measurement. The work describes a conception of the utilization of 3D accelerometer in smartphone to the determination of the car speed and the estimation of a power on the vehicle wheels. The analysis of the results was conducted based on road measurements. The basic issues which were discussed: calibration of acceleration sensor and processing of acceleration signals with variable sampling time resulting from the properties of the smartphone operating system. The smartphone (iPhone 4s) uses the accelerometer LIS331DLH (in Microelectromechanical systems technology - MEMS) 12-bit analog-to-digital converter for $\pm 2g$ range. Moreover, the iOS system (ver. 9.3.5) was chosen because of the more stable sampling time than in the Android system. The article presents the following signal processing: 3D acceleration \rightarrow longitudinal vehicle acceleration \rightarrow vehicle speed \rightarrow resultant power \rightarrow power transmitted from the propulsion system.

Keywords: accelerometer, sampling time, vehicle speed determination, motion dynamics, power.

5. PODSUMOWANIE

W artykule zostały przedstawione wyniki przetwarzania sygnałów i określenia prędkości pojazdu oraz mocy przekazywanej na koła na podstawie pomiaru przyspieszenia z wykorzystaniem akcelerometru wbudowanego w smartphonie iPhone 4s.

Uzyskane rezultaty opierają się na sprowadzeniu do jednej osi ruchu pojazdu, filtracji i zmiennokrokowym przetwarzaniu sygnałów, uwzględnieniu oporów ruchu i parametrów samego pojazdu.

Zaprezentowane wyniki uznano za najlepsze z serii zrealizowanych eksperymentów, ale również dokonano prób z filtracją medianową oraz z aproksymacją średniokwadratową (wykorzystano wielomiany i funkcje exponencjalne) przebiegu prędkości bądź przyspieszenia i wyznaczenia mocy na tej podstawie.

Przedstawione wyniki potwierdzają tezę, że wykorzystanie akcelerometru w Smatphonach jest skuteczne i może być dobrym narzędziem do podstawowej analizy ruchu pojazdów samochodowych. Ponadto, akcelerometry smartphonów mogą być uważane za "gadżety", ale przy pomocy zmiennokrokowego przetwarzania sygnałów można w prosty sposób określać przybliżony przebieg i parametry ruchu dowolnych obiektów, np. pojazdów.

W ramach dalszych badań planowana jest poprawa zaprezentowanych powyżej wyników i identyfikacja parametrów pojazdu (masa pojazdu, bezwładności elementów wirujących, współczynniki oporu ruchu, nachylenie terenu).

6. BIBLIOGRAFIA

1. Gillespie T.D.: Fundamentals of Vehicle Dynamics. Society of Automotive Engineers, 1992.
2. Giri. F.: AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications. Wiley, 2013.
3. Nam. K.H.: AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications. CRC Press, 2010.
4. Prochowski. L.: Mechanika ruchu. WKŁ, 2008.
5. Praca zbiorowa pod red. K. Studzińskiego: Techniczny poradnik samochodowy. Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa, 1956.