

# Badania eksploatacyjne elektrycznego układu napędowego motocykla

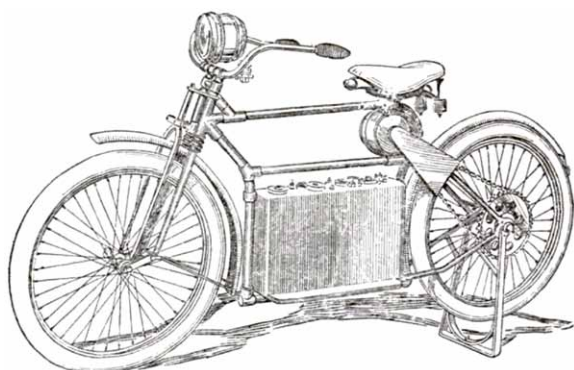
Andrzej Łebkowski

## 1. Wstęp

Wzrost liczby ludności, a także rejestrowanych pojazdów sprawia, iż problem korkujących się ulic dotarł także do wielu miast Europy Wschodniej. Rozwiązaniem tego zjawiska może być użytkowanie pojazdów jednośladowych, zajmujących mniej miejsca i tańszych w eksploatacji. Informacje o pierwszej konstrukcji jednośladowej w postaci roweru z napędem elektrycznym można znaleźć w spisie patentowym z 1895 roku, kiedy to w stanie Ohio w USA w dniu 19 września Ogden Bolton Jr. Canton złożył wniosek patentowy [1]. W następnych latach czasopisma donosiły o powstawaniu kolejnych rozwiązań technologicznych i konstrukcji z napędem elektrycznym (patenty US572036, US596272, US598819, US627066, US656323, US2179418, US2457430, US3884317, US4030562), osiągających zasięgi ponad 100 km przy prędkości do 60 km/h i masie motocykla ok 100 kg [2].

W 1919 roku firma Ransomes, Sims & Jefferies wykonała prototyp motocykla elektrycznego zasilanego z akumulatorów ulokowanych w wózku bocznym [3]. W 1936 roku bracia Limelette założyli firmę o nazwie Socovel, która zajmowała się produkcją motocykli elektrycznych do roku 1948 [4].

W 1967 roku Karl Kordesch skonstruował ogniwo paliwowe, które zastosował w motocyklu [5]. W 1974 roku Mike Corbin, wykorzystując elektryczny rozrusznik od myśliwca Douglas A-4B, zbudował motocykl o nazwie Quick Silver, który ustanowił ówczesny rekord świata w kategorii maksymalnej prędkości motocykla elektrycznego, który wyniósł 266,16 km/h [6] (aktualny rekord z 2011 r. to 316 899 km/h – SWIGZ Electric Superbike). Wraz z rozwojem nowych technologii



Rys. 1. Szkic z 1911 roku przedstawiający pierwszy motocykl z napędem elektrycznym [2]

**Streszczenie:** Coraz więcej naukowców na świecie zajmuje się konstrukcjami tanich i ekologicznych układów napędowych. Jednocześnie rynek pojazdów elektrycznych skupia się głównie wokół konstrukcji samochodowych, które mogą być eksploatowane w ciągu całego roku kalendarzowego, niezależnie od współrzędnych geograficznych opisujących miejsce ich użytkowania. W artykule zaprezentowano konstrukcję elektrycznego układu napędowego motocykla, jaka została opracowana i zrealizowana w Akademii Morskiej w Gdyni. Omówiono założenia konstrukcyjne, jakie były przyjęte przy projektowaniu podzespołów wykorzystanych do budowy elektrycznego układu napędowego, składającego się z trakcyjnego silnika napędowego, falownika, pakietu akumulatorów wraz z systemem BMS, instalacji 12 V DC z przetwornicą DC/DC oraz komputera pokładowego z wyświetlaczem parametrów. W pracy zaprezentowano parametry elektrycznego układu napędowego, takie jak: generowana moc, prędkość maksymalna pojazdu czy też zużycie energii. Przedstawiono wyniki badań eksploatacyjnych elektrycznego układu napędowego, przeprowadzone w rzeczywistych warunkach drogowych.

Słowa kluczowe: motocykl elektryczny, napęd elektryczny, silnik synchroniczny

## 🇬🇧 OPERATIONAL RESEARCH OF AN ELECTRIC POWERTRAIN FOR A MOTORCYCLE

**Abstract:** More and more engineers worldwide are designing cheap and environmentally friendly vehicle powertrains. Meanwhile the market of electric vehicles concentrates around full car-sized vehicles, intended for operation during the whole year, independent of the climatic region. This article presents the design of an electric motorcycle powertrain, developed and prototyped in the Gdynia Maritime University. Discussed are the design intents used to create the powertrain elements, including traction motor, inverter, battery pack with a BMS system, vehicle 12 V bus with DC/DC converter and an onboard computer with a parameter display. The paper introduces the powertrain parameters: maximum power, vehicle top speed or specific energy consumption. Actual public road driving conditions tests results are presented.

Keywords: electric motorcycle, electric powertrain, synchronous motor

i materiałów pojawiały się nowe rozwiązania konstrukcyjne motocykli elektrycznych (US8002067, US20130299265, EP2361827, EP2848456, US20130270026, US20140367184, US20130270021, US 8789640 i inne), na bazie których mamy możliwość wyboru produktów takich marek, jak: BMW, Brammo, Brutus2, Bultaco, Electric Motorsport, Energica Motor Company, Gogoro, Harley-Davidson, Honda, Hollywood Electrics, Johammer, Lightning Motorcycle, Quanta, Sora, Sarolea, Terra Motors, Yamaha, Yo and Lito, Z Electric Vehicle, Zero Motorcycles. Ceny dla tego typu pojazdów dostępnych na terenie Stanów Zjednoczonych wahają się od 20 do 50 tysięcy dolarów.

W niniejszym artykule przedstawiono konstrukcję motocykla z napędem elektrycznym, jaki został skonstruowany w Akademii Morskiej w Gdyni. Założenia projektowe zakładały realizację elektrycznego układu napędowego pojazdu o zerowej pojemności silnika i mocy dostosowanej do przepisów prawa w taki sposób, aby można było poruszać się pojazdem, posiadając kategorię prawa jazdy A1 lub kategorię B przez okres co najmniej 3 lat. Zgodnie z powyższymi wymaganiami pojazd taki nie może rozwijać mocy większej niż 11 kW, a współczynnik stosunku mocy do masy własnej nie może być większy niż 0,1 kW/kg.

## 2. Elektryczny układ napędowy

Do realizacji projektu zaimplementowano ramę z motocykla Yamaha FZR 1100. Na ramie, w miejscu przeznaczonym dla skrzyni biegów z napędu spalinowego, zamontowano silnik elektryczny PMSM sterowany falownikiem Sevcon Gen4 Size4 z pakietu 25 akumulatorów litowo-fosforowo-żelazowych (LiFePO4). Dla tak skonfigurowanego elektrycznego układu napędowego wykonano zestaw owiewek i elementów konstrukcyjnych z włókna szklanego. Widok motocykla z napędem elektrycznym przedstawiono na rysunku 2.

Głównym elementem elektrycznego układu napędowego jest falownik SEVCON Gen4 Size 4. Sterowniki tego typu stosowane są w elektrycznych układach napędowych pojazdów [7]. Sterownik zbudowany na bazie tranzystorów MOSFET umożliwia zasilanie silników synchronicznych z pakietu akumulatorów w zakresie od ok. 40 V DC do 120 V DC. Ważnym elementem przy pracy tego falownika jest odpowiedni sposób jego chłodzenia. W opracowanym układzie napędowym wykorzystano chłodzenie z użyciem uźebrowanego radiatora, który dodatkowo wspomagany jest przez wentylator powietrza. W wypadku, gdy temperatura falownika osiągnie wartość powyżej 75°C, program falownika rozpocznie proces ograniczania mocy dostępnej dla silnika do odcięcia, realizowanego przy temperaturze 85°C. Falownik umożliwia konfigurację wielu elementów i zabezpieczeń elektrycznego układu napędowego, a także odczyt parametrów przez sieć CAN. Funkcje, jakie zostały zrealizowane w elektrycznym układzie napędowym motocykla, to na przykład: realizacja biegu wstecznego ułatwiająca eksploatację pojazdu szczególnie podczas parkowania, konfiguracja dostępnej mocy pojazdu za pomocą ukrytych przełączników, zabezpieczenie pojazdu przed nieautoryzowanym użytkowaniem. Dzięki możliwości zmian parametrów konfiguracyjnych falownika możliwe jest dowolne ustawienie



Rys. 2. Widok motocykla z napędem elektrycznym opracowanego w Akademii Morskiej w Gdyni



Rys. 3. Zastosowany w motocyklu falownik SEVCON Gen4 Size 4

mocy, momentu i prędkości obrotowej elektrycznego silnika trakcyjnego.

Podstawowe dane falownika SEVCON Gen4 Size 4:

- moc znamionowa 16 kW;
- moc maksymalna 40 kW;
- prąd znamionowy 140 A;
- prąd maksymalny 350 A (2 min);
- prąd maksymalny 420 A (10 sekund);
- zakres napięcia wejściowego: 40–120 V DC;
- typ chłodzenia: strumień powietrza.

Elementem wykonawczym elektrycznego układu napędowego jest synchroniczny silnik PMSM skonstruowany w Akademii Morskiej w Gdyni.



Rys. 4. Silnik synchroniczny PMSM

Bezpośrednio na wałku silnika PMSM osadzona została zębatka, która poprzez łańcuch przekazuje moment napędowy na drugą, większą zębatkę, przymocowaną do tylnego koła pojazdu.

Podstawowe dane silnika PMSM:

- moc znamionowa 35 kW;
- moc maksymalna 50 kW;
- prąd znamionowy 220 A;
- prąd maksymalny 320 A;
- moment znamionowy 65 Nm;
- moment maksymalny 100 Nm;
- prędkość obrotowa znamionowa 5000 RPM;
- wymiary: dł. 240 mm, szer. – wys. 190 mm;
- typ chłodzenia: strumień powietrza.

Energia elektryczna niezbędna do zasilania układu napędowego magazynowana jest w pakiecie akumulatorów litowo-fosforo-żelazowych (LiFePO<sub>4</sub>). Pakiet ten składa się z 25 pojedynczych cel o pojemności 90 Ah. Łączna pojemność pakietu akumulatorów wynosi 7,4 kWh. Akumulatory LiFePO<sub>4</sub> charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami eksploatacyjnymi, umożliwiającymi osiągnięcie maksymalnych prądów rzędu 10 C (900 A) podczas rozładowania i 3 C (270 A) przy ładowaniu i hamowaniu odzyskowym. Zalecane przez producenta dane eksploatacyjne, dla zachowania jak najdłuższej żywotności (po 3000 cykli ładowania spadek pojemności akumulatorów do 80%, po 5000 cykli do 70%), wynoszą odpowiednio dla rozładowania 5 C (450 A) i ładowania 1,5 C (135 A). Powyższe dane są szczególnie istotne przy ustawieniu poziomu prądów, jakie mogą wystąpić w układzie napędowym podczas hamowania odzyskowego.

Istotnym elementem podczas eksploatacji pojazdu z napędem elektrycznym jest bieżąca kontrola parametrów układu napędowego. Na rysunku 5 przedstawiono zestaw wskaźników opracowanych dla motocykla. Zestaw ten wyposażony jest w analogowy wskaźnik prędkości pojazdu, analogowy wskaźnik naładowania pakietu akumulatorów wyrażony w procentach oraz analogowy wskaźnik temperatury silnika trakcyjnego.



Rys. 5. Widok zestawu wskaźników w motocyklu z napędem elektrycznym

Dodatkowo – w celu monitoringu rozwijanej mocy przez układ napędowy, temperatur poszczególnych podzespołów, a także poziomu napięć na pojedynczych celach pakietu akumulatorów – zestaw wskaźników poszerzono o wyświetlacz ciekłokrystaliczny z możliwością zmiany przeglądania wyświetlanych parametrów.

Widok motocykla w rzucie z boku, z pokrywami elementów elektrycznego układu napędowego i bez, przedstawiono na rysunku 6.

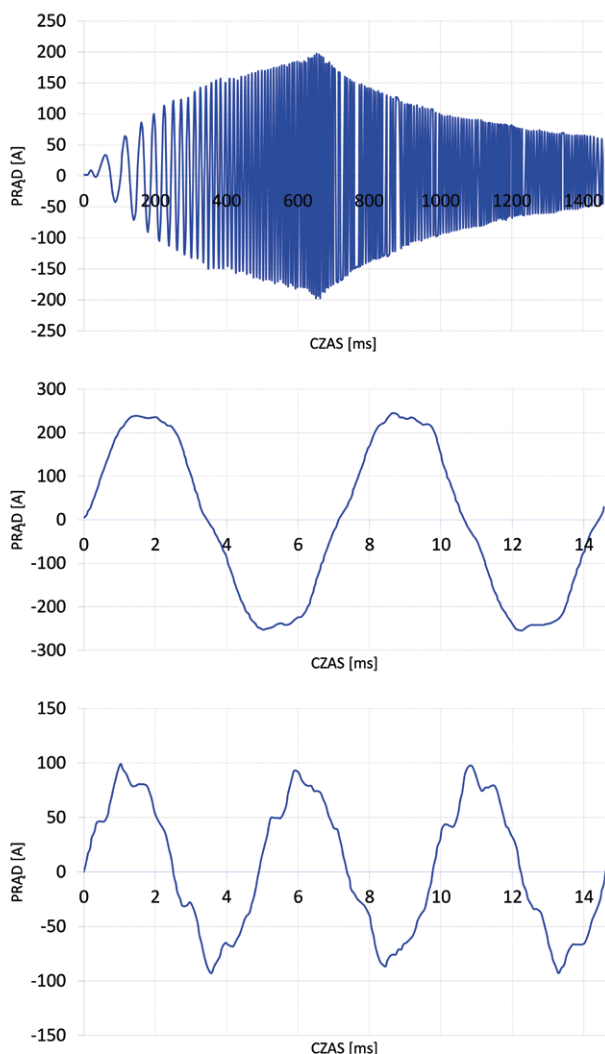


Rys. 6. Widok motocykla z napędem elektrycznym w rzucie z boku

Oprócz wymienionych podzespołów związanych z układem napędowym pojazdu, należy zadbać o odpowiednie źródło zasilania dla instalacji pokładowej pojazdu. W tym konkretnym modelu zastosowano żelowy akumulator 12 V DC o pojemności 5 Ah doładowywany przetwornicą DC/DC o mocy 300 W z pakietu akumulatorów trakcyjnych. Dzięki zastosowaniu oświetlenia LED zużycie energii w pojeździe przez elementy związane z oświetleniem i sterowaniem jest bardzo niewielkie.

### 3. Wyniki badań eksploatacyjnych

W trakcie prowadzonych testów elektrycznego układu napędowego rejestrowano parametry związane z napięciem i prądem pakietu akumulatorów, prędkość przemieszczania się pojazdu oraz temperatury falownika, silnika i pakietu akumulatorów. Parametry były rejestrowane za pomocą opracowanego urządzenia do monitoringu pojazdu [8]. Podczas badań zarejestrowano także przebiegi prądów na fazie silnika podczas startu motocykla, normalnej jazdy oraz hamowania odzyskowego. W czasie testów motocykl przemieszczał się po drogach województwa pomorskiego.



Rys. 7. Przykładowe przebiegi prądu na fazie silnika podczas: startu silnika, pracy, hamowania odzyskowego

### 4. Dyskusja wyników

Wyniki uzyskane w trakcie prowadzenia testów potwierdziły niskie zużycie energii elektrycznej przez pojazd. Zasięg pojazdu przy zachowaniu zasad *eco-driving'u* (płynna jazda, bez dużych przyspieszeń) [10–13] wyniósł ponad 200 km. Na przedstawiony wynik miał też wpływ ustawiony poziom hamowania odzyskowego realizowanego podczas zwalniania i zatrzymywania pojazdu (ujemne wartości mocy pakietu akumulatorowego) – rys. 8.

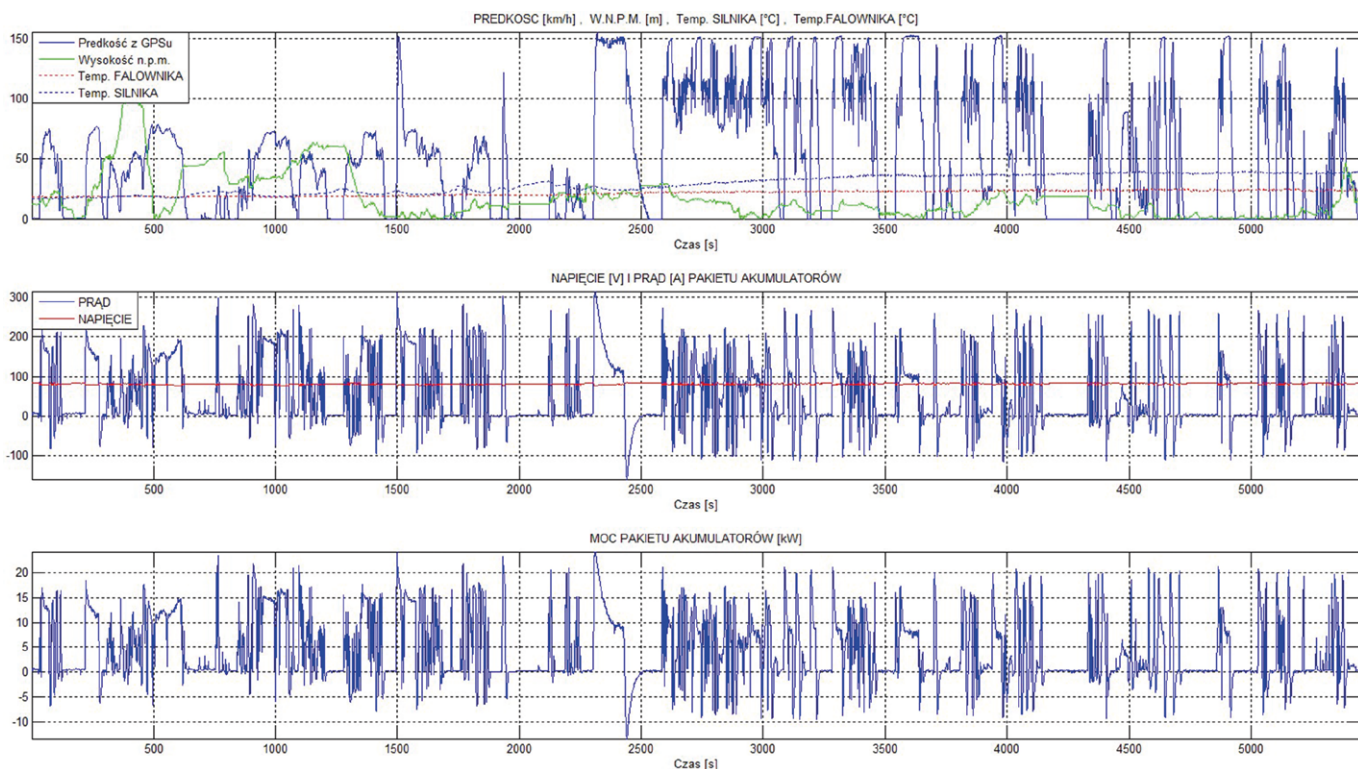
Średnie zużycie energii elektrycznej przy ekologicznej, oszczędnej i płynnej eksploatacji motocykla wyniosło ok. 35 Wh/km. Prędkość maksymalna pojazdu ograniczona została do 150 km/h, z uwagi na kwestie związane z bezpieczeństwem i progiem dopuszczalnej prędkości maksymalnej w Polsce, ale także z uwagi na znacznie zwiększające się opory powietrza przy prędkościach powyżej 70 km/h. Wzrost prędkości o 10% w stosunku do prędkości wyjściowej powoduje zwiększenie zapotrzebowania na moc silnika średnio o ok. 20%. Wzrost prędkości z 50 km/h do 100 km/h skutkuje prawie pięciokrotnym wzrostem zapotrzebowania na moc silnika. Wzrost prędkości z 50 km/h do 150 km/h skutkuje już prawie piętnastokrotnym wzrostem zapotrzebowania na moc silnika, a osiągnięcie prędkości 200 km/h wymaga ponad trzydziestokrotnego wzrostu zapotrzebowania na moc silnika.

Na podstawie przeprowadzonych testów można stwierdzić, iż bardzo istotnym elementem, oprócz sprawności elektrycznego układu napędowego, wpływającym na zużycie energii przez motocykl jest kształt jego karoserii. Wpływ kształtu karoserii przekłada się na moc, jaką musi wygenerować układ napędowy w celu pokonania oporu powietrza i wyrażony jest za pomocą współczynnika oporu powietrza  $C_x$ . Współczynnik ten dla motocykli sportowych może wahać się w granicach od 0,2–0,4, turystycznych 0,4–0,5, a enduro od 0,5 nawet do 0,8. Dla badanego pojazdu przyjęto wartość współczynnika  $C_x$  (razem z kierowcą) na poziomie 0,65. Dla porównania, współczynnik  $C_x$  dla samochodów osobowych wynosi odpowiednio od 0,3 dla samochodów małych do 0,5 dla samochodów terenowych [9].

Ograniczenie mocy dla badanej konstrukcji do poziomu 11 kW (wymagania dla kategorii prawa jazdy A1) skutkuje osiągnięciem maksymalnej prędkości przez pojazd na poziomie 120 km/h.

Zdjęcie wykonane kamerą termowizyjną (rys. 9) dowodzi, iż założenia projektowe (zakładany przyrost temperatury na poziomie 30°C) sprawdziły się w praktyce, a układ napędowy nie wymaga dodatkowego chłodzenia. Współczynnik stosunku mocy (28 kW) do masy własnej (230 kg) dla testowanego motocykla wyniósł 0,12 kW/kg. Możliwość ograniczania mocy przez odpowiednią konfigurację parametrów falownika stwarza sposobność do zwiększenia zasięgu pojazdu, kosztem przyjemności płynących z dynamiki użytkowania elektrycznego układu napędowego. Skonstruowany w Akademii Morskiej w Gdyni elektryczny układ napędowy dla motocykla wykazał zasadność swojej konstrukcji podczas testów i praktyczną przydatność w czasie eksploatacji w życiu codziennym.

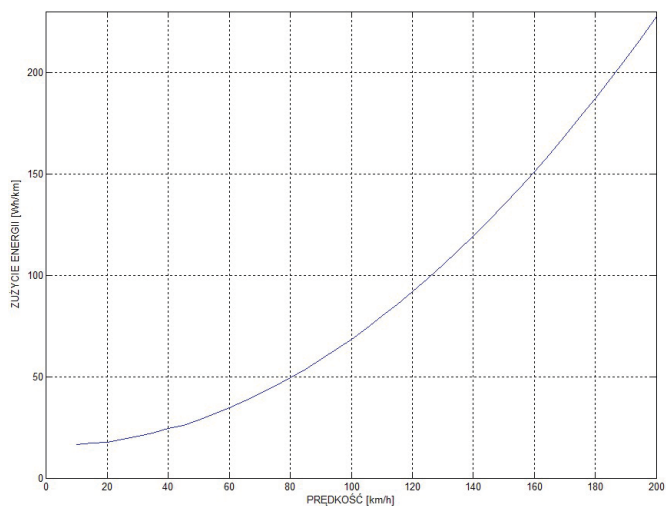
Zastosowanie elektrycznego układu napędowego wpływa na redukcję poziomu hałasu [14], czyli ogółu dźwięków generowanych przez przemieszczające się pojazdy, a mający znaczny



**Rys. 8.** Przykładowe przebiegi wielkości zarejestrowanych podczas testów motocykla z napędem elektrycznym



**Rys. 9.** Termogram motocykla z napędem elektrycznym skonstruowanego w Akademii Morskiej w Gdyni



**Rys. 10.** Średnie zużycie energii przez motocykl z napędem elektrycznym w zależności od prędkości

wpływ na samopoczucie człowieka (zmęczenie, brak koncentracji). Hałas, jako suma niepożądanych dźwięków, stanowi zbiór wprowadzonych w drgania cząsteczek powietrza rozchodzących się wokół ich źródła w postaci fal akustycznych.

Źródłem hałasu są dźwięki pochodzące z układu napędowego, kontaktu opon z nawierzchnią, a także dźwięki generowane przez karoserię pojazdu w zależności od jego

prędkości – dźwięki aerodynamiczne. Hałas jest opisywany za pomocą takich wielkości, jak ciśnienie akustyczne mierzone w paskalach (Pa) oraz częstotliwość wyrażona w cyklach na sekundę – hercach (Hz). Ciśnienie akustyczne stanowi zmierzoną chwilową różnicę ciśnienia pomiędzy przemieszczającą się falą akustyczną a ciśnieniem atmosferycznym. Z uwagi na szeroki zakres zmian ciśnienia akustycznego stosuje się



Rys. 11. Porównanie hałasu emitowanego przez motocykl z napędem spalinowym (moto. spalin.) i motocykl z napędem elektrycznym (moto. EV)

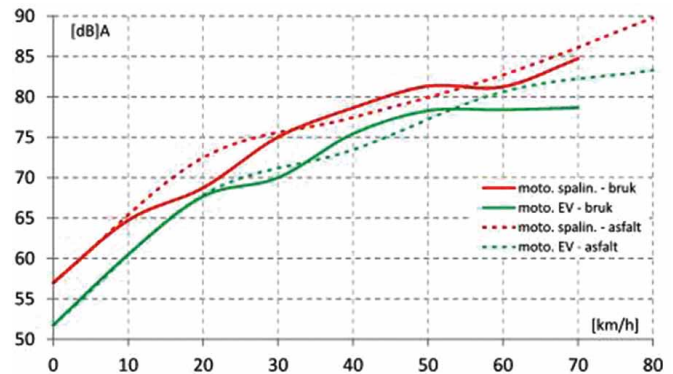
uproszczenia polegające na użyciu skali logarytmicznej, jako naturalnej skali określającej reakcję zmysłów człowieka na bodźce (słuch, węch, wzrok, zmiany temperatury) zgodnie z prawem Webera-Fechnera. W praktyce przyjęto pojęcie poziomu ciśnienia dźwięku wyrażanego w decybelach, jako wartości mierzonej w stosunku do względnej wartości ciśnienia odniesienia  $p_0 = 0,00002 \text{ Pa}$  (0 dB). Na tej podstawie poziom natężenia dźwięku – poziom hałasu można wyznaczyć za pomocą pomiaru ciśnienia akustycznego, które mierzymy używając przyrządów nazywanych sonometrami. Dodatkowo właściwości narządów słuchu sprawiają, iż ucho ludzkie różnie odbiera dźwięki o różnych częstotliwościach. Z tego powodu do oceny oddziaływania hałasu na człowieka wprowadza się korekcję poziomów ciśnienia akustycznego zgodnie z charakterystykami częstotliwościowymi A, C, G i odpowiednio oznacza jako dB(A), dB(C), dB(G) [14].

Na rysunku 12 przedstawiono porównanie wyników hałasu emitowanego przez motocykl z napędem spalinowym oraz elektrycznym. Pojazdy poruszały się po nawierzchni asfaltowej oraz wyłożonej kostką brukową.

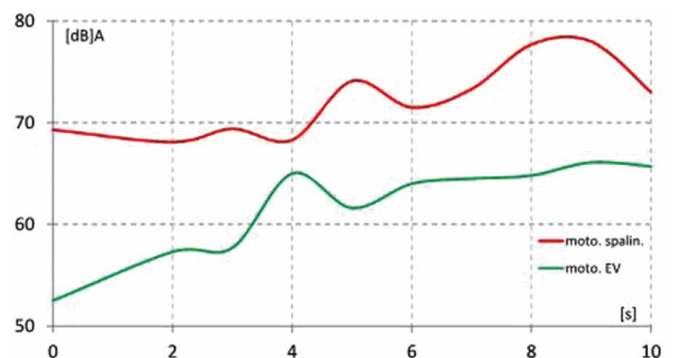
Pomiary hałasu wykonano zgodnie z zaleceniami zawartymi w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia (Dz.U.2003.32.262), a także w Rozporządzeniu Parlamentu Europejskiego i Rady Europy (UE) NR 540/2014 z dnia 16 kwietnia 2014 r. (ISO 362).

Na rysunku 13 przedstawiono zarejestrowane wyniki hałasu dla pojazdów, które ruszały z miejsca i oddalały się od rejestratora hałasu (sonometru).

Przeprowadzone badania porównawcze dla motocykla z napędem spalinowym i motocykla z napędem elektrycznym potwierdzają, iż zastosowanie tych drugich wpływa na redukcję poziomu hałasu. Głównym źródłem hałasu emitowanego przez motocykl z napędem elektrycznym jest układ przeniesienia napędu, składający się z dwóch zębatek i łańcucha. Gdyby układ przeniesienia napędu zamieniono na pasek zębaty lub wały z przegubem Kardana, uzyskany poziom emitowanego hałasu byłby niższy.



Rys. 12. Porównanie hałasu emitowanego przez motocykl z napędem spalinowym (moto. spalin.) i motocykl z napędem elektrycznym (moto. EV)



Rys. 13. Porównanie hałasu emitowanego przez motocykle oddalające się od rejestratora hałasu


## 5. Podsumowanie

Zastosowanie elektrycznego układu napędowego w motocyklu korzystnie wpływa na:

- ograniczenie emisji szkodliwych gazów;
- redukcję zużycia energii (ok. 35 Wh/km) przeznaczanej na ruch pojazdu w stosunku do motocykli spalinowych (ok. 635 Wh/km);
- ograniczenie kosztów eksploatacji motocykla (od 2 do 5 zł/100 km w zależności od cen i taryfy energii) w stosunku do motocykli spalinowych (ok. 30 zł/100 km (średnie zużycie Pb 7l/100 km));
- redukcję poziomu hałasu na otoczenie w stosunku do motocykli spalinowych, szczególnie podczas ruszania i przyspieszania.

### Literatura

- [1] [www.google.com/patents/US552271](http://www.google.com/patents/US552271)
- [2] Popular Mechanics. Hearst Magazines 10/1911, p. 560. ISSN 0032-4558.
- [3] [www.gracesguide.co.uk/Ransomes,\\_Sims\\_and\\_Jefferies:\\_Motorcycles](http://www.gracesguide.co.uk/Ransomes,_Sims_and_Jefferies:_Motorcycles) (dostęp: 02.2016)
- [4] TRAGATSCH E.: *Alle Motorräder 1894-1981: Eine Typengeschichte. 2500 Marken aus 30 Ländern*. ISBN 3-87943-410-7.
- [5] [americanhistory.si.edu/fuelcells/alk/alk2.htm](http://americanhistory.si.edu/fuelcells/alk/alk2.htm) (dostęp: 03.2016)
- [6] [motorcyclemuseum.org/halloffame/detail.aspx?RacerID=333](http://motorcyclemuseum.org/halloffame/detail.aspx?RacerID=333) (dostęp: 03.2016)
- [7] ROSSA R., KRÓL E.: *Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „E-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 4/2012.
- [8] ŁEBKOWSKI A.: *Układ monitorowania parametrów pakietu akumulatorów pojazdu z napędem elektrycznym z wykorzystaniem technik GSM/GPS*. „Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne” 11/2014.
- [9] *Aerodynamika: oporna materia*. „Świat Motocykli” 9/2014.
- [10] ANDRIEU C., PIERRE G.S.: *Using statistical models to characterize eco-driving style with an aggregated indicator*. 2012 Intelligent Vehicles Symposium, DOI:978-1-4673-2118-1 ©2012 IEEE.
- [11] BARKENBUS J.N.: *Eco-driving: An overlooked climate change initiative*. „Energy Policy” 38/2010, p. 762–769.
- [12] AUERBACH P., KUKLA W.: *Istota i zasady ekojazdy, czyli integralna część szkolenia w przedsiębiorstwach świadczących usługi transportowe*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej” 60/2013.
- [13] CHOU W.Y., LIN Y.C., CHEN S.Y.: *Intelligent eco-driving suggestion system based on vehicle loading model*. IEEE 12th International Conference on ITS Telecommunications 2012.
- [14] ŁEBKOWSKI A.: *Emisja hałasu w pojazdach z napędem elektrycznym*. „Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa” 7/2015.

 dr inż. Andrzej Łebkowski – Katedra Automatyki Okrętowej,  
Akademia Morska w Gdyni, e-mail: [andrzejl@am.gdynia.pl](mailto:andrzejl@am.gdynia.pl)

artykuł recenzowany