THE IMPACT OF APPLICATION OF PHOTOVOLTAIC CELLS FOR BUS ECOLOGICAL PROPERTIES

WPLYW ZASTOSOWANIA OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH NA EKOLOGICZNOŚĆ AUTOBUSU MIEJSKIEGO

Jerzy Merkisz, Paweł Fuc, Maciej Bajerlein, Piotr Lijewski,
Łukasz Rymaniak, Andrzej Ziółkowski

Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

e-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl; pawel.fuc@put.poznan.pl; maciej.bajerlein@put.poznan.pl;
piotr.lijewski@put.poznan.pl; lukasz.m.rymaniak@doctorate.put.poznan.pl;
andrzej.wo.ziolkowski@doctorate.put.poznan.pl

Abstract: The paper presents discusses the application of photovoltaic cells and provides information on solar energy in Poland. Article presents examples of research emission two buses, one of them was equipped with additional auxiliary photovoltaic system. Measurements was carried out in on-road, in urban traffic – bus line public transport. For measurement was used mobile gas analyzer included in Portable Emissions Measurement Systems (PEMS). The results have been developed in such a way as to determine the relative influence of the system implemented on the total environmental performance of the vehicle.

Keywords: on-road tests, exhaust emissions, photovoltaic cells

Streszczenie: W artykule omówione zostały zagadnienia dotyczące zastosowania ogniw fotowoltaicznych oraz przedstawiono informacje na temat energetyki słonecznej w Polsce. Zaprezentowano przykładowe wyniki badań emisyjnych dwóch autobusów, z których jeden wyposażony był w dodatkowy system ogniw fotowoltaicznych wspomagający układ napędowy. Pomiarzy zrealizowano w rzeczywistych warunkach eksploatacji, w ruchu miejskim, na drodze odzwierciedlającej trasę obsługiwaną przez przewoźnika miejskiego. W pomiarach wykorzystany został mobilny analizator spalin należący do grupy PEMS (Portable Emissions Measurement Systems). Otrzymane wyniki zostały opracowane w taki sposób, aby wyznaczyć względny wpływ zaimplementowanego systemu na całkowitą ekologiczność pojazdu.

Słowa kluczowe: badania drogowe, emisja gazów wylotowych, ogniwa fotowoltaiczne

1. Wstęp

Problemy ekologii i zagrożenia środowiska przez motoryzację są obecnie bardzo poważnie traktowane ze względu na duży przyrost ilości pojazdów samochodowych poruszających się na drogach. Producenci działający w przemyśle motoryzacyjnym poszukują rozwiązań, które skutecznie pozwolą zmniejszyć energochłonność i jednocześnie zwiększyć ekologiczność pojazdów [7]. Jednym ze sposobów pozwalających osiągnąć wymienione cele, jest wykorzystanie rozwiązań odciążających silnik spalinowy, np. wykorzystanie dodatkowych źródeł energii odnawialnej. Szczególnie ważne jest to w przypadku autobusów miejskich, które mają bezpośredni wpływ na poziom zanieczyszczeń w aglomeracjach.

Ogniwa fotowoltaiczne mogą być wykorzystywane, jako pomocnicze źródła energii w pojeździe. Zasadniczą ich zaletą jest fakt, że przetwarzają energię słoneczną w elektryczną, nie emitując produkcji zanieczyszczeń, hałasu, a także innych niepożądanych czynników wpływających na środowisko naturalne. Niestety omawiane rozwiązanie charakteryzuje się pewnymi wadami związanymi z ekonomią zastosowania, sprawnością i ewentualną toksycznością w procesie produkcji. Zastosowanie ogniw fotowoltaicznych w autobusie miejskim może korzystnie wpłynąć na zmniejszenie emisji związków toksycznych, a także zmniejszenie kosztów eksploatacji.

2. Energetyka słoneczna w Polsce

Centralnym ciałem Układu Słonecznego (US) jest słońce, które jest jednocześnie najbliższą gwiazdą sąsiadującą z Ziemią. Odległość między nimi wynosi 149,6 milionów kilometrów. Słońce to kula gazowa o masie $1,931 \times 10^{30}$ kg będąca głównym źródłem energii docierającej do powierzchni Ziemi. Temperatura efektywna fotosfery wynosi w przybliżeniu 5800 K. Centralne ciało US emituje energię $3,9 \times 10^{26}$ J z częstotliwością 1 Hz. Tak duża wartość energii powstaje w wyniku przemian termojądrowych wodoru w hel we wnętrzu gwiazdy [8].

Słońce na swojej powierzchni emituje promieniowanie słoneczne będące strumieniem energii, które rozchodzi się we wszystkich kierunkach równomiernie. Na zewnętrznej warstwie atmosfery Ziemi strumień energii słońca ma moc $1,36 \text{ kW/m}^2$ i jest nazywany stałą słoneczną. Podczas przejścia strumienia energii przez warstwy atmosfery promieniowanie słabnie w następstwie odbicia, rozproszenia, a także pochłonięcia przez pyły i cząsteczki gazów.

Jak już wspomniano podczas przejścia promieniowania przez atmosferę ulega ono osłabieniu. Szacuje się, że w ciągu roku około 40% promieniowania słonecznego jest odbijane przez warstwy atmosfery, 20% jest pochłaniane przez cząsteczki, a do powierzchni naszej planety dochodzi pozostałe 40%. Podane wartości są średnią

dla całej Ziemi. Promieniowanie docierające do dolnych warstw atmosfery występuje w formie bezpośredniej i rozproszonej (odbitej). Światowe prognozy wskazują, że w najbliższych latach energia słoneczna, należąca do grupy źródeł energii odnawialnej, będzie coraz bardziej wykorzystywana we wszystkich gałęziach gospodarki z transportem włącznie.

Polska pod względem nasłonecznienia ma podobne warunki jak: Niemcy, Czechy, Węgry, itd. Położenie geograficzne kraju, a także warunki klimatyczne i naturalne pozwalają na znacznie szersze niż obecnie wykorzystanie energii słonecznej. W Polsce panuje klimat umiarkowany, dla którego średnia liczba godzin słonecznych wynosi około 1600 h/rok. Warto zaznaczyć, że w okresie od kwietnia do września na powierzchnię kraju dociera w przybliżeniu 80% całkowitej energii słonecznej. Uśredniona gęstość energii promieniowania słonecznego dla Polski w skali roku wynosi od $950 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ (południowo- zachodnia część Polski – obszar Sudetów) do $1081 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ (wschodnia część Polski) [6]. Duże ilości energii docierają również na pas nadmorski. Promieniowanie rozproszone występujące na obszarze Polski jest znaczące i wynosi średnio 50%, w grudniu 72%, w czerwcu 44%. Na podstawie [6] można podać średnie udziały procentowe sum miesięcznych promieniowania w sumie rocznej (rys. 1).

Rys. 1. Procentowy udział promieniowania miesięcznego w sumie rocznej [6]

W okresie pomiędzy majem, a sierpniem na powierzchnię Polski dociera ok. 58% promieniowania słonecznego w odniesieniu do całego roku kalendarzowego. Czerwiec jest najbardziej korzystnym miesiącem, ponieważ szacuje się, że w sumie rocznej jego udział wynosi 16% [6]. Najmniej promieniowania dociera w grudniu i styczniu, w każdym z tych miesięcy udział jest mniejszy niż 2%. Nasłonecznienie miesięczne dla Polski przyjmuje wartości od 40 MJ/m²/miesiąc (miesiące zimowe) do ponad 500 MJ/m²/miesiąc (miesiące letnie). Takie zróżnicowanie wynika z faktu, iż w miesiącach zimowych występuje niewielka wysokość słońca nad horyzontem, co niekorzystnie wpływa na pochłanianie powierzchni poziomych bezpośredniej składowej promieniowania, a także występuje krótki czas operacji słońca w ciągu dnia. Średnia roczna usłonecznienia wynosi około 1600 h/rok z czego 1300 h (75%) występuje w miesiącach letnich: kwiecień – wrzesień. Pozostała część usłonecznienia występuje w miesiącach zimowych. Podane wartości są obliczone na podstawie wieloletnich obserwacji i badań. Pomiędzy poszczególnymi latami mogą wystąpić znaczące różnice. W przypadku miasta Poznania udział lipca w odniesieniu do całego roku wynosi 15% (łącznie 523 MJ/m²/miesiąc), jednak w pewnym przypadku udział ten wyniósł około 11% (łącznie 395 MJ/m²/miesiąc). W innym roku dla tego miasta udział lipca osiągnął w przybliżeniu 20% (łącznie 686 MJ/m²/miesiąc) [1, 6].

3. Istota działania i sprawność ogniw fotowoltaicznych

Ogniwa fotowoltaiczne to w swej budowie złącza półprzewodnikowe typu p – n, czyli dwa półprzewodniki połączone ze sobą (półprzewodnik p i n – rys. 2). Najczęściej wykorzystywane są rozwiązania bazujące na krzemie. Pomiędzy półprzewodnikami, na ich łączeniu, powstaje bariera potencjałów pomiędzy którą elektrony (-) z obszaru n i dziury (+) z obszaru p nie mogą się przemieszczać gdy na układ nie oddziałuje światło słoneczne – w złącze nie uderzają fotony. W wyniku oddziaływania światła słonecznego na powierzchnię ogniwa następuje wybijanie elektronów z orbit walencyjnych. Połączenie złącza p i n zewnętrznym obwodem elektrycznym powoduje przepływ prądu elektrycznego. Dzieje się tak, ponieważ nieustannie wybijane są elektrony przez fotony i dokonywana jest rekombinacja związana z przemieszczaniem się dziur w półprzewodniku. W przypadku gdy fotony przestają oddziaływać na powierzchnię zewnętrzną ogniwa, proces wybijania zanika, a tym samym zanika również różnica potencjałów na końcach obwodów.

Rys. 2. Zasada działania ogniwa fotowoltaicznego [9]

Materiały półprzewodnikowe charakteryzują się dużym potencjałem energetycznym, który może uniemożliwić wybijanie elektronów walencyjnych. Z tego powodu, strukturę bazową fotoogniw uzupełnia się o specjalne dodatki w postaci różnego rodzaju atomów o charakterze donorowym lub akceptorowym. Takie postępowanie pozwala obniżyć potencjał elektryczny, zwany również przerwą energetyczną. W grupie tego typu dodatków można wyróżnić między innymi: fosfor i bor.

Koszt i sprawność ogniwa fotowoltaicznego są kluczowymi właściwościami decydującymi o możliwości i sensowności zastosowania ich do określonych celów. Sprawność fotoogniwa określana jest jako iloraz mocy elektrycznej do iloczynu pola powierzchni ogniwa i energii fotonów.

$$\eta = \frac{U * I}{A * E}$$

gdzie:

- U – napięcie prądu generowane przez ogniwo fotowoltaiczne;
- I – natężenie prądu generowane przez ogniwo fotowoltaiczne;
- A – pole powierzchni czynnej ogniwa fotowoltaicznego;
- E – energia fotonu wyrażana w elektronowoltach.

Ogniwo fotowoltaiczne można także charakteryzować współczynnikiem FF (Fill Factor), który wskazuje jakość ogniwa. Im bliższy jest on wartości 1, tym lepszą charakterystykę posiada fotoogniwo. Współczynnik FF wyznaczany jest za pomocą wzoru:

$$FF = \frac{U_{\max} * I_{\max}}{U_{\text{open}} * I_{\text{short}}}$$

gdzie:

- $U_{\max}$ – maksymalne napięcie prądu generowane przez fotoogniwo przy $P_{\max}$;
- $I_{\max}$ – maksymalne natężenie prądu generowane przez fotoogniwo przy $P_{\max}$;
- U_{open} – napięcie obwodu otwartego;
- I_{short} – prąd zwarcia.

4. Metodologia badawcza

Obiektami badawczymi były dwa autobusy miejskie o długości 18 m. Pojazd badany w pierwszym cyklu wyposażony był w konwencjonalny układ napędowy. W drugiej serii badaniom poddano podobny autobus, w którego budowie zastosowano ogniwa fotowoltaiczne wspomagające układ elektryczny. Ich zastosowanie miało na celu zmniejszenie obciążenia silnika spalinowego generowanego przez alternator. Na dachu autobusu o wymiarach 8,94 x 2,4 (długość x szerokość) zostało zamontowanych 15 paneli solarnych, połączonych ze sobą szeregowo. Powierzchnia pojedynczego zestawu wynosiła 1,32 m². Szczegółowe dane dotyczące paneli zbudowanych na bazie krzemu monokrystalicznego zestawiono w tabeli 1. Cała energia uzyskana z ogniw fotowoltaicznych przekazywana była do przetwornicy, a dalej do akumulatorów energii elektrycznej.

Tabela 1. Dane techniczne zastosowanych ogniw fotowoltaicznych

Moc [W]	150
Napięcie nominalne [V]	24,0
Prąd zwarcia [A]	4,8
Maks. napięcie [V]	43,4
Wymiary dł.x szer. [mm x mm]	1622 x 814
Masa [kg]	17,2

Pomiar emisji gazów wylotowych silnika spalinowego w warunkach drogowych zrealizowano na ulicach Poznania, zgodnie z trasą kursowania liniowego autobusu miejskiego. Badania zostały wykonane w dniu roboczym, w godzinach wczesnopopołudniowych przy zachmurzeniu lekkim w miesiącu kwietniu. Pojazd obciążono dodatkową masą 4 ton, odpowiadającą średniemu obciążeniu autobusu liniowego kursującego w aglomeracji poznańskiej. Trasa przejazdu zaczynała się na ulicy Droga Dębińska dalej biegła ulicami Grobla, Garbary, Szelągowska i kończyła się na ulicy Słowiańskiej (rys. 3). Całkowity dystans wyniósł 6,14 km.

*Rys. 3. Trasa przejazdu autobusu w aglomeracji poznańskiej
(wykonano na podstawie <http://maps.google.pl/>)*

Pomiary emisji przeprowadzono za pomocą mobilnego analizatora toksyczności spalin Semtech DS firmy Sensors Inc. Podczas przejazdu mierzone były wartości następujących związków toksycznych: CO, CO₂, NO_x i HC. Urządzenie realizowało pomiar stężeń związków szkodliwych z jednoczesnym uwzględnieniem masowego natężenia przepływu, a także rejestrowało dane generowane przez centralną jednostkę sterującą pojazdu. Pomiaru prędkości oraz położenia pojazdu dokonano za pomocą systemu GPS. Zmiany momentu obrotowego i prędkości obrotowej wału korbowego silnika zostały odczytane z systemu diagnostycznego pojazdu [2-5].

5. Analiza wyników badań

Czas przejazdu pierwszego pojazdu wynosił 1049 s przy średniej prędkości 19,38 km/h. Autobus wyposażony w system ogniw fotowoltaicznych uzyskał średnią prędkość 20,07 km/h, a całkowity czas przejazdu wyniósł 1012 s.

Na podstawie charakterystyk gęstości czasu pracy badanych autobusów wyznaczono udział parametrów pracy pojazdów podczas trwania całego testu. Zakres pracy pojazdów występuje w obszarze prędkości 0-15 m/s oraz w zakresie przyspieszeń na poziomie -0,3 m/s²-0,3 m/s². Znaczący udział czasu pracy pojazdów

w jeździe miejskiej przypada na zakres pracy biegu jałowego, którego udział wyniósł 31-34%, natomiast dla zakresu prędkości 8-14 m/s udział czasu pracy osiągnął w przybliżeniu 21%. Uzyskanie zbliżonych przedziałów gęstości czasowej świadczy o tym, że badania zostały przeprowadzone w podobnych warunkach jazdy miejskiej.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe przebiegi emisji sekundowej – w tych przypadkach CO₂. Emisja tego związku jest ściśle związana ze zużyciem paliwa przez pojazd. Jak wynika z zaprezentowanych przebiegów, w przypadku pojazdu wyposażonego w system fotoogniw maksymalne chwilowe wartości emisji CO₂ nie przekroczyły 30 g/s, tak jak miało to miejsce dla pierwszego autobusu. Średnia wartość emisji dla rozwiązania tradycyjnego wyniosła 5,88 g/s, natomiast w drugim cyklu osiągnęła 5,73 g/s (różnica wyniosła 2,56%).

Rys. 4. Prędkość autobusu oraz przebieg sekundowej emisji CO₂ w funkcji czasu – pojazd z napędem konwencjonalnym

Rys. 5. Prędkość autobusu oraz przebieg sekundowej emisji CO₂ w funkcji czasu – pojazd wyposażony w system ogniw fotowoltaicznych

W celu dokonania oceny ekologiczności pojazdu wyposażonego w innowacyjny system fotoogniw, przeprowadzono porównanie względnej emisji jednostkowej uzyskanej w poszczególnych seriach pomiarowych (rys. 6). Wyniki otrzymane dla pojazdu konwencjonalnego stanowiły odniesienie dla drugiego autobusu. W przypadku emisji jednostkowej CO, CO₂, NO_x oraz HC stwierdzono, że zastosowanie systemu ogniw fotowoltaicznych korzystnie wpłynęło na ekologiczność pojazdu – emisja we wszystkich przypadkach zmniejszyła się. Jest to bezpośrednio związane ze zmniejszeniem obciążenia silnika (mniejsze obciążenie generowane przez alternator), a tym samym zmniejszeniem zapotrzebowania na paliwo. Dla pojazdu z zaimplementowanym systemem fotowoltaicznym względna emisja jednostkowa zmniejszyła się w przypadku: CO – 1,8%; CO₂ – 2,4%; NO_x – 2,9% oraz HC – 0,7%.

Rys. 6. Porównanie względnej emisji jednostkowej uzyskanej podczas badań warunkach jazdy miejskiej

6. Podsumowanie

Ogniwa fotowoltaiczne mogą być z powodzeniem wykorzystywane w motoryzacji jako pomocnicze źródło energii. Zastosowanie ich w autobusach miejskich niesie ze sobą wiele korzyści, przede wszystkim zmniejszenie emisji związków szkodliwych. Ponadto konstrukcja autobusu miejskiego pozwala na wykorzystanie powierzchni dachu, a dodatkowa masa systemu stanowi niewielki udział w konstrukcji całego pojazdu. Dodatkowe badania przepływu energii w systemie wykazały, że maksymalna moc rozwiązania podczas realizacji pomiarów w rzeczywistych warunkach ruchu wynosiła 127 W dla jednego panelu, a więc

w sumie otrzymano 1905 W dodatkowej mocy. Szczególnie istotne jest to kiedy silnik spalinowy pracuje na biegu jałowym. Dodatkowa energia może być wykorzystana do obsługi układów pojazdu, takich jak: klimatyzacja, ogrzewanie, pneumatyka itp.

Na podstawie bilansu węgla obliczono przebiegowe zużycie paliwa pojazdu (rys. 7). Jak wskazuje względne porównanie, zastosowanie systemu fotoogniw pozwala zmniejszyć zużycie paliwa o 1,9%. W przypadku zastosowania ogniw o większej sprawności różnica ta osiągnęłaby jeszcze większe wartości.

Rys. 7. Porównanie względnego przebiegowego zużycia paliwa uzyskanego podczas badań warunkach jazdy miejskiej

Dodatkowa energia elektryczna otrzymana z energii słonecznej była przetwarzana i magazynowana w akumulatorach. To generowało pewne straty. Można by uniknąć tej sytuacji w przypadku zastosowania systemu w pojeździe hybrydowym. Przy odpowiedniej konstrukcji układu, energia elektryczna trafiałaby bezpośrednio do odbiorników. Zastosowanie na masową skalę systemów fotoogniw wymaga przeprowadzenia złożonego bilansu ekonomicznego uwzględniającego wiele aspektów. Należałoby również przeprowadzić badania w różnych miesiącach, w różnych miejscach, przy zmiennych warunkach atmosferycznych, aby określić ogólną sprawność rozwiązania i przydatność jego stosowania na danym terenie.

7. Literatura

- [1] Kulgmann E. Radziemska E.: Alternatywne źródła energii. Energetyka fotowoltaiczna. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, 1999.
- [2] Merkisz J., Lijewski P., Fuc P., Pielecha J.,: Exhaust emission tests from agricultural machinery under real operating conditions. SAE 2010 Commercial Vehicle Engineering Congress, October, 2010, Chicago, IL, USA, 2010, SAE Paper 2010-01-1949.

- [3] Merkisz J., Fuc P.: The Exhaust Emission from Light Duty Vehicles in Road Test in Urban Traffic. SAE Technical Paper Series 2010-01-1558, (2010).
- [4] Merkisz J., Pielecha J., Fuc P., Lijewski P.: The analysis of the PEMS measurements of the exhaust emissions from city buses using different research procedures. The 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC 2012, Org. KIEE, Paper No. F20120618-0339Seul 9-12.10.2012, s. 903-907.
- [5] Merkisz J., Idzior M., Pielecha J., Gis. W.: Emission tests in city buses under real road conditions. Book "Urban Transport XVI – Urban Transport and the Environment in the 21st Century", Edited by A. Pratelli and C.A. Brebbia. WIT Transactions. WIT Press 2010, Wessex, UK, s. 181-189.
- [6] Podegrodzki J.: Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961 – 1995. Materiały Badawcze IMiGW, Warszawa, 2000.
- [7] Walsh M. P.: Global trends in motor vehicle pollution control; a 2011 update. Part 3. Combustion Engines / Silniki Spalinowe nr 4/2011 (147), p. 98-103, (2011).
- [8] Zawadzki M.: Kolektory słoneczne, Pompy ciepła – na tak. Wydawnictwo Polska Ekologia, Warszawa, 2003.
- [9] www.apec-vc.or.jp

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz. *Profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*

Dr inż. Paweł Fuc. *Adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*

Dr inż. Maciej Bajerlein. *Adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu*

Dr inż. Piotr Lijewski. *Adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*

Mgr inż. Lukasz Rymaniak. *Doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*

Mgr inż. Andrzej Ziolkowski. *Doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu.*