

Technologia fotowoltaiczna autobusów miejskich zmniejszająca zużycie paliwa

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań wytwarzania energii elektrycznej przez panele fotowoltaiczne zamontowane na dachu autobusu. Badania przeprowadzono na autobusie miejskim poruszającym się na różnych trasach w Lublinie. Autobus zaopatrzony został w panele fotowoltaiczne oraz układy pomiarowe. Na podstawie zarejestrowanych pomiarów obliczono stopień zmniejszenia produkcji energii elektrycznej pochodzących z paneli w stosunku do niezacienionego systemu fotowoltaicznego umieszczonego horyzontalnie na dachu Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej.

Abstract: The article presents the results of tests of electricity generation by photovoltaic panels installed on the city bus roof. The research was carried out on an urban bus travelling on various routes in the city of Lublin. The bus is equipped with photovoltaic panels and measuring systems. On the basis of the recorded measurements, a degree of reduction of electricity production from the panels was calculated in relation to an unmodified photovoltaic system placed horizontally on the roof of the Faculty of Mechanical Engineering of the Lublin University of Technology. (City bus photovoltaic technology reducing fuel consumption).

Słowa kluczowe: fotowoltaika, autobus miejski, instalacja elektryczna, silnik spalinowy

Wprowadzenie

Rozwój techniki autobusowej powodowany wymaganiami pasażerów wobec komfortu podróży (klimatyzacja, ogrzewanie), komunikacji audiowizualnej z organizatorem transportu (informacje foniczne, telewizja pokładowa), oświetleniem wewnętrznym oraz możliwością elektronicznego wspomaganie zarządzaniem ruchem miejskiego (systemy GPS, Wi-Fi, monitoring) powoduje rosnące obciążenie elektryczne sieci autobusowej. Dodając do odbiorników mocy elektrycznej już istniejące urządzenia pokładowe (oświetlenie zewnętrzne, komputerowe systemy sterowania, kasowniki), pobór prądu we współczesnym autobusie miejskim jest istotnym elementem w ogólnym bilansie mocy użytecznej. Źródłem energii elektrycznej autobusu jest alternator wraz z regulatorem napięcia, napędzany przez silnik spalinowy autobusu. Wejściową energią jest energia chemiczna zgromadzona w oleju napędowym.

W ciągu roboczego cyklu dziennego, przejeżdżając dystans 200 km w ciągu 15 godzin, autobus miejski potrzebuje na pokonanie oporów ruchu około 200 kWh energii mechanicznej (co wymaga zużycia około 900 kWh energii chemicznej zawartej w paliwie) zaś na zasilanie urządzeń elektrycznych potrzebuje około 25 kWh energii elektrycznej (co oznacza 210 kWh energii chemicznej zawartej w paliwie).

Zrealizowanie idei zastosowania paneli fotowoltaicznych w autobusach miejskich wymaga rozwiązania istotnych problemów naukowo-badawczych. Porównanie montażu paneli nieruchomego z panelem poruszającym się wraz z autobusem prowadzi do wyliczenia podstawowych różnic.

Ogniwa fotowoltaiczne nie powinny powiększać oporu czołowego pojazdu, co jest możliwe do uzyskania dzięki położeniu horyzontalnemu. Takie położenie zmniejsza produktywność ogniw (o około 13%). Ponadto pogorszone w stosunku do odkrytej powierzchni oświetlenie słoneczne ulic miejskich z powodu wysokiej zabudowy, drzew, obiektów architektonicznych, zmniejszonej przezroczystości powietrza nad jezdnią może być dodatkowym czynnikiem zmniejszającym produktywność ogniw. Dach autobusów zawiera wiele elementów technicznych mogących skomplikować oświetlenie ogniw. Równocześnie promieniowanie słoneczne bardzo uzależnione jest od pory roku, pory dnia i pozostałych czynników geograficznych.

Ruch pojazdu na którego dachu zamontowane zostały panele, powoduje powstanie skomplikowanego w czasie oświetlenia poszczególnych ogniw, przy czym dynamika

zmian oświetlenia jest znacznie większa w porównaniu z nieruchomym panelem. Po pierwsze, należy adaptacyjnie śledzić punkt pracy ogniw zapewniający maksimum mocy. Po drugie, należy dopasować liczbę regulatorów prądowych tak, aby uzyskać maksymalną produktywność nierównomiernie oświetlonych ogniw przy jak najmniejszej liczbie regulatorów.

Ogniwa słoneczne wrażliwe są na naprężenia mechaniczne, które mogą powodować ich zniszczenie. Należy opracować sposób montażu zapewniający ochronę przed przekroczeniem obciążeń mechanicznych panelu. Równocześnie nie można przekroczyć masy paneli tak aby nie obciążać konstrukcji dachu autobusu i jednocześnie nie zwiększać zużycia paliwa. Jednym z rozwiązań może być wykorzystanie ciągłej obecności kierowcy lub obsługi zajezdni i opracowanie dynamicznych systemów chroniących ogniwa bez konieczności użycia ciężkich konstrukcji nośnych.

Zamontowany zestaw ogniw będzie wpływał na opływ powietrza wokół autobusu zmieniając siły aerodynamiczne. Równocześnie będąc przytwierdzony do metalowego dachu może ulegać silnemu rozgrzaniu, co doprowadzi do zmniejszenia sprawności przetwarzania energii solarnej. Niezbędne były prace badawcze mające na celu ocenę stanu termicznego i aerodynamicznego elementów systemu. Jednocześnie badania musiały uwzględniać rosnące zróżnicowanie konstrukcji ogniw fotowoltaicznych, w tym ogniw selenowych, polimerowych oraz przede wszystkim krzemowych monokrystalicznych, polikrystalicznych i cienkowarstwowych (krzem bezpostaciowy).

Rozkład ogniw fotowoltaicznych dopasowano do kształtu dachu autobusu. Rozwiązanie techniczne jest uniwersalne i daje się łatwo przeprojektować.

Technologia ogniw PV do autobusów miejskich

W Politechnice Lubelskiej opracowano projekt zabudowy modułów fotowoltaicznych dedykowanych do autobusu – rysunek 1 [1-11]. Wstępne założenia obejmowały:

- rozmieszczenie diod bocznikujących co 10 V możliwie blisko ogniw,
- podział modułów fotowoltaicznych na sekcje po 40 V lub 48 V,
- pozostawienie elektroniki niezalaminowanej w celu łatwej jej obsługi,

- maksymalizację powierzchni zabudowy.

Podział sekcji na 40 V oraz 48 V wynikał z faktu testowania układów przetwarzania energii. W wyniku konwersji energii oraz strat wymagane jest zagwarantowanie odpowiedniej nadwyżki napięcia. Pierwszy układ doprowadza do mniejszego spadku napięcia co przyczynia się do mniejszych strat energetycznych. Zastosowano 8 sekcji o łącznej liczbie ogniw 514. Zakładając, że moc jednego ogniwa wynosi 4 W uzyskano 2056 Wp.



Rys. 1. Panele fotowoltaiczne zamontowane na dachu autobusu

Liczba ogniw połączonych szeregowo ze sobą, tworzących panel fotowoltaiczny, została dobrana tak, aby po przyłączeniu bezpośrednio do zacisków akumulatora pracowały w stanie obciążenia bliskim punktowi maksymalnej mocy. Przyłączenie to zostało zrealizowane za pomocą tranzystorów typu HEXFET IRF4905 o rezystancji w stanie włączenia 20 mΩ. Taka rezystancja w stanie włączenia zapewnia transfer energii z ogniw fotowoltaicznych do instalacji elektrycznej autobusu ze sprawnością na poziomie 95%.

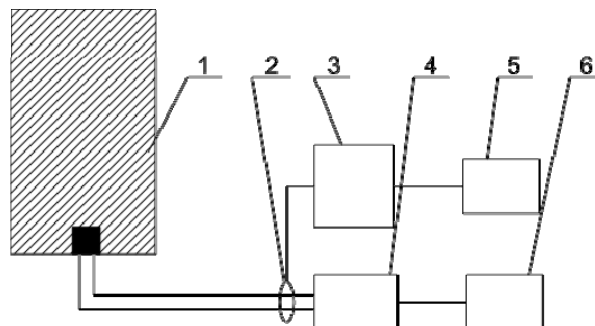
Na podstawie charakterystyk pracy opisanego układu, opracowany został projekt sterownika realizującego przekazywanie energii pochodzącej z paneli fotowoltaicznych, realizujący algorytm poszukiwania punktu pracy paneli o największej mocy (MPPT). W wyniku dalszych prac powstały pierwsze egzemplarze sterowników, które pomyślnie przeszły testy eksploatacyjne.

Na potrzeby regulacji, opracowano algorytm wykorzystujący jedynie informację o aktualnej wartości mocy generowanej przez ogniwa. Algorytm wymusza niewielką zmianę obciążenia ogniw kontrolując czy po zmianie moc generowana przez ogniwa wzrasta czy maleje. Zmiana obciążenia ogniw realizowana jest poprzez zmianę wypełnienia impulsów sterujących tranzystory przewodzące prąd z ogniw do instalacji elektrycznej autobusu.

Zastosowanie metody regulacji polegającej na zmianie wypełnienia sygnału sterującego pracą zaworów energoelektronicznych (PWM – Pulse Width Modulation) wymusza konieczność wprowadzenia filtracji w procesie przekazywania energii. Brak filtracji skutkowałby impulsowym obciążeniem paneli fotowoltaicznych oraz pojawieniem się zakłóceń o wysokiej częstotliwości w instalacji elektrycznej autobusu. Zjawiska te są niepożądane i mogą prowadzić do uszkodzeń. W celu ich eliminacji w układzie zastosowano dwa bloki filtrów LC zapewniających obciążenie paneli prądem stałym (filtr wejściowy) oraz przekazywanie energii w postaci prądu stałego do instalacji autobusu (filtr wyjściowy). Dodatkową

zaletą wprowadzenia w układzie filtrów jest stabilizacja pomiarów natężenia prądu i napięcia (w efekcie mocy), które są parametrami wejściowymi dla algorytmu regulacji.

Sterownik został zbudowany w oparciu o mikrokontroler firmy Texas Instruments. Jednym z kryteriów wyboru mikrokontrolera była wymagana wydajność obliczeniowa. Jest to 16-bitowa jednostka pracująca w architekturze RISC. Charakteryzuje się między innymi dużą elastycznością częstotliwości pracy oraz bardzo małym poborem energii. Dodatkowo jest to mikrokontroler spełniający warunki specyfikacji Automotive, która jest gwarantem poprawnej pracy w warunkach, jakie mogą pojawić się podczas pracy układów zamontowanych w autobusach. Kolejnymi kryteriami, jakie były brane pod uwagę było wyposażenie mikrokontrolera w konieczne do realizacji algorytmu układy peryferyjne. Mikrokontroler zapewnia możliwość wykonywania pomiarów sygnałów analogowych (parametry wejściowe dla algorytmu regulacji – pomiar natężenia prądu i napięcia). Ta funkcjonalność jest realizowana przez wbudowany 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy wyposażony dodatkowo w multiplexer umożliwiający pomiar do 16 sygnałów analogowych. Mikrokontroler posiada również sprzętową realizację modulacji wypełnienia impulsu oraz układy transmisji danych wykorzystywane w sterowniku do kontroli oraz konfiguracji parametrów pracy. Jego istotną zaletą była również stosunkowo niska cena. Autobus został wyposażony w system rejestracji danych pokazany na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat systemu pomiarowego: 1 – panel PV, 2 – przetworniki pomiarowe, 3 – karta pomiarowa, 4 – układ regulacji napięcia, 5 – układ rejestracji danych, 6 – obciążenie elektryczne



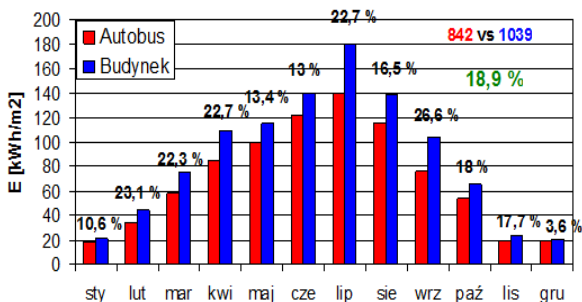
Rys. 3. Panele fotowoltaiczne z czujnikiem nasłonecznienia na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej

W celu określenia strat energetycznych jakie wynikają z zacinienia autobusu podczas ruchu miejskiego porównano wyniki pomiarów z uzyskami w warunkach stacjonarnych. Na dachu budynku Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej zamontowano pyranometr SR12 firmy Hukseflux

– wysokiej dokładności czujnik promieniowania słonecznego spełniający, a nawet przekraczający normy ISO 9060 dla pierwszej klasy pyranometrów w badaniach energii słonecznej („solar energy test applications”). Pyranometr ten jest preferowanym narzędziem do monitorowania wydajności systemów fotowoltaicznych. Energia elektryczna uzyskana z paneli została rozproszona w postaci ciepła na radiatorach. Został także opracowany układ obciążający panele fotowoltaiczne. Stanowisko umożliwia wykonywanie testów pod kątem efektywności energetycznej, którym to testom poddawane były nowe, wysokosprawne konstrukcje paneli fotowoltaicznych – rysunek 3.

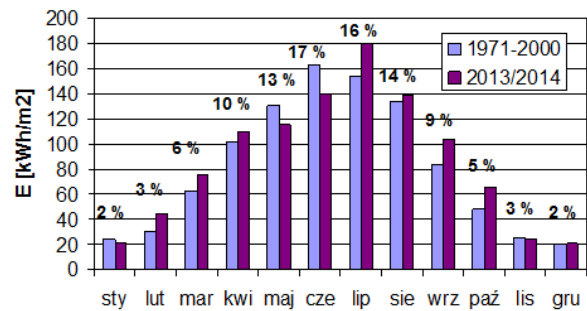
Wyniki badań

Z uwagi na duże wahania zapotrzebowania jak i dostępności energii słonecznej, bilans został wykonany w ujęciu zarówno dobowym jak i rocznym. Rysunek 4 przedstawia zbiorczą wartość natężenia promieniowania słonecznego na dachu autobusu będącego w normalnej eksploatacji oraz na dachu budynku w kolejnych miesiącach roku odniesiona do 1 m². Pokazano również procentowe różnice pomiędzy wartością nasłonecznienia na dachu budynku i na dachu poruszającego się autobusu. Z danych zaprezentowanych na rysunku 4 wynika, że wraz ze zwiększającym się nasłonecznieniem różnice rosną. Wzrost wartości nasłonecznienia jest ściśle związany z występowaniem większej wartości promieniowania bezpośredniego, które na dachu poruszającego się pojazdu ulega zmniejszeniu. Efekt ten jest związany z zaciemnieniami powierzchni paneli fotowoltaicznych przez budynki, drzewa i inne elementy zabudowanej infrastruktury miejskiej. Największe różnice w ilości energii słonecznej docierającej do nieruchomego i ruchomego panelu zarejestrowano we wrześniu 2014. W miesiącu tym było dużo bezchmurnych dni. Jednocześnie dzień był krótszy, słońce było nisko i z tego powodu panel na autobusie był intensywnie zaciemniany. System fotowoltaiczny zamontowany na dachu autobusu odbiera średnio o 18,9 % mniej energii słonecznej niż ten sam system zamontowany na dachu budynku.



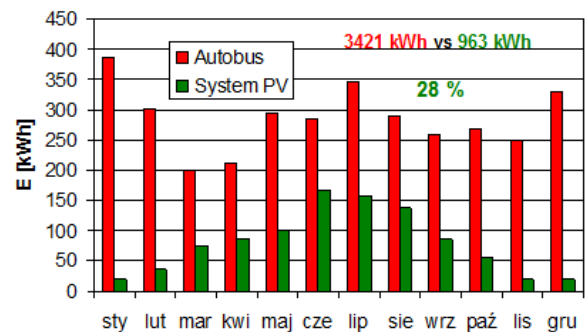
Rys. 4. Wartość natężenia promieniowania słonecznego na dachu autobusu i na dachu budynku w kolejnych miesiącach odniesiona do 1 m²

Wyniki pomiarów miesięcznych sum całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchni poziomą uzyskane na podstawie pomiarów w Politechnice Lubelskiej zostały porównane z wartościami ze średniej z pomiarów z ostatnich 30 lat ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej we wschodniej Polsce w okolicach Lublina (Latitude 51° 13' N, Longitude 22° 24' E). Wyniki pomiarów nieznacznie odbiegają od średniej (rysunek 5). Biorąc pod uwagę dane pomiarowe przedstawione powyżej, tj. od października do maja, natężenie promieniowania słonecznego stanowi 44 % natężenia całkowitego w ciągu roku.



Rys. 5. Wartości miesięcznych sum całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na 1 m² powierzchni poziomej

Na rysunku 6 przedstawiono zbiorcze wartości energii elektrycznej zużywanej przez autobus Mercedes Conecto 12 LF i energii elektrycznej generowanej przez system fotowoltaiczny na dachu autobusu w kolejnych miesiącach. Największe zużycie energii elektrycznej było w miesiącach zimowych, w których włączano elektryczne wentylatory do ogrzewania wnętrza pojazdu. Maksymalne zużycie energii elektrycznej na poziomie 386 kWh odnotowano w styczniu 2014 r. ze względu na niskie temperatury na zewnątrz oraz uszkodzone ogniwa. W maju 2014 r. ze względu na panujące na zewnątrz wysokie temperatury włączano układ klimatyzacji i wentylacji - zużycie energii wyniosło 340 kWh.



Rys. 6. Wartość energii elektrycznej zużywanej przez autobus Mercedes Conecto 12 LF i wartość energii elektrycznej generowanej przez system fotowoltaiczny na dachu autobusu w okresie jednego roku

W ciągu roku autobus zużył 3421 kWh energii elektrycznej. Część z tej energii została może zastąpiona energią elektryczną z systemu PV, który składa się z 464 ogniwi i ma powierzchnię 12,84 m². System PV wygenerował w tym okresie 963 kWh energii elektrycznej, co stanowi około 28 % całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną badanego autobusu miejskiego.

Podsumowanie

Wykonane badania potwierdzają możliwość zastosowania paneli fotowoltaicznych w autobusie miejskim. Użytkowanie paneli na pokładzie autobusu powoduje zmniejszenie o kilkanaście procent energii elektrycznej wyprodukowanej w porównaniu z panelem zamontowanym stacjonarnie w pozycji poziomej. Pomimo zmniejszenia produktywności wykorzystanie tej technologii w pełnej skali, czyli przy zabudowanej całej powierzchni dachu, przyczyni się do zmniejszenia kosztów eksploatacji pojazdów komunikacji miejskiej. Pełną ocenę zmniejszenia produktywności energii elektrycznej będzie można wykonać po rocznym cyklu badawczym kilku autobusów. Ze względu na charakterystyki mocy stosowanych paneli system

powinien zostać doposażony w jednostkę sterującą w celu optymalizacji produktywności, co jest szczególnie istotne przy zmniejszonym natężeniu promieniowania słonecznego.

Wdrożenie efektów realizacji projektu przyczyni się do uzyskania efektu środowiskowego w postaci ograniczenia emisji CO₂ w ilości 1 tony na 1 kWp zainstalowanej mocy paneli PV oraz ograniczenia kosztów eksploatacji pojazdów samochodowych.

Obniżenie kosztów eksploatacji pojedynczego autobusu związane jest z zastosowaniem dodatkowego niezależnego źródła zasilania pojazdu energią elektryczną z systemu fotowoltaicznego i pozwala:

- zredukować zużycie paliwa o 3% przy systemie 2 kWp – 810 litrów /rok/2kWp,
- przedłużyć żywotności akumulatorów – 12 miesięcy / 2 kWp,
- ograniczyć ilość incydentów wyładowania akumulatorów na przystankach końcowych (awaryjne zjazdy do zajezdni) – 5/rok,
- ograniczyć hałas i emisję składników toksycznych na przystankach końcowych – możliwość wyłączenia silnik spalinowego bez obawy wystąpienia wyładowania akumulatora włączonymi odbiornikami elektrycznymi – 70 dBA.

Zmniejszenie zużycia paliwa zwiększa bezpieczeństwo energetyczne kraju. Zastosowanie systemów fotowoltaicznych na pojazdach rozwija społeczeństwo poprzez promowanie odnawialnych źródeł energii.

Autor: dr inż. Mariusz Duk, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Instytut Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

LITERATURA

- [1] Gęca M., Wendeker M., Grabowski Ł., A City Bus Electrification Supported by the Photovoltaic Power Modules, "SAE Technical Paper 2014-01-2898
- [2] Grabowski Ł., Produktywność struktur fotowoltaicznych zamocowanych na pokładzie autobusu miejskiego, „Logistyka” 3/2014, 2114-2120
- [3] Grabowski Ł., Gęca M., Barański G., Analiza sposobu eksploatacji autobusu miejskiego, „Logistyka” 3/2015, 1610-1618
- [4] Grabowski Ł., Gęca M., Biały M., The city bus model in AVL Cruise software, Combustion Engines, 2015, 162(3), 475-479, ISSN 2300-9896
- [5] Grabowski Ł., Pietrykowski K., Gęca M., Barański G., The Electric Power Generation Efficiency in City Bus, "SAE Technical Paper 2014-01-2899
- [6] Grabowski Ł., Wendeker M., Barański G., Gęca M., Experimental investigation of the electric power generation efficiency in city bus, Combustion Engines, 2015, 162(3), 411-416, ISSN 2300-9896
- [7] Pietrykowski K., Eksploatacyjna analiza sprawności alternatorów autobusu miejskiego, „Logistyka” 3/2014, 5106-5110
- [8] Szlachetka M., Barański G., Grabowski Ł., Majczak A., Badania sprawności autobusowego silnika spalinowego w warunkach ruchu miejskiego, „Logistyka” 3/2014, 6123-6131
- [9] Wendeker M., Grabowski Ł., Gęca M., Technologia autobusowych struktur fotowoltaicznych zmniejszających zużycie paliwa i emisję składników toksycznych, „Logistyka” 3/2014, 6666-6673
- [10] Wendeker M., Barański G., Gęca M., Analiza ekonomiczna zastosowania technologii autobusowych struktur fotowoltaicznych w warunkach miejskich, „Logistyka” 3/2014, 6652-6659
- [11] Wendeker M., Gęca M., Grabowski Ł., Barański G., Technologia struktur fotowoltaicznych zmniejszających zużycie paliwa i emisję toksycznych składników spalin przez agregaty transportowych naczep chłodniczych, „Logistyka” 3/2014, 6660-6665