

AUTOBUS ELEKTRYCZNY JAKO POJAZD KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

W związku z planowaną rozbudową ilościową parku autobusów elektrycznych w polskich miastach w z artykule omówione zostały cechy charakterystyczne zasobników energii na pojeździe typu autobus miejski, których istnienie ujawnia się podczas długotrwałej eksploatacji. Nałożenie na te cechy wpływu temperatury na pojemność baterii skłania do refleksji o konieczności przygotowania się na perturbacje z grupowym wypadaniem pojazdów z eksploatacji co może znacząco zaburzyć funkcjonowanie transportu publicznego w mieście.

WSTĘP

W ciągu najbliższych lat dzięki wsparciu środków UE w Polsce ma zostać wymieniony tabor autobusowy na niskoemisyjny i elektryczny. Przewiduje się, że np. sukcesywnie w Warszawie będzie kursować 100 autobusów elektrycznych a Zajezdnia Autobusowa „Redutowa” zostanie przystosowana do ich obsługi [1]. Na Komisji Taboru Autobusowego Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej zorganizowanej w maju 2015 r w Warszawie przy współudziale Miejskich Zakładów Autobusowych Sp z o.o. prezentowane były referaty dotyczące eksploatacji taboru spalinowego na gaz, hybrydowego oraz elektrycznego. Jednym z najciekawszych referatów dotyczącego jeszcze nie ukończonych wówczas badań – jazdy obserwowanej – kilku typów autobusów elektrycznych zaprezentował przedstawiciel MZA Warszawa [1].

1. NIECO Z HISTORII

Pierwszy kryzys paliwowy (energetyczny) na początku lat 70-tych XX wieku nastąpił tuż po również pierwszej fazie rozwoju półprzewodnikowych elementów mocy. W Zakładzie Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki w Warszawie-Międzylesiu w latach 1973-75 powstały czopkowe układy napędowe prądu stałego [2, 3, 4] przystosowane do napędu pojazdów autonomicznych drogowych, a w 1976 r. układ napędowy do kopalnianej lokomotywy dołowej [5].

Udane i zastosowane w produkcji aplikacje [3, 5] oraz uzyskane przy tych pracach doświadczenia pozwoliły na nawiązanie w 1975 r współpracy z Przemysłowym Instytutem Motoryzacji w Warszawie. Po wykonaniu przeliczeń trakcyjnych i obliczeń układu regulacji impulsowej napędu z silnikiem prądu stałego przystąpiono do budowy i badań laboratoryjnych modelu użytkowego przewidzianego do zabudowy w pojeździe. W drugiej połowie lat 70-tych było narzucone wymaganie tworzenia nowych konstrukcji z krajowych materiałów i wyrobów – unikanie tzw. wsadu dewizowego w krajowych wyrobach. Z tych powodów wybór padł na produkowany przez fabrykę Jecz licencyjny autobus typu Berliet. Do napędu wykorzystano silniki tramwajowe stosowane w polskich tramwajach 13N. Tyrystorowy układ czopkowy, na elementach półprzewodnikowych z Laminy, zawierał w sobie dopasowany układ komutacyjny umożliwiający wyłączenie głównego tyrystora w czopce. Moc układu napędowego składająca się z dwóch jednostek wynosiła 94 kW. PIMOT był twórcą przyczepki przeznaczonej na baterię akumulatorów kwasowych rozruchowych, zasilających jedynie część trakcyjną (napędową) pojazdu. Jednoosiowa przyczepka zawierała kontener z zestawem połączonych aku-

mulatorów o sumarycznej pojemności 350 Ah i napięciu 360 V Gęstość energetyczna 36Wh/kg oraz żywotność ok. 1000 cykli ładowania stanowiły barierę, z którą należało się liczyć w eksploatacji. Zastosowanie przyczepki uchroniło od kosztów przebudowy autobusu, a jak wiadomo był to pojazd o miękkim zawieszeniu Dzięki temu zachowano miejsca dla pasażerów. Kontener w przyczepce umożliwiał szybką wymianę baterii oraz uchronił pasażerów przed oparami elektrolitu. Przyjęte rozwiązanie po testach na terenie PIMOT-u oraz IEL uzyskało dopuszczenie do eksploatacji obserwowanej (testowej) na terenie Warszawy Pragi na trasie Międzylesie – Rondo Wiatraczna. Jelcz ten osiągał prędkość 60 km/h, a jego zasięg w ruchu miejskim wynosił do 70 km. Przez prawie dwa lata trwała eksploatacja obserwowana. W zestawie zastosowanych baterii kwasowych obsługowych koniecznym okazywało się sprawdzanie i uzupełnianie elektrolitu, dodatkowo wystąpiła konieczność poprawiania połączeń pomiędzy akumulatorami. Dużym utrudnieniem była nierównomierność ubywania elektrolitu w akumulatorach i wymiana całych baterii rozruchowych. Opary z akumulatorów przyczyniały się do korozji kontenera i przyczepki. Przed każdym wyjazdem w trasę obowiązkowo sprawdzany był stan naładowania baterii. Autobus ten w ramach testów często przewoził pracowników Instytutu, najczęściej udających się po pracy do domów.

Nowość ta na przełomie lat 70/80 nie wzbudziła większego zainteresowania. Ostatecznie pojazd ten trafił w 1987 r do Muzeum Techniki w Warszawie [6].

2. HISTORYCZNE DOŚWIADCZENIA A WSPÓLCZESNOŚĆ

Obecnie naciski ze strony ekologii powodują, że jest przełożenie na zastosowanie w praktyce pojazdów przyjaznych środowisku. Do takich zaliczane są pojazdy elektryczne z zasobnikiem energii na pokładzie. Dotyczy to również autobusów. Od zakończenia prac i testów nad elektrycznym Berlietem minęło już 35 lat. W tym czasie rozwój elektroniki, energoelektroniki oraz adaptacja maszyn do zasilania z układów energoelektronicznych i chłodzenia ich cieczą przyczyniła się do minimalizacji gabarytów i ciężaru. Miejsce silnika prądu stałego zajął silnik asynchroniczny. Próbowane były silniki na magnesach trwałych, które z układami energoelektronicznymi dają większą o ok. 2 % sprawność względem napędu falownika z asynchronem. Obecnie koszty materiałów magnetycznie twardych na magnesy do silników tak wzrosły, że przewyższają zysk na większej sprawności układu. Silniki specjalnie projektowane do napędu pojazdu mogą być jednostkami centralnymi, lub rozproszonymi wbudowanymi w osie lub nawet koła pojazdu. Bardzo istotną cechą układów napędowych

trójfazowych z silnikami indukcyjnymi czy też synchronicznymi jest to, że nie wymagają dodatkowej aparatury, aby w procesie hamowania pojazdu zwracać część jego energii kinetycznej do baterii.

W przeciągu tych kilkudziesięciu lat powstały nowe rodzaje baterii, o większych gęstościach energii nawet i czterokrotnie od wykorzystanych ogniów w modelowym autobusie Berliet. Deklarowana przez producentów liczba cykli ładowania wzrosła trzykrotnie, co wydłuża czas życia takiej baterii. Niestety nowoczesne ogniwa, a jest ich wiele odmian - mają pojemność nadal zależną od temperatury. Najkorzystniejsze z punktu widzenia odzysku energii zgromadzonej w ogniwach baterii są temperatury w zakresie $10 \div 20^{\circ}\text{C}$. Zarówno powyżej jak i poniżej tego zakresu temperatury pojemność baterii spada, przyczyniając się do zmniejszenia możliwego do przejechania dystansu. Z punktu widzenia eksploatacji stanowi to zagrożenie dla realizacji planowanego rozkładu jazdy, jeżeli z powodu niskich lub zbyt wysokich temperatur znacznemu ograniczeniu ulegnie zasięg. W zaprezentowanych wynikach [1] dało się zaobserwować wypadanie z kursu testowanych autobusów przy niskich temperaturach jakie w okresie zimowym występują w Polsce. Czy zapewnienie ogrzewanej/klimatyzowanej hali postojowej i nocnego ładowania akumulatorów zapewni niezależnienie akumulatorów od temperatury powietrza na zewnątrz. Straty wydzielane podczas przepływu prądu przez baterię mogą być nie wystarczające do utrzymania jej temperatury przy ujemnych temperaturach powietrza. W przypadku upałów to czy schładzać akumulatory, a jak schładzać to czym?

3. DŁUGOWIECZNOŚĆ BATERII

W 2005 roku powstał przy współudziale Zakładu Trakcji Elektrycznej IEl pierwszy w Polsce tramwaj hybrydowy [7]. Konstrukcja ta według założeń projektowych mogła przejechać bez zasilania z sieci trakcyjnej 6,5 km zatrzymując się po drodze na przystankach w celu wymiany pasażerów. Po przejechaniu tego odcinka bez sieci górnej pojazd wracał na tory zelektryfikowane, gdzie ubytek ładunku w akumulatorze był uzupełniany z sieci i energią kinetyczną podczas jego hamowania. Współpracującą przy tym projekcie firma dostarczająca kontenery żelowych bezobsługowych akumulatorów kwasowych (tańsza wersja) zaproponowała pojemność baterii przy której pojazd po trzech latach eksploatacji mógł realizować bez przeszkód zakładaną pracę przewozową rozładowując baterię w dopuszczalnym zakresie pojemności. Otóż czas życia baterii liczony w cyklach ładowania zakłada, że stopień rozładowania wynosi 20% pełnego naładowania nowych ogniów. Istotna jest również temperatura akumulatora w czasie rozładowania i ładowania. Zwiększenie stopnia rozładowania jak i wzrost temperatury skracają liczbę cykli – czas życia baterii. Nawiasem mówiąc projekt związany z badaniem tego tramwaju został porzucony po ok. 10 miesiącach eksploatacji pojazdu przewożącego normalnie rozkładowo pasażerów. Nastąpiło to z chwilą, gdy zapadła decyzja o innym rozwiązaniu transportu miejskiego na Trakcie Królewskim. Ogniwa z kontenerów stały się częściami zapasowymi do zasilania pokładowego tramwajów. Nie dane było zatem eksperymentalnie potwierdzić doświadczeń producenta baterii. Z uzyskanych doświadczeń należy stwierdzić, że żelowanie rozruchowych akumulatorów kwasowych zmniejszyło wydzielanie oparów podczas intensywnego użytkowania baterii. Dzięki temu konstrukcja kontenerów zasobnika ulegała znacznie mniejszej destrukcji w czasie eksploatacji niż w przypadku elektrycznego Jelcza.

Jak wykazuje praktyka obserwowana na rynku środków konsumpcji w postaci baterii do laptopów, tabletów i plamptopów, gdzie w eksploatacji występuje zjawisko rozładowania z różną prędkością zależnie od obciążenia systemu podczas użytkowania i doładowywania po pracy lub nawet już w trakcie pracy, to generalnie wraz z czasem użytkowania sprzętu okres pracy na baterii ulega zmniejszeniu i

to wyraźnemu - odczuwalnemu przez użytkowników [8]. Powyższe zjawisko dotyczyć będzie również akumulatorów/zasobników w autobusach elektrycznych. Oczywiście współczesne ogniwa wyposażane są w układy pomiarowe stanu rozładowania baterii oraz wskaźniki rozładowania co wzorem wskaźnika paliwa w baku pojazdu spalinowego ma ułatwić ocenę zasięgu jazdy. Jednakże prognozowanie musi zakładać opory ruchu i zmieniającą się wraz z ilością pasażerów masę pojazdu. Mniejsze gęstości energetyczne zasobnika energii elektrycznej wymagają dokładniejszego prognozowania zasięgu, aby nie utknąć na drodze z braku energii. Dodatkowo autobus niezależnie od stopnia naładowania baterii i jej temperatury powinien realizować rozkład jazdy pomiędzy przystankami. Musi zatem osiągać wymagane przyspieszenie i prędkość jazdy, co przy rozładowanej, przegrzanej lub wyładowanej baterii może okazać się nie do zrealizowania.

Jak organizacyjnie przygotować się na sytuacje, które znane są z małych ogniów do przenośnego sprzętu komputerowego, a w zastosowaniu do pojazdów trakcyjnych dopiero w praktyce eksploatacyjnej się ujawniają?. Warunki pogodowe w czasie lat eksploatacji mogą mieć wpływ na grupowe wypadanie pojazdów z kursów, a to stanowi duże zagrożenie funkcjonowania transportu zbiorowego. Zatrzymanie pojazdu na drodze z powodu braku energii w baterii powoduje blokowanie ruchu na jezdni i wymaga holowania pojazdu. Doświadczenia z posiadanych i eksploatowanych pojazdów spalinowych wykazują jakie należy mieć gorące rezerwy, aby komunikacja funkcjonowała bez większych perturbacji. Producenci taboru proponują rozwiązanie z doładowywaniem pojazdów na końcowych przystankach, zwracając uwagę, że potrzebne wtedy zasobniki są mniejszej pojemności a zatem lżejsze. Takie rozwiązanie zwiększa koszt infrastruktury oraz eksploatacji. W rachunkach za energię pojawia się zawsze składnik mocy zainstalowanej i gotowości do dostarczania mocy oraz piętnastominutowa moc szczytowa dla każdego punktu doładowania. Między innymi z tego ekonomicznego względu rozpatrywane są koncepcje wykorzystywania do ładowania akumulatorów autobusów elektrycznych sieci tramwajowych.

3.1. Jaka cena 1 wozokilometra?

Obecnie szacuje się [1], że dla autobusu 12 m w warunkach miejskich z silnikiem spalinowym na olej napędowy zużywa od 40 do 49 dcm³ na przejechane 100 km, natomiast porównywalny autobus elektryczny w takich samych warunkach zużyje od 130 do 160 kWh na 100 km. Niewątpliwą zaletą pojazdu elektrycznego jest brak emisji spalin – CO₂ - w miejscu eksploatacji, która w przypadku 12 m autobusu spalinowego szacowana jest na poziomie do 1061 do 1300g/km. Koszt przejechania 1 wozokilometra wyrażony w pieniądzu jest wypadkową aktualnych cen (lub wynegocjowanych) na poszczególne nośniki energii. W przypadku pojazdów elektrycznych w cyklu życia pojazdu podczas eksploatacji wystąpi niespotykane dotychczas zjawisko trzykrotnej wymiany zasobnika energii w przeciągu 10 lat potrzebnych na przejechanie 800 tys. km. Czy koszt tych baterii powinien wchodzić w koszt wozokilometra?

Na zakończenie należy jeszcze podać prawdopodobne zjawisko, że deklarowana przez producentów baterii żywotność w warunkach eksploatacji okaże się krótsza niż katalogowe 3000 – 4000 razy. Sprzyjającą okolicznością szybszej degradacji ogniów są trudne przewidywalne warunki drogowe powodujące dodatkowe ubytki energii np. konieczność gwałtownego hamowania z ograniczonym odzyskiem energii lub wręcz z jego brakiem i konieczność realizacji rozkładu jazdy na „resztkach paliwa” rozumianych jako rozładowywaniem akumulatorów poniżej zakładanego poziomu wynikające szacowanej trwałości ogniów.

Koszt zasobnika energii w cenie pojazdu jest znaczącą pozycją. Jeżeli w warunkach eksploatacyjnych okaże się koniecznym częstsza wymiana zasobnika a jego cena nie będzie w czasie malała to wypadkowa końcowa cena przejechania 1 wozokilometra uwzględniająca nie tylko koszt energii doładowań zewnętrznych (z sieci elektroenergetycznych lub trakcyjnych) ale i wymienianych zasobników w całym cyklu życia autobusu może okazać się porównywalna z kosztem 1 wozokilometra autobusu na olej napędowy, a być może będzie i większa.

4. KOMFORT JAZDY

Napęd elektryczny w pojeździe to znacznie zmniejszony emitowany hałas związany z ruchem. Drgania pojazdu w dużej mierze są pochodną jakości powierzchni jezdni po której się on przemieszcza. Dopasowanie mocy silnika napędowego do mocy baterii i ustalone charakterystyki narastania prądu/momentu rozruchowego zapewniają łagodne przyspieszenia rozruchu. Procesy hamowania zależą od sytuacji na drodze. Rejsowe hamowanie będzie równie łagodne co rozruch. Pasażer pojazdu odczuwa zatem cichszą i płynną jazdę. Problematicznym zagadnieniem jest klimatyzacja pojazdu. Wymaga ona nie zależnie czy schładzamy czy podgrzewamy kabinę kierowcy i pasażerów nakładu energii, który powoduje znaczące zmniejszenie się zasięgu. W przypadkach ewentualnego dogrzewania pojazdu – temperatur poniżej zera, przypadki skandynawskie - proponuje się ogrzewanie z butli gazowych. Natomiast podczas wysokich temperatur powietrza zawsze można uchylić otwory okienne.

5. TRASY I TABOR

W przypadku pojazdów spalinowych dobór długości autobusu związany będzie z liczbą pasażerów na danej linii/trasie. Przy pojazdach hybrydowych należy dodatkowo brać pod uwagę na jaki teoretyczny cykl przejazdu zaprojektowany został układ wieloźródłowy danego pojazdu, aby w zbliżonych do tego cyklu przejazdach uzyskiwać najmniejsze zużycie paliwa. W przypadku autobusu elektrycznego znacząco wzrasta zasięg wynikający z nagromadzonej w baterii ładunku elektrycznego. Strategia związana jest bezpośrednio z posiadanym taborem i infrastrukturą zasilania ogniów na pojeździe. Na etapie planowania zakupu taboru musi zapaść decyzja do których tras/linii będzie on przypisany. Czy obsłuży wszystkie linie w danym mieście? Ograniczony zapas energii na pojeździe wymaga dokładniejszego oszacowania zdolności realizacji rozkładowego planu jazdy i samodzielnego powrotu pojazdu do zajezdni. Zasięg pojazdów może wymusić wymianę taboru lub baterii na trasie w ciągu dnia, aby uniknąć przypadków utknięcia pojazdu na jezdni najgorzej wraz z pasażerami z powodu braku energii.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie w taborze większej liczby autobusów elektrycznych wymagać będzie od eksploatacji wypracowania metod szacowania faktycznego stanu naładowania energią zasobnika każdego z pojazdów. Pomoc w tym mogą informatyczne systemy danych zbieranych na pojeździe i analizowanych na zajezdni. Sumiennosc obsługi technicznej w tym także kierowców i uzyskane z czasem doświadczenie może uchronić pojazdy elektryczne przed kolejną po-

rażką w konfrontacji z pojazdami wyposażonymi w zbiorniki o znacznie większej gęstości energetycznej paliwa. Trudno bez większych praktycznych doświadczeń stwierdzić, że zastosowanie napędu elektrycznego w autobusie jest właśnie tą niszą w której rozwiązanie będzie konkurencyjne z innymi napędami [9].

BIBLIOGRAFIA

1. www.igkm.pl/site/wiadomosci,3954,zzyciaizby.html
2. Czapla J., i in., *Opracowanie, budowa, montaż i badanie modelowego układu tyrystorowego impulsowego rozruchu napędu elektrycznego do samochodu Fiat 125p*, Dok. tech. IEI nr arch.:247/73 listopad 1973
3. Kowalski J., Szczepiński J., Ociesa G., *Projekt wstępny układu rozruchu tyrystorowego regulacji prędkości dla wózka golfowego MELEX* Dok. tech. IEI nr arch.:242/73 listopad 1973
4. Giziński Z., Jaczewski R., Majewska M., *Badania ruchowe i eksploatacyjne układu napędowego i regulacyjnego samochodu Fiat 125p z napędem elektrycznym* Dok. tech. IEI nr arch.:287/74 listopad 1974
5. Solnicki H., i in., *Modernizacja elektrycznego układu napędowego lokomotywy akumulatorowej typu LDag-05* Dok. tech. IEI nr arch.:19/76 marzec 1976
6. Wojciechowicz Ł., *Jelcz z przyczepką "Polski Traker Bus" 2012*, nr 4
7. Gąsiewski M., *Tramwaj z akumulatorowym zasobnikiem energii TTS 2007* nr 1-2
8. Jarosławski K., *System wspomaganie elektroenergetyki kondensatorowymi i akumulatorowymi magazynami elektryczności WEKIAMEL* INSPE.2015 nr 187
9. Nasiłowski J., *Elektryczny transport miejski* Wiadomości Elektrotechniczne 1979 nr 4

Electric bus as public transport vehicle

In connection with the planned expansion of quantitative park electric buses in the Polish cities of the article discusses the characteristics of energy storage on the vehicle type city bus, whose existence is revealed during long-term use. Imposing these characteristics influence of temperature on battery capacity tends to reflect the need to prepare for the perturbations of the group of vehicles falling from the operation of which can seriously disrupt the functioning of public transport in the city.

Autor:

mgr inż. **Józef Dąbrowski** – Instytut Elektrotechniki Warszawa – Międzylesie Zakład Trakcji Elektrycznej 04-703 Warszawa ul. Pożaryskiego 28 e-mail j.dabrowski@iel.waw.pl

dr inż. Józefowi Zamojskiemu 1931 – 2015 wieloletniemu pracownikowi Zakładu Trakcji Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki, kierownikowi zespołu autonomicznych pojazdów elektrycznych w tym i wspomnianego elektrycznego Jelcza materiał ten poświęcam