

Projektowanie i eksploatacja systemów przeznaczonych do autobusów z napędem alternatywnym

Michał Sierszyński, Łukasz Chełchowski, Michał Pikuła, Dariusz Michalak, Franciszek Sidorski

1. Wstęp

1.1. Trendy w komunikacji miejskiej

W ostatnich latach obserwuje się zauważalny wzrost zainteresowania ekologiczną komunikacją miejską. Szczególną uwagę przywiązuje się do ograniczenia lub całkowitego wyeliminowania emisji środowiskowej gazów spalinyowych w miejscu eksploatacji pojazdu oraz obniżenie poziomu wytwarzanego hałasu. W trend ten wyraźnie wpisują się pojazdy napędzane silnikiem elektrycznym, do których zaliczyć można pojazdy bateryjne, wodorowe, trolejbusy oraz hybrydy *plug-in*. Ich sprzedaż na rynku europejskim przedstawiono na rysunku 1.

1.2. Przyczyny rozwoju komunikacji bazującej na pojazdach elektrycznych

Trend wzrostowy szczególnie wzmógł się w 2016 roku ze względu na coraz dojrzalszą technologię pojazdu elektrycznego. Dalszy wzrost sprzedaży autobusów elektrycznych wzmocniony jest bardzo dużą efektywnością energetyczną i środowiskową pojazdów oraz wprowadzanymi regulacjami prawnymi [2, 5]. W Polsce zaliczyć można do nich ustawę o elektromobilności i paliwach alternatywnych. Nakłada ona udziały procentowe pojazdów z napędem alternatywnym we flocie autobusów na terenie jednostki terytorialnej, której liczba mieszkańców przekracza pięćdziesiąt tysięcy [3]. Wymagane udziały w poszczególnych latach przedstawiono na rysunku 2.

Warto podkreślić, że niektóre miasta już teraz spełniają wymagania nałożone przez ustawę. Zaliczyć do nich można Jaworzno, w którym obecnie eksploatowane są 24 autobusy elektryczne, co stanowi 40% floty [4].

Streszczenie: Doświadczenia zdobyte podczas eksploatacji wzrastającej liczby autobusów z napędem alternatywnym na rynku europejskim umożliwiają doskonalenie produktu, budując równocześnie jego przewagę technologiczną nad tradycyjnymi rozwiązaniami, jakimi są pojazdy komunikacji miejskiej wyposażone w silnik Diesla. Zasadniczym celem autorów niniejszej publikacji, aktywnie uczestniczących w procesie projektowania autobusu nagrodzonego tytułem „Bus of the Year 2017”, jest zebranie i przedstawienie zagadnień z zakresu projektowania i eksploatacji systemów przeznaczonych do autobusów miejskich z napędem elektrycznym. Ze szczególną uwagą zostanie omówiona architektura nadzorczo-sterująca odpowiedzialna za koordynację prac poszczególnych układów pojazdu oraz napęd elektryczny wspierany przez systemy zapewniające

bezpieczeństwo użytkownika. W artykule przedstawiony zostanie dobór kluczowych elementów systemów napędowego oraz sterującego, umożliwiający realizację specyficznych dla rynku autobusowego funkcji. Analiza pozostałych układów, takich jak źródła i magazyny energii, przyczyni się do zobrazowania konieczności kompleksowego podejścia związanego z projektowaniem autobusów elektrycznych. Odpowiedni dobór podzespołów oraz algorytmy sterowania, które mają znaczący wpływ na zużycie energii przez pojazd, poddawane są procesom optymalizującym, co bezpośrednio przekłada się na redukcję kosztów eksploatacji oraz decyzje klientów dotyczące zakupu pojazdów.

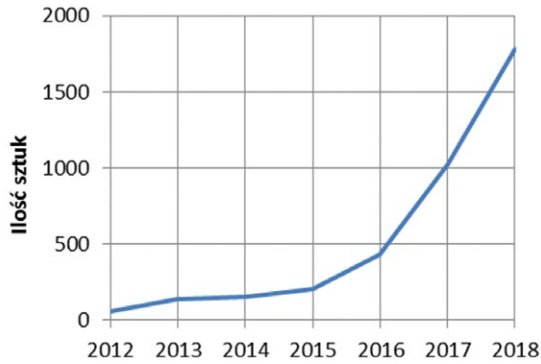
Słowa kluczowe: elektromobilność, autobusy elektryczne, napęd elektryczny, ogniwo paliwowe, architektura nadzorczo-sterująca

DESIGN AND OPERATION OF SYSTEMS FOR BUSES WITH AN ALTERNATIVE DRIVETRAIN

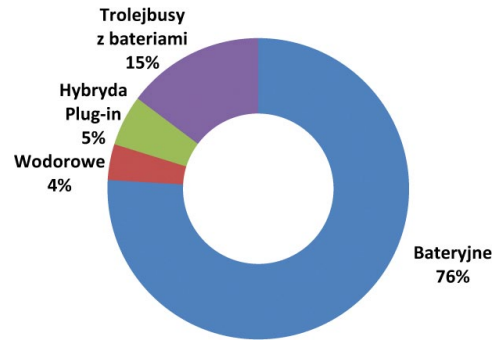
Abstract: *The experience gained during operation of emerging number of buses equipped with alternative propulsion on the European market leads to the product development and technical advantage over the traditional public transport vehicles fitted out with internal combustion engines. The main goal of the authors, engaged in designing vehicle awarded with title „Bus of the Year 2017”, is to gather and present issues regarding designing and operating systems constructed for urban buses equipped with electric propulsion purposes. Special attention will be paid to the supervisory and control architecture responsible for coordinating the work of individual vehicle systems and the electric drive supported by systems ensuring safety of*

use. The article presents the selection of key elements of drive and control systems, enabling the implementation of bus-specific functions. Other systems, such as energy sources and energy storage, subject to analysis, will help to illustrate the need for a comprehensive approach related to the design of electric buses. Appropriate selection of components and control algorithms that have a significant impact on the energy consumption of the vehicle are subjected to optimization processes, which directly translates into a reduction in operating costs and customer decisions regarding the purchase of vehicles.

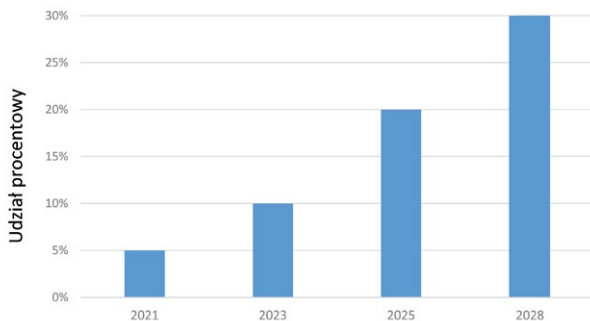
Keywords: electromobility, electric buses, electric drive, fuel cell, supervision and control architecture



Rys. 1. Liczba autobusów napędzanych silnikiem elektrycznym dostarczonych do klientów w Europie w latach 2012 – listopad 2018 [1]



Rys. 3. Udział procentowy rodzajów pojazdów elektrycznych z napędem alternatywnym - zamówienia oraz dostarczenia do Unii Europejskiej oraz Szwajcarii i Norwegii do stycznia 2019 [1]



Rys. 2. Udział procentowy pojazdów z napędem alternatywnym we flotach autobusowych [3]

1.3. Autobusy elektryczne w Europie

Wiele miast europejskich już teraz planuje wprowadzenie całkowicie bezemisyjnego transportu publicznego opartego wyłącznie na pojazdach napędzanych silnikiem elektrycznym. Zaliczyć do nich można między innymi Milan, Amsterdam, Brukselę, Oslo, Kopenhagę, jak również Londyn [1]. Rozwój europejskiego rynku autobusów elektrycznych jest bardzo dynamiczny i ma fundamentalny wpływ na rozwój technologii pojazdów zeroemisyjnych. Podział ze względu na typ pojazdu elektrycznego w Europie przedstawiono na rysunku 3.

Z rysunku 3 wynika, że przeważającą część stanowią autobusy bateryjne, które wraz z trolejbusami wyposażonymi w baterie trakcyjne stanowią aż 91% rynku.

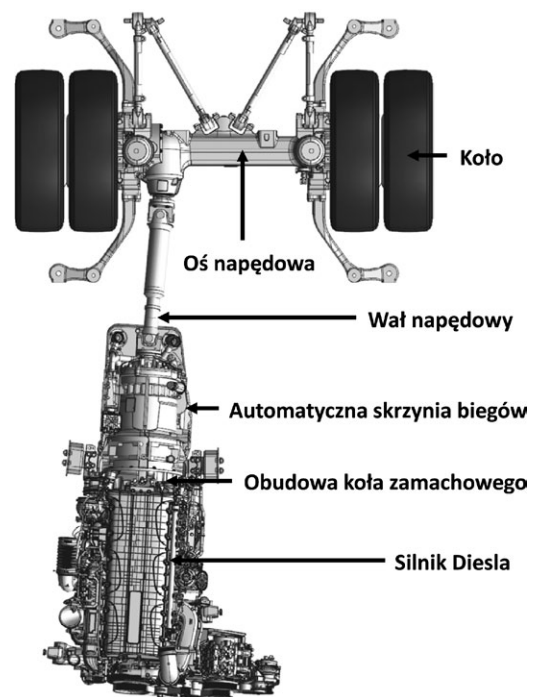
2. Autobus z napędem konwencjonalnym

2.1. Struktura pojazdów z napędem konwencjonalnym

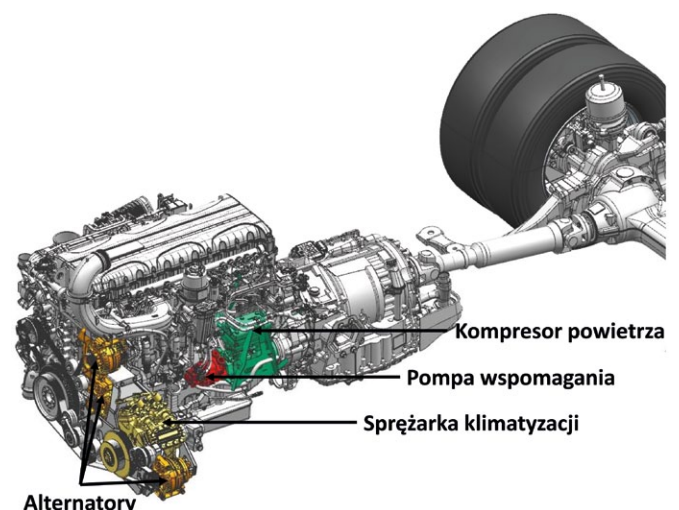
Układ oparty na silniku Diesla połączonym poprzez koło zamachowe z automatyczną skrzynią biegów, w przypadku autobusów miejskich, nazywany jest napędem konwencjonalnym. Ta przekazuje moc przez wał i oś napędową do kół. Architektura systemu napędowego wraz ze wskazaniem głównych komponentów została przedstawiona na rys. 4.

Autobus do prawidłowego funkcjonowania wymaga również akcesoriów, które przedstawiono na rysunku 5.

Takie umieszczenie akcesoriów ogranicza możliwość sterowania niezależnego od pracy silnika spalinowego.



Rys. 4. Architektura systemu napędowego - napęd konwencjonalny [1]



Rys. 5. Akcesoria zasilane z silnika spalinowego [1]

2.2. Architektura nadzorczo-sterująca autobusu z napędem konwencjonalnym

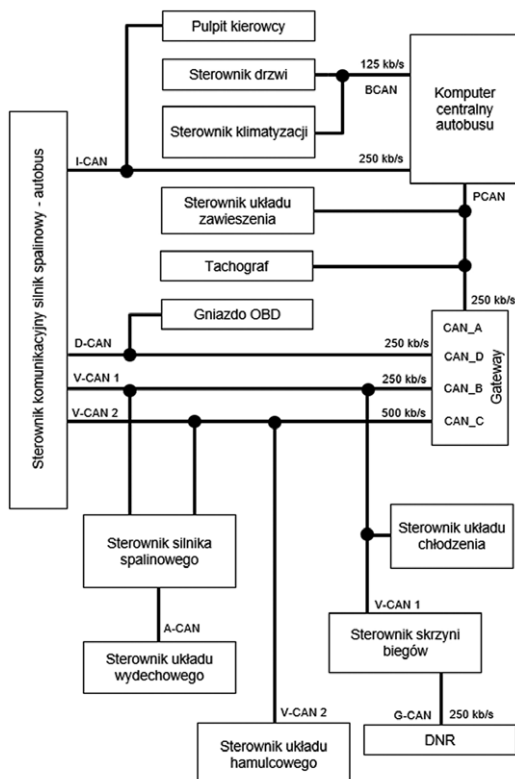
Do poprawnego działania systemów zainstalowanych w autobusie wymagane jest zapewnienie pomiędzy nimi komunikacji przy użyciu magistrali CAN. W aktualnie produkowanych autobusach ilość danych w przypadku linii CAN jest tak duża, że przy podłączeniu wszystkich urządzeń do jednej magistrali o prędkości 250 kb/s obciążenie jej przekracza 70%. W takiej sytuacji zaczynają się pojawiać problemy z nieregularnym wysyłaniem ramek informacji o niższym priorytecie. Przy obciążeniu CAN dochodzącym do 100% dochodzi do awarii autobusu w wyniku braku możliwości wymiany istotnych informacji pomiędzy systemami. W celu przeciwdziałania wspomnianemu problemowi w miarę dokładania do systemu nowych urządzeń konieczne są modyfikacje architektury. Przykładowe rozwiązanie zaprezentowano na rysunku 6.

3. Autobus bateryjny

3.1. Struktura pojazdów z napędem elektrycznym

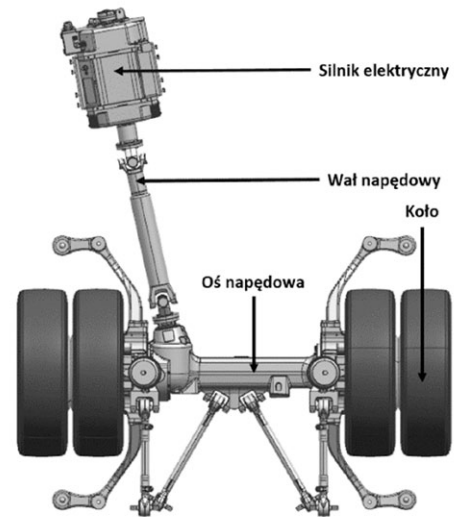
Klasyczna definicja napędu elektrycznego w pojazdach bateryjnych rozumiana jest jako zespół elementów zawierający układ zasilający, silnik elektryczny, wał napędowy, oś napędową i urządzenia sterowania i automatyki. Na rysunku 7 pokazano fragment mechaniczny tego napędu.

W artykule rozszerzono definicję napędu elektrycznego w autobusie bateryjnym o układ energoelektroniczny zasilany pierwotnie z obwodu napięcia stałego (ze źródła i/lub magazynu energii) wraz z komponentami pomocniczymi. Strukturę rozszerzonego układu napędowego wraz ze schematem ideowym połączeń przedstawiono na rysunku 8.

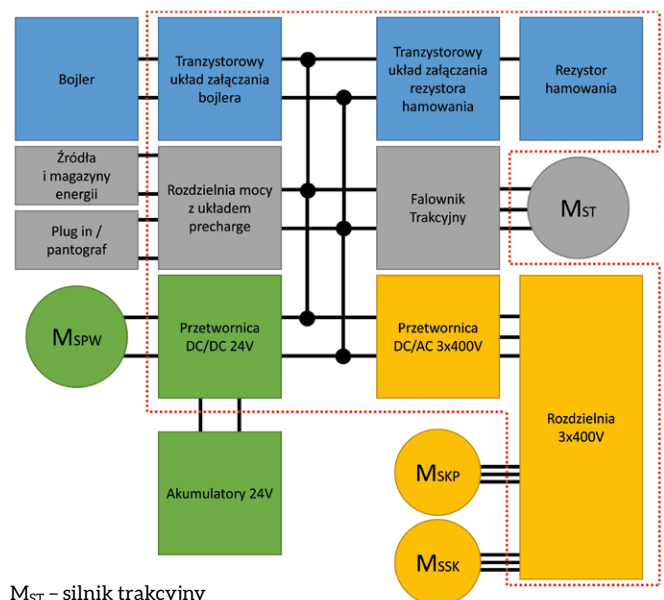


Rys. 6. Architektura magistrali komunikacyjnej CAN systemu nadzorczo-sterującego autobusu z napędem konwencjonalnym [1]

W skład układu energoelektronicznego wchodzi komponenty oznaczone na rysunku 8 czerwoną linią przerywaną. W autobusach do układu napędowego zaliczono dodatkowo przetwornicę DC/DC 24 V, przetwornicę DC/AC 3 × 400 V oraz tranzystorowy układ załączania bojlera, ponieważ stanowią one źródło zasilania akcesoriów dodatkowych, które to w przypadku pojazdów z napędem konwencjonalnym montowane są na silniku Diesla lub z nim połączone.



Rys. 7. Architektura systemu napędowego - napęd elektryczny [1]



M_{ST} - silnik trakcyjny

M_{SPW} - silnik pompy wspomagania

M_{SKP} - silnik kompresora powietrza

M_{SSK} - silnik sprężarki klimatyzacji

... układ energoelektroniczny w autobusie bateryjnym

■ obwód instalacji zasilanej napięciem 24 V DC

■ obwód instalacji zasilanej napięciem 3 × 400 V AC

■ układ napędowy według definicji klasycznej

Rys. 8. Struktura rozszerzonego układu napędowego - schemat ideowy połączeń [1]

3.2. Architektura nadzorczo-sterująca autobusu bateryjnego

Autobusy bateryjne wyróżniają się prostą strukturą magistrali CAN, w której główna linia komunikacyjna o prędkości 250 kb/s odpowiedzialna jest za wymianę informacji pomiędzy głównymi sterownikami pojazdu. Układy bateryjny oraz napędowy w celu prawidłowego sterowania wymieniają wewnątrz systemów wiele informacji. Posiadają więc niezależne wewnętrzne magistrale CAN o prędkości 500 kb/s. Przykładowe rozwiązanie przedstawiono na rysunku 9.

4. Główne różnice w strukturze pojazdów z napędem konwencjonalnym i bateryjnym

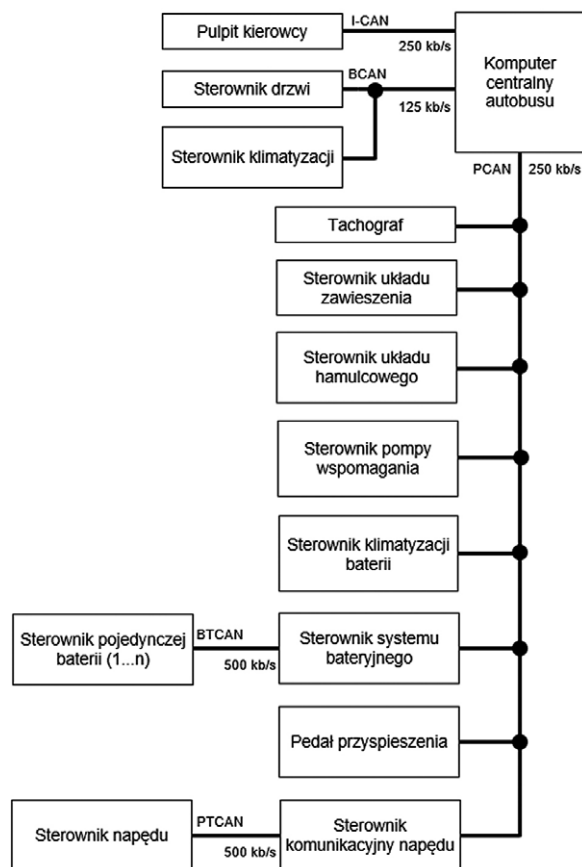
W przypadku autobusów komunikacji miejskiej przewidywane warunki eksploatacji mają kluczowy wpływ na dobór podzespołów i mechanizmów, decydując również o strukturze i konstrukcji pojazdu. Zasadniczą różnicą w przypadku pojazdów z napędem konwencjonalnym w porównaniu do pojazdów bateryjnych jest układ napędowy wraz z akcesoriami. W niniejszym rozdziale przedstawiono różnice pomiędzy akcesoriami, ich sterowaniem oraz źródłem energii wykorzystywanej do ich zasilania.

W przypadku instalacji pokładowej (24 V) autobus z napędem konwencjonalnym wyposażony jest w alternatory, które mają jedną poważną wadę. Jest nią uzależnienie wydajności prądowej od obrotów silnika Diesla. Maksymalny prąd z alternatorów na biegu jałowym silnika jest o około połowę niższy od znamionowego prądu ładowania. W autobusie bateryjnym zastosowano przetwornicę DC/DC 24 V, dzięki której istnieje możliwość kontrolowania maksymalnego prądu ładowania akumulatorów pokładowych poprzez takie nastawienie napięcia dla instalacji 24 V autobusu, aby prąd ładowania nie przekraczał wartości zalecanej przez producenta akumulatorów. Dodatkowo istnieje możliwość ładowania akumulatorów bez trybu jazdy, np. podczas nocnego ładowania baterii trakcyjnych. Funkcjonalności zaimplementowane w autobusie bateryjnym znacząco podnoszą niezawodność i wydłużają życie akumulatorów w instalacji 24 V. Podstawowe różnice systemów ładowania przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Systemy ładowania akumulatorów pokładowych [1]

Autobus z napędem konwencjonalnym	Autobus bateryjny
Źródło napięcia: alternator	Źródło napięcia: przetwornica DC/DC 24 V
Prąd ładowania uzależniony od obrotów silnika Diesla	Regulowany prąd ładowania
Alternator napędzany z silnika Diesla za pomocą paska klinowego	Przetwornica zasilana z baterii trakcyjnych

W przypadku autobusów miejskich bardzo ważny dla podróży jest komfort klimatyczny przestrzeni pasażerskiej. Silnik Diesla w porównaniu do silnika elektrycznego ma niską sprawność. Spora część energii tracona jest na ciepło. Ten niepożądany efekt uboczny w warunkach zimowych w przypadku autobusu zostaje spożytkowany do ogrzania kabiny kierowcy i przestrzeni pasażerskiej. Dzięki temu całkowita sprawność systemu zostaje znacząco podniesiona. Latem jednak energia



Rys. 9. Architektura magistrali komunikacyjnej CAN systemu nadzorczo-sterującego autobusu bateryjnego [1]

ciepna jest tracona w chłodnicy i sprawność systemu spada. Zużycie paliwa pozostaje na podobnym poziomie jak zimą. W przypadku autobusu bateryjnego zimą ciecz w układzie ogrzewania podgrzewana jest za pomocą bojlera sterowanego tranzystorowym układem załączania. W temperaturach ujemnych ogrzewanie pojazdu stanowi ponad 50% całkowitego zużycia energii. Latem możemy wyłączyć ogrzewanie, dzięki czemu spada zużycie energii. Co prawda, bywa załączany klimatyzator, aczkolwiek zużywa on mniej energii niż bojler zimą. Dzięki temu, że klimatyzator zasilany jest z niezależnej przetwornicy DC/AC 3 × 400 V, pojazd może być prekondycjonowany termicznie np. przy podłączonej ładowarce. Podstawowe różnice w systemach sprężarki klimatyzacji przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Sprężarka klimatyzacji [1]

Autobus z napędem konwencjonalnym	Autobus bateryjny
Sprężarka klimatyzacji napędzana z silnika Diesla za pomocą paska klinowego	Sprężarka klimatyzacji napędzana silnikiem elektrycznym zasilanym z przetwornicy DC/AC 3×400 V AC
Sprężarka klimatyzacji może zostać rozłączona poprzez użycie elektro-sprzęgła	Sterowany silnik sprężarki klimatyzacji

Komponentem, który nie tylko ułatwia kierowanie pojazdem, ale również wpływa na zwiększenie bezpieczeństwa czynnego, jest wspomaganie układu kierowniczego. Wprowadzono je w pojazdach w latach dwudziestych XX wieku i do czasów

obecnych jest rozwijane. Najważniejszym jego elementem w autobusach jest pompa, która w przypadku autobusów bateryjnych dla zwiększenia poziomu bezpieczeństwa zasilana jest z obwodu 24 V. Takie rozwiązanie powoduje, że nawet w sytuacji awaryjnej, kiedy dochodzi do rozłączenia baterii trakcyjnych, a więc gdy przetwornice DC/AC 3 × 400 AC oraz DC/DC 24 V nie są zasilane, wspomaganie układu kierowniczego pozostaje nadal aktywne, ponieważ silnik pompy zasilany jest z akumulatorów pokładowych. Elektryczne zasilanie umożliwia dowolne sterowanie układem wspomagania kierownicy. Komputer centralny reguluje wydajność pompy, obniżając siłę wspomagania wraz ze wzrostem prędkości pojazdu oraz wyłącza ją podczas postoju. To sterowanie odbywa się poprzez wysłanie za pomocą magistrali CAN żądania prędkości obrotowej do sterownika silnika pompy wspomagania. Taki algorytm znacznie obniża zużycie energii przez pojazd przy jednoczesnym zachowaniu pełnej funkcjonalności układu wspomagania [1]. Podstawowe różnice pomiędzy pompą wspomagania w przypadku napędu konwencjonalnego i baterijnego przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Pompa wspomagania [1]

Autobus z napędem konwencjonalnym	Autobus bateryjny
Pompa wspomagania napędzana z silnika Diesla poprzez koło zębate	Pompa wspomagania napędzana za pomocą silnika elektrycznego
Brak możliwości całkowitego rozłączenia pompy oraz możliwości jej sterowania	Pompa zasilana z instalacji pokładowej 24 V z możliwością sterowania obrotami

Aktualnie produkowane autobusy wyposażone są w wiele systemów, które wykorzystują powietrze. Są to np. układ regulacji poziomu zawieszenia, układ hamulcowy czy system sterowania drzwiami. W zbiornikach akumulowane jest powietrze o określonym ciśnieniu roboczym, do wytworzenia którego służy kompresor. W przypadku autobusów bateryjnych uruchamiany jest on tylko wtedy, gdy jest taka konieczność. W przypadku autobusów bateryjnych firmy Solaris Bus & Coach Sp. z o.o. algorytm zaszyty w komputerze centralnym weryfikuje, czy:

- pojazd ma włączone zasilanie z baterii trakcyjnej lub ładowarki zewnętrznej;
- ciśnienie powietrza zasilania w obwodzie pneumatycznym jest poniżej dolnej granicy;
- zasilanie powietrza z zewnątrz nie jest podłączone;
- sprężarka powietrza nie jest przegrzana.

Dopiero gdy wszystkie te 4 warunki są prawdziwe, następuje aktywowanie żądania załączenia zasilania dla sprężarki powietrza. Po osiągnięciu wymaganego poziomu ciśnienia powietrza

Tabela 4. Kompresor powietrza 3×400 V AC [1]

Autobus z napędem konwencjonalnym	Autobus bateryjny
Kompresor powietrza napędzany z silnika poprzez koło zębate	Kompresor powietrza napędzany za pomocą silnika elektrycznego zasilanego z przetwornicy DC/AC 3×400 V
Brak możliwości całkowitego rozłączenia kompresora	Możliwość wyłączenia kompresora
Brak możliwości załączenia kompresora niezależnie od pracy silnika spalinowego	Możliwość dowolnego sterowania kompresorem

lub w sytuacji wyłączenia zasilania pojazdu sprężarka zostaje wyłączona. Takie sterowanie jest bardziej optymalne z punktu widzenia zużycia energii samej sprężarki w porównaniu do rozwiązania z silnikiem Diesla. W tabeli 4 przedstawiono podstawowe różnice pomiędzy kompresorem powietrza zamontowanym w autobusie baterijnym i w autobusie wyposażonym w napęd konwencjonalny.

5. Dobór kluczowych elementów systemów napędowego oraz sterującego dla autobusu baterijnego

5.1. Wymagania rynku komunikacji miejskiej a ograniczenia prawne i konstrukcyjne

Warto zauważyć, że ze względu na różną specyfikę pracy pojazdu z silnikiem Diesla w odniesieniu do pojazdu baterijnego obydwa autobusy charakteryzują różne wymagania rynkowe. Autobusy z napędem Diesla umożliwiają jazdę na pojedynczym tankowaniu przez cały dzień. Nikt nie zwraca więc uwagi na ten aspekt przy wyborze nowego pojazdu. Weryfikowane jest jedynie zużycie paliwa, które znacząco wpływa na koszty utrzymania. W przypadku autobusów elektrycznych ograniczony zasięg na pojedynczym ładowaniu, niewystarczający do całodziennego operacyjności, przekłada się na konieczność inwestowania w infrastrukturę. W przypadku instalowania dużych pojemności baterii znacznie zwiększamy ich masę zainstalowaną w pojeździe, co wpływa na znaczne zmniejszenie pojemności pasażerskiej oraz wzrost ceny samego pojazdu. Aby nie zwiększać pojemności baterii, należy obniżyć zużycie energii. Wszelkiego rodzaju optymalizacje, opisane również w poprzednich rozdziałach artykułu, implikują obniżenie kosztów pojazdu, eksploatacji, a także wpływają na zwiększenie zasięgu autobusu. W celu obiektywnej oceny zużycia energii przez autobus miejski stworzono dedykowane dla branży procedury pomiaru e-Sort. Sort 1 odwzorowuje ciężkie warunki miejskie przy średniej prędkości 12,1 km/h, Sort 2 – transport miejski przy średniej prędkości 18 km/h, natomiast Sort 3 – transport podmiejski przy średniej prędkości 25,3 km/h. W trakcie testów wykonywane są trzy przyspieszenia do różnych prędkości. Na ich podstawie wyznaczane jest zużycie energii w określonych procedurach warunkach [8]. Warto jednak podkreślić, że w realnych warunkach eksploatacji na końcową wartość zużycia energii mają również wpływ inne czynniki, takie jak topografia terenu czy klimat, w jakim eksploatowany jest autobus [6].

W celu realizacji powyższych wymagań klientów trzeba stawić czoła wielu wyzwaniom ze względu na ograniczenia prawne i konstrukcyjne. Utrzymanie odpowiedniego rozkładu mas pomiędzy osiami, tak aby nie przekroczyć wymagań prawnych i technicznych nacisków na pojedynczą oś, a jednocześnie określając maksymalną liczbę pasażerów, skorzystać z całej dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu, jest kluczową trudnością do pokonania. Zgodnie z Regulaminem 107 EKG ONZ oraz Regulaminem UE 1230/2012 w autobusach klasy I jako masę jednego pasażera przyjmuje się 68 kg. Maksymalną liczbę pasażerów wyznacza się jako różnicę dopuszczalnej masy całkowitej pojazdu i masy własnej pojazdu podzieloną przez 68. Ta maksymalna liczba pasażerów może jeszcze zostać ograniczona

poprzez dostępne w autobusie miejsce oraz przekroczenie nacisków na osie.

5.2. Dobór kluczowych komponentów systemu

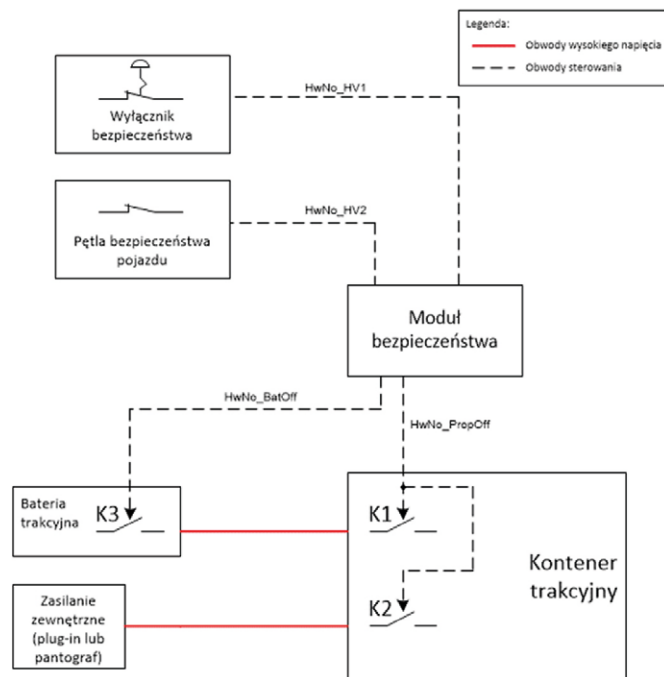
Najważniejszymi komponentami systemu w autobusie bateryjnym są silnik trakcyjny oraz falownik. Przy doborze odpowiedniego zestawienia tych komponentów do autobusu elektrycznego istotnym parametrem jest moc w warunkach pracy ciągłej i dorywczej. Silnik trakcyjny musi mieć taką moc, aby pojazd był w stanie osiągnąć żądaną prędkość oraz przyspieszenie w określonych warunkach ukształtowania terenu. W celu weryfikacji, czy dany silnik jest odpowiedni, tworzona jest charakterystyka siły trakcyjnej w funkcji prędkości pojazdu [7]. Charakterystyka ta wykreślana jest dla wzniesień o różnym procencie nachylenia.

5.3. Analiza źródeł i magazynów energii – baterie i ich dobór

Dobór baterii trakcyjnych w autobusach bateryjnych wykonywany jest indywidualnie dla każdego przypadku. W celu wytypowania baterii o optymalnych parametrach zarówno trakcyjnych, jak i trwałościowych konieczna jest m.in. analiza klimatyczna miejsca pracy pojazdu, jego cykli pracy oraz charakterystyki topograficznej. Dla znanej ustalonej komplektacji napędu wraz z działającymi akcesoriami symulowane jest zużycie energii i moc wymagana z baterii. Jako ostatni punkt dobierana jest pojemność energetyczna baterii, umożliwiająca przejechanie danego przez klienta odcinka trasy na pojedynczym ładowaniu. Sprawdzana jest możliwość ładowania baterii w określonym czasie przeznaczonym na postój. Dla dobranych baterii symulowany jest czas ich życia w danej komplektacji. Część baterii w autobusie może być zastąpiona ogniwem paliwowym, które będzie pokrywało zapotrzebowanie na moc w pojeździe na poziomie średniego zużycia. Chwilowe zwiększone zapotrzebowania na moc zostają pokryte z pozostałych w pojeździe baterii trakcyjnych. W ogniwie paliwowym energia chemiczna wodoru zamieniana jest na energię elektryczną, a jedynymi dodatkowymi produktami konwersji są ciepło i para wodna. W czasie procesu nie powstają szkodliwe zanieczyszczenia środowiskowe, takie jak cząstki stałe, tlenki azotu, siarki czy też dwutlenek węgla. Wykorzystanie ogniwa paliwowego limitowane jest wysokim kosztem układu oraz niską dostępnością paliwa w postaci wodoru piątej klasy czystości [3].

5.4. Systemy zapewniające bezpieczeństwo użytkownika

Każdy autobus wyposażony jest w systemy zapewniające bezpieczeństwo, z których najważniejszy jest układ hamowania. Jedną z głównych zalet pojazdów elektrycznych jest możliwość hamowania rekuperacyjnego, podczas którego silnik przechodzi w stan pracy generatorowej i wytwarza energię elektryczną gromadzoną w magazynach energii. W autobusach bateryjnych wartość momentu hamującego wyznaczana jest przez sterownik układu hamulcowego i wysyłana za pomocą magistrali CAN do sterownika napędu. Ten odpowiednio obciąża silnik trakcyjny, aby uzyskać zadany moment hamujący. Zdarzają się jednak sytuacje, w których w trakcie hamowania nie jest możliwe odebranie energii elektrycznej z silnika trakcyjnego, np. wskutek



Rys. 10. Wyłącznik awaryjny i pętla bezpieczeństwa [1]

osiągnięcia pełnego naładowania baterii trakcyjnych. Z tego powodu stosuje się rezystory hamowania, których zadaniem jest rozproszenie w ciepło wytworzonej w takiej sytuacji energii elektrycznej. Autobusy bateryjne wyposażone są dodatkowo w wyłączniki awaryjne, które przeznaczone są dla kierowcy i służb ratowniczych. Podłączane są do modułu bezpieczeństwa, którego zadaniem jest sekwencyjne rozłączenie stycznika głównego wyposażonego w komorę gaszeniową, a następnie styczników źródeł i magazynów energii. W konsekwencji tego następuje rozłączenie zasilania o napięciu niebezpiecznym dla życia ludzi. Wyłączniki awaryjne używane są np. podczas wypadków drogowych. Przykładowy schemat ideowy obwodu bezpieczeństwa przedstawiono na rysunku 10.

Autobus bateryjny posiada także automatyczny wyłącznik w formie obwodu bezpieczeństwa, którego przerwanie powoduje ciąg zdarzeń jak w przypadku wyłącznika awaryjnego, np. otwarcie puszkii łączeniowej prowadzi do automatycznego rozłączenia zasilania.

6. Podsumowanie i wnioski

Od 2016 roku obserwowany jest znaczny wzrost sprzedaży autobusów z napędem elektrycznym. Coraz dojrzalsza technologia, jak również powstające prawo oraz nowe normy wskazują, iż trend ten utrzyma się. Specyfika rynku komunikacji miejskiej dość precyzyjnie określa warunki eksploatacji. Informacje te mają kluczowy wpływ na dobór podzespołów i mechanizmów, decydując również o strukturze i konstrukcji autobusu. Systemy zastosowane w autobusie elektrycznym można dowolnie kontrolować, w przeciwieństwie do systemów zastosowanych w autobusach z napędem spalinowym. W związku z powyższym możliwe jest wprowadzenie algorytmów zwiększających efektywność wykorzystania energii w pojeździe. Kompleksowe podejście w projektowaniu oraz zindywidualizowany dobór

baterii trakcyjnych przekłada się również na redukcję kosztów eksploatacji oraz decyzje klientów dotyczące zakupu pojazdów. Ponadto uwzględnienie bezpieczeństwa funkcjonalnego bezpośrednio przekłada się na bezpieczeństwo pasażerów i obsługi.

Literatura

- [1] Opracowanie własne Solaris Bus & Coach Sp. z o.o.
- [2] PIKUŁA M., SIERSZYŃSKI M., PIOTROWSKI A., SIDORSKI F.: *Autobusy napędzane silnikiem elektrycznym w zeroemisyjnym transporcie publicznym*. Poznan University of Technology Academic Journals, „Electrical Engineering” 95/2018.
- [3] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Ustawa o Elektromobilności i Paliwach Alternatywnych, Warszawa 2018.
- [4] Polski Fundusz Rozwoju, *Elektromobilność w Transporcie Publicznym*, Warszawa 2018.
- [5] DYR T., ABRAMOWICZ A.: *Projekt eBus jako instrument rozwoju transportu*. „Autobusy” 7–8/2016.
- [6] SIDORSKI F.: *Charakterystyka pracy stacji ładowania autobusów elektrycznych*. „Przegląd Elektrotechniczny” 10/2018.

- [7] PROCHOWSKI L.: *Pojazdy samochodowe. Mechanika ruchu*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [8] UITP project „E-SORT” – Standardised On Road Test Cycles for electric buses.

Artykuł został opublikowany w czasopiśmie „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1/2019.

-  Michał Sierszyński – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o.;
- Łukasz Chełchowski – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o.;
- Michał Pikuła – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o.;
- dr inż. Dariusz Michalak – Solaris Bus & Coach Sp. z o.o.;
- Franciszek Sidorski – Politechnika Poznańska, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o.

artykuł recenzowany