

Projektowanie elektrycznego układu napędowego autobusów miejskich

Streszczenie: Szybko rosnąca świadomość ekologiczna prowadzi do nowych wyzwań stawianych producentom autobusów miejskich. Dotyczą one obniżenia zużycia energii przy utrzymaniu możliwości trakcyjnych pojazdów. Dobór optymalnych pod względem zużycia energii i sprawności elementów elektrycznego układu napędowego ma więc istotny wpływ na ekologiczne i ekonomiczne aspekty autobusu miejskiego. W artykule przedstawiono analityczne i praktyczne podejście do doboru elektrycznego układu napędowego.

Abstract: Rapidly growing environmental awareness leads to new tasks for bus manufacturers. These relate to reduction of energy consumption while maintaining the traction capabilities of the vehicles. The selection of optimal, in terms of energy consumption and efficiency, components of the electric drive system has a significant impact on the environmental and economic aspects of a city bus. This paper presents an analytical and practical approach to electric powertrain selection. (*Design of electric drivetrain for urban buses.*)

Słowa kluczowe: sprawność, autobusy elektryczne, napęd elektryczny, elektryczny układ napędowy

Keywords: efficiency, electric buses, electric propulsion, electric drivetrain

Wstęp

Rosnąca świadomość ekologiczna oraz zmieniające się akty prawne jak Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) 595/2009, 2019/1242 czy Rozporządzenia Komisji (WE) 582/2011, 133/2014 wraz z późniejszymi poprawkami prowadzą do rozwoju nowych układów napędowych. Polska posiada niewielkie w stosunku do potrzeb zasoby ropy natomiast jest samowystarczalna w zakresie energii elektrycznej, stąd elektromobilność jest wyborem strategicznym poprawiającym nasze bezpieczeństwo energetyczne [1]. W artykule przedstawiono metodę doboru elektrycznego silnika trakcyjnego dla dwuosioowych autobusów miejskich kategorii M3 oraz wynik implementacji i walidacji rozwiązania w pojazdach. Dobór parametrów elektrycznego silnika trakcyjnego takich jak moc, moment obrotowy czy maksymalna prędkość obrotowa różni się od doboru tych parametrów w pojazdach z silnikiem z zapłonem samoczynnym. Silniki Diesla używane są nie tylko do napędu pojazdu, dostarczają również energii kinetycznej do pracy akcesoriów pomocniczych do których należą alternatory, pompa układu wspomagania kierownicy, sprężarka powietrza czy sprężarka klimatyzacji. W przypadku autobusów elektrycznych firmy Solaris rolą elektrycznego silnika trakcyjnego jest tylko i wyłącznie napędzenie pojazdu. Akcesoria zasilane są energią elektryczną zmagazynowaną w bateriach trakcyjnych [2]. Ze względu na powyższe, w artykule koncentrujemy się na elektrycznym silniku trakcyjnym pomijając kwestie akcesoriów. Właściwości trakcyjne, które szczególnie interesują użytkowników pojazdów to przyspieszenie, prędkość maksymalna oraz zdolność pokonywania wzniesień z zadaną prędkością. Analiza wymagań rynku dwuosioowych autobusów miejskich wykonana na bazie materiałów firmy Solaris pokazuje, że pojazd w pełni załadowany, poruszający się po płaskiej powierzchni z prędkością $\geq 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ oraz pokonujący wzniesienia o nachyleniu 12% z prędkością co najmniej $20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ spełnia wymagania większości europejskich klientów.

Identyfikacja modelu trakcyjnego pojazdu w oparciu o próby wybiegu.

W celu określenia wymagań stawianych jednostce napędowej, konieczne jest poznanie i zmierzenie istotnych parametrów charakteryzujących pojazd, do którego

dobierany jest silnik trakcyjny. Należą do nich: masa pojazdu, współczynnik oporu powietrza, współczynnik oporu toczenia, współczynnik bezwładności mas wirujących, pole powierzchni czołowej pojazdu, sprawność i przełożenie osi napędowej oraz wymiary kół jezdnych [3]. Po ustaleniu wartości współczynników równań ruchu oraz kąta nachylenia jezdni i oczekiwanej prędkości jazdy autobusu można obliczyć siłę napędową niezbędną do pokonania występujących oporów ruchu (oporu toczenia, oporu powietrza i oporu wzniesienia), które opisano wzorem (1).

$$(1) F_{\text{total}} = mgf_0 \left(1 + \left(0,0216 \cdot \frac{v}{|\hat{v}|} \right)^2 \right) \cos(\arctg(\alpha)) + mgsin(\arctg(\alpha)) + \frac{1}{2} \rho A c_x v^2 \text{ [N]},$$

gdzie: m – masa pojazdu [kg], g – przyspieszenie ziemskie $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$, f_0 – współczynnik oporu toczenia przy prędkości $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, v – prędkość pojazdu $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$, α – nachylenie jezdni [%], ρ – gęstość powietrza $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$, A – pole powierzchni czołowej pojazdu $[\text{m}^2]$, c_x – współczynnik oporu powietrza, $|\hat{v}|$ – wartość wektora prędkości $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Po wyznaczeniu wartości oporu całkowitego działającego na pojazd w określonych warunkach możliwe jest obliczenie wartości momentu obrotowego silnika oraz mocy mechanicznej. Zależność ta opisana jest wzorem (2).

$$(2) M_{\text{sil}} = \frac{F_{\text{total}} r}{\eta_i} \text{ [Nm]}, P_{\text{sil}} = \frac{F_{\text{total}} v}{1000 \eta_i} \text{ [kW]}$$

r – promień koła [m], η_i – sprawność osi napędowej, i – przełożenie osi napędowej, v – prędkość pojazdu $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

Badaniem pozwalającym wyznaczyć opory toczenia i powietrza jest tzw. próba wybiegu. Prędkości początkowe umożliwiające w przypadku pojazdów wyznaczenie oporu toczenia zawierają się w zakresie 10-15 $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ [4]. Badania wskazują, że w tym zakresie prędkości wartość oporu aerodynamicznego jest pomijalna w stosunku do oporu toczenia. Badania przeprowadzone przy wyższych prędkościach początkowych pozwalają ustalić sumę oporów ruchu. Testy zostały przeprowadzone na autobusie Solaris Urbino na płaskiej nawierzchni asfaltowej o wysokiej jakości, która zapewniła wiarygodność uzyskanych danych. Warunki testów oraz dodatkowe parametry pojazdu

niezbędne do przeprowadzenia obliczeń znajdują się w tabeli 1. Do rejestracji sygnałów wykorzystano odbiornik GPS Vbox Racelogic (położenie pojazdu oraz profil prędkości) oraz interfejs komunikacyjny CAN Vector VN 1610 (dodatkowe sygnały dotyczące prędkości pojazdu oraz parametry związane z pracą urządzeń trakcyjnych takie jak moc silników elektrycznych oraz wartości dynamiczne prądów pobieranych przez inwerter). Próby

wybiegu wykonano wielokrotnie w dwóch kierunkach, aby zniwelować wpływ ewentualnego nachylenia drogi oraz wiatru. W ramach każdego pomiaru zmierzono czas zmiany prędkości. Stosując drugą zasadę dynamiki Newtona obliczono opór całkowity działający na pojazd a następnie wartość współczynnika oporu toczenia f_0 (tabela 2) oraz wartość współczynnika oporu powietrza c_x (tabela 3).

Tabela 1. Dane wejściowe służące do przeprowadzenia obliczeń wartości oporów ruchu

Temperatura powietrza	Ciśnienie powietrza	Indywidualna stała gazowa	Liczba kół	Moment bezwładności pojedynczego koła	Moment bezwładności wirnika silnika	Moment bezwładności osi napędowej
16°C	1027 hPa	287 J/(kg*K)	6 sztuk	10 kgm ²	1,36 kgm ²	7,38 kgm ²
Gęstość powietrza			Współczynnik bezwładności mas wirujących			
1,238 kg/m ³			1,029			

Tabela 2. Wyznaczenie średniego współczynnika oporu toczenia

Oznaczenie próby (numer-kierunek)	Średnie opóźnienie w zakresie prędkości 10-0 $\frac{km}{h} (\frac{m}{s^2})$	Siła oporu toczenia (N)	Współczynnik oporu toczenia f_0
1-1	0,046941	651,7073	0,004923
1-2	0,09825	1364,108	0,010304
2-1	0,04527	628,4774	0,004747
2-2	0,09065	1258,539	0,009507
3-1	0,0466	646,9839	0,004887
3-2	0,09266	1286,422	0,009717
4-1	0,06309	875,9676	0,006617
4-2	0,08373	1162,481	0,008781
5-1	0,05109	709,2646	0,005338
5-2	0,08748	1214,472	0,009174
Średnia wartość współczynnika oporu toczenia f_0			0,0074±0,0009

Tabela 3. Wartości zastosowane do wyznaczenia średniego współczynnika oporu powietrza

Próba (numer-kierunek)	Średnie opóźnienie w przedziale prędkości (m/s ²)		Całkowity opór ruchu (N)		Siła oporu toczenia (wyznaczona w oparciu o model teoretyczny) (N)		Siła oporu aerodynamicznego (N)			
	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20		
1-1	0,196	0,19	2721,16	2637,86	1191,71	1165,23	1529,45	1472,61		
1-2	0,201	0,204	2790,58	2832,23			1598,87	1666,98		
2-1	0,209	0,196	2901,65	2721,16			1709,94	1555,91		
2-2	0,21	0,21	2915,53	2915,53			1723,82	1750,28		
3-1	0,195	0,189	2707,28	2623,98			1515,57	1458,72		
3-2	0,215	0,217	2984,95	3012,71			1793,24	1847,46		
4-1	0,215	0,195	2984,95	2707,28			1793,24	1542,03		
4-2	0,205	0,209	2846,11	2901,65			1654,40	1736,39		
5-1	0,21	0,2	2915,53	2776,70			1723,82	1611,44		
5-2	0,209	0,219	2901,65	3040,48			1709,94	1875,23		
Średni współczynnik oporu powietrza c_x							0,80±0,09			

Według literatury [3] wartość współczynnika aerodynamicznego dla autobusów oraz furgonów zawiera się w przedziale 0,5 do 0,8. Wyznaczona wartość współczynnika oporu aerodynamicznego autobusu Urbino z uwzględnieniem błędu pomiarowego wyznaczonego metodami statystycznymi mieści się w granicach podanych wartości literaturowych.

Z uwagi na istotny udział oddziaływań dyfuzyjnych w ramach oporu powietrza, mających wpływ na błąd wyznaczenia współczynnika oporu aerodynamicznego, nie uwzględniono w obliczeniach danych z zakresu 0-70 km/h [5].

Dobór silnika trakcyjnego.

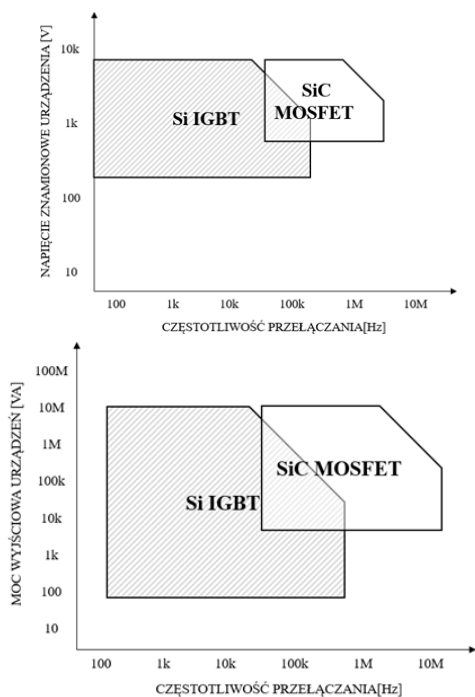
Jak wspomniano we wstępie autobus poruszający się po płaskiej powierzchni z prędkością $\geq 80 \frac{km}{h}$ oraz pokonujący wzniesienia o nachyleniu 12% z prędkością co najmniej $20 \frac{km}{h}$ spełnia wymagania większości europejskich klientów. Z obliczeń matematycznych wynika, że aby

zapewnić pojazdowi Solaris Urbino o masie całkowitej 16 000 kg, wyposażonemu w koła jezdne o rozmiarze R19,5 265/70 oraz oś napędową o przełożeniu 6,5, możliwość poruszania się po jezdni o nachyleniu 12% z prędkością $20 \frac{km}{h}$ należy zastosować silnik zapewniający $\sim 1\ 400$ Nm momentu obrotowego oraz ~ 120 kW mocy mechanicznej przy 850 obr/min. Producenci trakcyjnych silników elektrycznych posiadają w swojej ofercie znaczną liczbę rozwiązań o zróżnicowanych charakterystykach. Dzięki temu możliwy jest dobór silnika z istniejących rozwiązań. Dobrano silnik synchroniczny spełniający powyższe kryteria. Wyznaczenie na podstawie danych z testów wykresu obrazującego całkowite opory ruchu na określonych wzniesieniach oraz siłę napędową w funkcji prędkości autobusu pozwala analizować możliwości trakcyjne w różnych warunkach. Na podstawie uzyskanej charakterystyki i stworzonego modelu matematycznego możliwe jest przeprowadzanie symulacji weryfikujących możliwość pokonania rzeczywistych zarejestrowanych za pomocą odbiornika GPS tras klientów. W symulacji

uwzględnia się nie tylko szczegółowy profil topograficzny oraz profil prędkości charakterystyczny dla analizowanej linii ale również symulowane jest obciążenie pojazdu pasażerami. Obciążenie to w rzeczywistych warunkach eksploatacji ulega nieustającym zmianom.



Rys. 1. Wykres traktacyjny dla autobusu Solaris Urbino



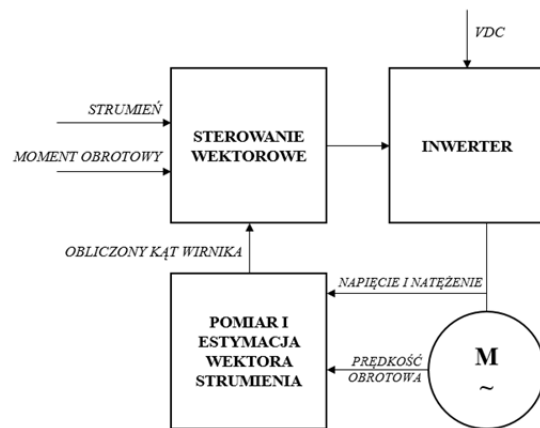
Rys. 2. Różnice pomiędzy technologiami IGBT i SiC MOSFET [6]

Rysunek 1 pokazuje wykres traktacyjny autobusu Solaris Urbino dla wybranego silnika. Z wykresu odczytać można, że silnik ten spełnia wymagania zdefiniowane powyżej. Na wykresie pokazano charakterystyki sterowania silnika, zależne pośrednio od czasu trwania obciążenia. Zgodnie z powyższym wykresem możliwe jest pokonywanie na przykład drogi o nachyleniu 8% z prędkością $44 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ przez 30 sekund. Przy dłuższym czasie trwania obciążenia następuje redukcja momentu obrotowego (w związku z wysoką temperaturą uzwojeń), na skutek czego możliwa jest jazda ciągła na wzniesieniu 8% z prędkością $36 \frac{\text{km}}{\text{h}}$.

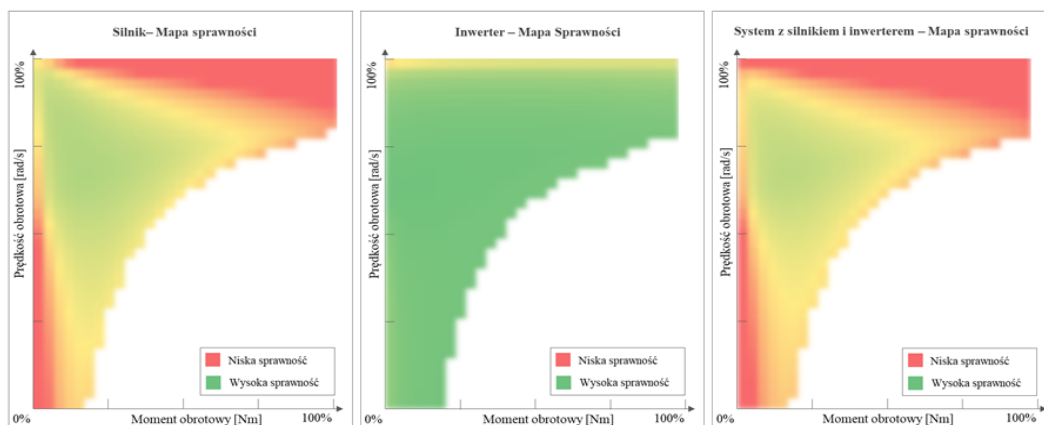
Dobór falownika do silnika

Dobór falownika jest kluczową kwestią, od której zależy zużycie energii, a także wydajność oraz czas reakcji systemu napędowego [2]. Aktualnie w pojazdach klasy M3 stosowane są dwie popularne technologie tranzystorowe: IGBT i SiC MOSFET [6]. Technologia SiC MOSFET, w porównaniu do technologii IGBT pracuje na wyższych częstotliwościach taktowania (rys. 2), zapewnia redukcję strat przełączania i zajmuje mniejszą powierzchnię. Niestety technologia SiC jest aktualnie droższa w zakupie niż IGBT.

Autobusy Solaris przygotowano zarówno pod rozwiązania w technologii SiC MOSFET optymalne pod względem zużycia energii jak i IGBT – optymalne pod względem kosztowym. W obu tych rozwiązaniach zastosowano sterowanie wektorowe, pozwalające uzyskać wysoką dokładność regulacji prędkości obrotowej jak przedstawiono na rys. 3..



Rys. 3. Idea sterowania wektorowego [7]

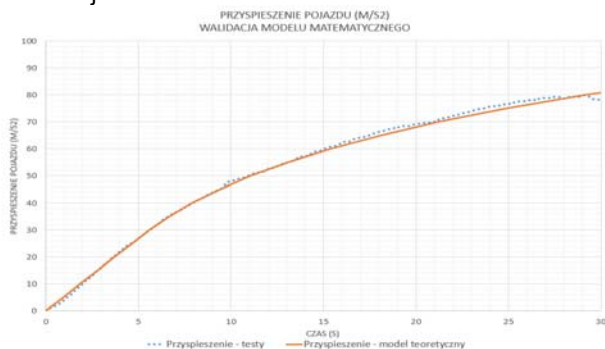


Rys. 4. Sprawność systemu składającego się z silnika trakcyjnego oraz falownika

Aby uzyskać system trakcyjny optymalny z punktu widzenia zużycia energii dla danego histogramu prędkości, konieczne jest uwzględnienie obu charakterystyk: silnika trakcyjnego i falownika. Wspólna mapa sprawności definiuje najefektywniejszy zakres pracy. Jej przykład został przedstawiony na Rysunku 4.

Implementacja oraz walidacja dobranego rozwiązania w autobusie elektrycznym

Charakterystyka funkcji $v(t)$ dla pojazdu Solaris Urbino MIDI klasy M3, obciążonego do masy 13 495 kg, została wyznaczona podczas testów przyspieszeń na płaskiej drodze z wykorzystaniem następujących urządzeń: odbiornik GPS Vbox Racelogic oraz interfejs komunikacyjny CAN Vector VN 1610. Dla kół o rozmiarze R19,5 265/70 przełożenie osi napędowej wynoszące 6,5 zapewnia najwyższą sprawność układu napędowego (przedstawioną na rys. 4) w przedziale najczęściej występujących prędkości autobusu, tj. 15-35 km/h. Zestawienie wyników testów oraz obliczeń teoretycznych przedstawione na Rysunku 5 wskazuje na zbieżność modelu teoretycznego z rzeczywistym przebiegiem prędkości uzyskanym w trakcie testu. Jest to dowód, że zaprezentowana w niniejszym artykule metoda jest wystarczająca w procesie doboru napędu elektrycznego w autobusie miejskim, przy jednoczesnym niewielkim zaangażowaniu zasobów i kosztów. Powstały w ten sposób model matematyczny pozwala na weryfikację operacyjności pojazdu na konkretnej linii.



Rys. 5. Porównanie wartości przyspieszeń otrzymanych metodą teoretyczną z wartościami uzyskanymi w teście

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono metodologię działań zmierzających do doboru napędu elektrycznego pod względem parametrów trakcyjnych oraz sprawności. Wyzwanie stanowi właściwe wyznaczenie współczynników oporu powietrza oraz toczenia. Opisano przebieg wykonanych testów z wykorzystaniem metody wybiegu. Bazując na przeprowadzonych badaniach można

stwierdzić, że w przypadku autobusu Urbino o dopuszczalnej masie całkowitej 16 000 kg wartości oporów toczenia stanowią od 45% do 100% a wartości oporów powietrza od 0% do 55% całkowitej siły oporu ruchu na płaskiej nawierzchni w zakresie prędkości 0-80 km/h. Bazując na stworzonym modelu matematycznym pojazdu wybrano silnik trakcyjny oraz falownik posiadające najwyższą sumaryczną sprawność w funkcji prędkości autobusu najczęściej występujących w aplikacjach miejskich to jest 15 - 35 km/h.. Cały proces doboru silnika jest skomplikowany i uwzględnia szereg innych kryteriów zarówno technicznych jak i biznesowych, z których najważniejsze to: masa, temperatura pracy, cena, gwarantowana trwałość oraz terminy dostaw.

Autorzy:

mgr inż. Łukasz Chelchowski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o., e-mail: chelchowski@agh.edu.pl, lukasz.chelchowski@solarisbus.com, ORCID 0000-0002-9014-8898

mgr inż. Michał Sierszyński, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o., e-mail: sierszynski@agh.edu.pl, michal.sierszynski@solarisbus.com, autor korespondujący, ORCID 0000-0001-6356-6165

dr hab inż. Piotr Czop, profesor nadzwyczajny AGH. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Adama Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: pczop@agh.edu.pl, ORCID 0000-0002-6347-5412

mgr inż. Dariusz Adamczyk, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o., e-mail: dariusz.adamczyk@solarisbus.com, ORCID 0000-0002-9211-3090

mgr inż. Mateusz Banasiewicz, Solaris Bus & Coach Sp. z o.o., e-mail: mateusz.banasiewicz@solarisbus.com

LITERATURA

- [1] Plan Rozwoju Elektromobilności w Polsce „Energia do przyszłości”, Ministerstwo Energii,
- [2] Sierszyński M., Chelchowski Ł., Piłkuła M., Michalak D., Sidorski F., Projektowanie i Eksploatacja Systemów Przeznaczonych do Autobusów z Napędem Alternatywnymi, Napędy i Sterowanie R.22 nr 11 2020, 85-91
- [3] Prochowski L., Mechanika Ruchu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2016
- [4] Myers P., Foster D., Vehicles and Their Powerplants: Energy Use and Efficiency, Encyclopedia of Energy, 2004
- [5] Maciejewski M., O zależności współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości jazdy, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 4-M/2012
- [6] Nitzsche M., Comprehensive Comparison of a SiC MOSFET and Si IGBT Based Inverter, IGBT Based Inverter, Maximilian Nitzsche, PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2019, 1-7.
- [7] Popescu M., Induction Motor Modelling for Vector Control Purposes, Espoo: Helsinki University of Technology, 13-14