

Tadeusz Glinka, BOBRME Komel, Katowice
Romuald Grzenik, Marcin Fice, Rafał Setlak, Politechnika Śląska, Gliwice

KONSTRUKCJA STANOWISKA BADAWCZEGO HYBRYDOWEGO NAPĘDU AUTOBUSU

TESTING LABORATORY STAND OF A HYBRID ELECTRIC DRIVE FOR A CITY BUSES

Abstract: This article presents a way of a city bus traction parameters calculating. Those parameters have been determined in order to design and construct a testing laboratory stand of a hybrid electric drive. The laboratory stand includes an electric motor which simulates an internal combustion engine, an electric brushless machine with permanent magnets which assists the internal combustion engine and a DC generator as a resistance to motion and breaking load. On power transmission system is installed additional moment of inertia which simulate an inertial load.

1. Wstęp

Zanieczyszczenie powietrza szkodliwymi substancjami pochodzącymi ze źródeł motoryzacyjnych jest najbardziej uciążliwe w dużych miastach. Jednym ze sposobów ograniczenia emisji zanieczyszczeń oraz zużycia paliw ciekłych w pojazdach mechanicznych jest zastosowanie napędu, w którym silnik spalinowy jest wspomagany w pewnych warunkach ruchu przez maszynę elektryczną (tzw. napęd elektryczno-hybrydowy HEV). Zalety połączenia tych dwóch silników uwiadcniają się szczególnie w ruchu miejskim, kiedy występują częste hamowania (możliwość odzysku energii traconej w postaci ciepła w hamulcach), ruszania (wspomaganie silnika spalinowego) oraz postoje wynikające z sygnalizacji świetlnej czy rozkładu jazdy autobusu (możliwość chwilowego wyłączenia silnika spalinowego). Oprócz istotnego zmniejszenia emisji spalin dodatkowym, ekonomicznym efektem stosowania napędu hybrydowego jest obniżenie kosztów transportu miejskiego.

2. Cel projektu

Celem projektu realizowanego w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki Politechniki Śląskiej jest opracowanie i skonstruowanie stanowiska laboratoryjnego napędu hybrydowego autobusu miejskiego. Nowością w budowanym napędzie hybrydowym będzie zastąpienie części baterii akumulatorów baterią superkondensatorów. Stanowisko laboratoryjne napędu hybrydowego autobusu pozwoli na prowadzenie badań i opracowanie strategii sterowania silnikami (napędowym głównym

i elektrycznym wspomagającym) oraz algorytmów sterowania przepływem energii w nowatorskim magazynie energii (baterii akumulatorów i superkondensatorów). Główne korzyści jakie przyniesie zastosowanie dwóch różnych magazynów energii to zwiększenie trwałości akumulatorów, a co za tym idzie zmniejszenie kosztów inwestycji w napęd hybrydowy oraz zwiększenie sprawności napędu. Akumulatory cechują się bowiem niskimi gęstościami mocy. Występują w nich problemy z poborem dużych prądów chwilowych, posiadają dużą masę oraz stosunkowo niską trwałość (liczba cykli ładowanie-wyładowanie). Zastosowanie akumulatorów o dobrych parametrach energetycznych (np. Ni-MH, Li-ion) wiąże się ze znacznym zwiększeniem kosztów inwestycji. Podyktowane jest to monopolizacją rynku ogniw dla pojazdów hybrydowych. Baterie są wykonywane przez światowego potentata w dziedzinie zaawansowanych technologii jedynie dla konkretnych modeli pojazdów. Cena samej baterii akumulatorów Ni-MH (o niskiej pojemności poniżej 10Ah i napięciu z zakresu 140-250 V) dla dostępnych na polskim rynku pojazdów hybrydowych klasy średniej wynosi około 4tys. € brutto. Bateria akumulatorów Ni-MH czy Li-ion pozwala na zgromadzenie kilkukrotnie większej energii niż akumulator kwasowo-olowiowy przy tej samej masie, jednak są one daleko bardziej wrażliwe na stan naładowania niżli tradycyjne ogniwa Pb-PbO₂. Dopuszczenie do naładowania powyżej 80% lub rozładowania poniżej 20% pojemności znamionowej prowadzi do skrócenia ich trwałości lub nawet uszko-

dzenia i wyłączenia z eksploatacji. Takich wad nie posiadają natomiast superkondensatory. Zastosowanie ich w układzie napędowym elektryczno-hybrydowym stwarza możliwość przyjmowania i wydawania bardzo dużych mocy podczas hamowania oraz przyspieszania bez narażania na zniszczenie. Kolejną ważną zaletą jest ich bardzo mały ciężar. Dla celów orientacyjnych przytoczono wybrane parametry modułu dostępnego na rynku superkondensatora o pojemności 58F i napięciu 15 V. Gęstość energii wynosi $q_{en} = 3,2$ Wh/kg (dla porównania dla akumulatora ołowianego maksymalne wartości $q_{en}=33$ Wh/kg) a gęstość mocy $p_w=3000$ W/kg (odpowiednio dla Pb-PbO₂ $p_w=48,5$ W/kg). Trwałość modułu wynosi 500 000 cykli (dla Pb-PbO₂ około 1500 cykli), a masa 0,6 kg! Do tej pory w Polsce nie badano tego typu napędów spalinowo-elektrycznych wykorzystujących nowatorski magazyn energii (połączenie baterii akumulatorów i superkondensatorów). Zbudowane stanowisko oraz opracowane strategie sterowania silnikami i rozplywem mocy pozwolą na zaprojektowanie i zbudowanie takiego napędu dla rzeczywistego autobusu. Autorzy konstruując stanowisko laboratoryjne mają na uwadze fakt, że proponowany hybrydowy układ napędowy powinien dać się zabudować w rzeczywistym autobusie bez poważnych ingerencji w strukturę istniejących rozwiązań. Dlatego też zdecydowano się na połączenie silnika elektrycznego ze spalinowym na wspólnym wale w taki sposób, że wirnik silnika z magnesami trwałymi jest fragmentem układu przeniesienia napędu (np. wału napędowego), a stojan jest przymocowany nieruchomo np. do ramy autobusu. Taka przebudowa autobusu na napęd hybrydowy powinna być konkurencyjna cenowo z modernizacją pojazdu, polegającą na zastosowaniu zasilania CNG.

3. Obliczenia trakcyjne autobusu

Do obliczeń parametrów stanowiska laboratoryjnego napędu hybrydowego przyjęto dane autobusu miejskiego typu JELCZ PR110. Takie autobusy są bowiem powszechnie użytkowane w aglomeracji śląskiej. Podobne do przedstawionych w artykule obliczenia, wykonano ponadto dla dwóch innych autobusów, a mianowicie Jelcza 80 oraz Autosana I9. Do modelu matematycznego autobusu można oczywiście także wykorzystać dane innych dowolnych autobusów.

Wybrane dane techniczne autobusu JELCZ przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

Dane autobusu przyjętego do obliczeń trakcyjnych

Masa całkowita	17 000 kg
Prędkość maksymalna	67 km/h
Silnik	SW 680
Moc silnika	136 kW/2200obr/min
Moment obrot.	705Nm/ 1400obr/min
Ogumienie	10.00 R20 16PR

Celem obliczeń trakcyjnych było wyznaczenie energii kinetycznej ruchu, charakterystyki przyspieszania autobusu oraz obliczenie czasu rozpędzania pojazdu. W pierwszej kolejności wyznaczono siły oporów ruchu autobusu (siły oporów toczenia, powietrza, bezwładności oraz wzniesienia). Dla obliczenia zastępczego momentu bezwładności autobusu na poszczególnych biegach, potrzebne są dane dotyczące momentów bezwładności poszczególnych części wirujących autobusu. Napotkano tutaj na ciekawy problem, gdyż w dostępnych materiałach występują dwa pojęcia, a mianowicie momentu bezwładności J i momentu zamachowego GD^2 . Taka niejednoznaczność może prowadzić do błędów w obliczeniach zwłaszcza, że jednostki w jakich mianuje się wymienione momenty (cm^2kg^2 , Nm^2 , kgm^2 lub kGm^2) wcale nie muszą sugerować, z którą z wielkości (J czy GD^2) mamy do czynienia.

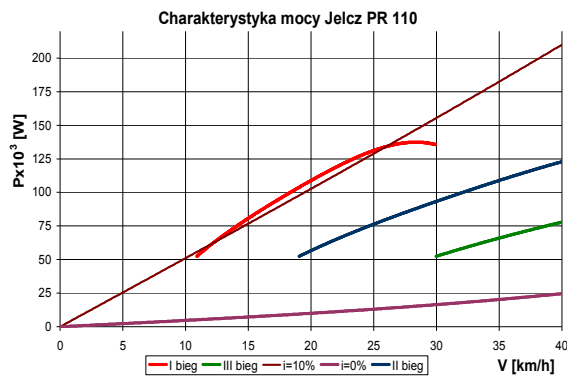
W wycofanym układzie jednostek MKS posługiwano się pojęciem momentu zamachowego, rozumianego jako iloczyn ciężaru G oraz kwadratu umownej średnicy bezwładności D . Moment bezwładności w układzie SI jest natomiast iloczynem kwadratu promienia r wirowania masy m wokół jej osi obrotu.

Dla przeliczenia obu wielkości stosuje się zależność:

$$GD^2 = 4gJ \quad (1)$$

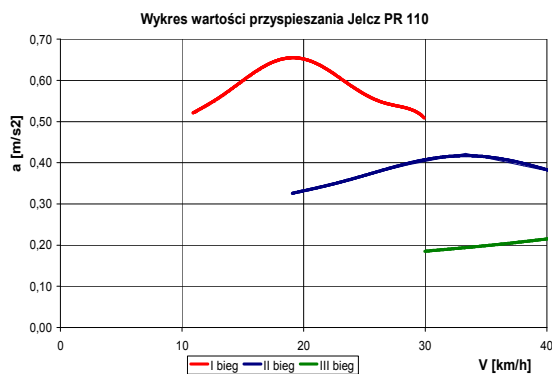
gdzie: g -przyspieszenie ziemskie

Zestawienie obliczonych mocy silnika JELCZA PR110 na poszczególnych biegach oraz oporów ruchu jazdy pokazano na rysunku 1.



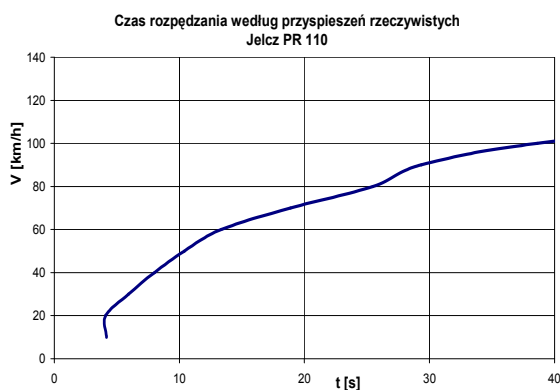
Rys. 1. Charakterystyka JELCZA PR110

Na rysunku 2 pokazano obliczone wartości przyspieszeń na poszczególnych biegach.



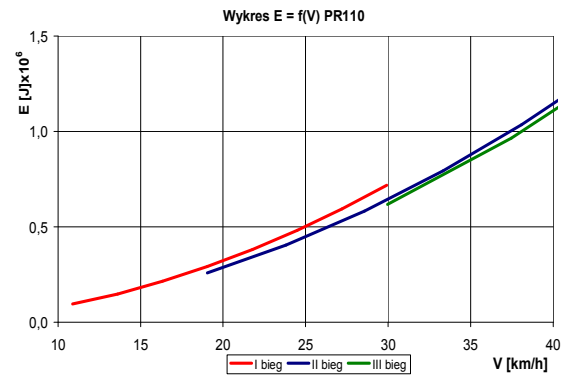
Rys. 2. Charakterystyka przyspieszeń na poszczególnych biegach JELCZA PR110.

Na rysunku 3 pokazano obliczony wykres rozpędzania autobusu.



Rys. 3. Charakterystyka rozpędzania autobusu JELCZ PR110

Na rysunku 4 pokazano wyliczoną energię kinetyczną poruszającego się autobusu (przeliczoną na wał silnika) uwzględniającą energię ruchu postępowego i obrotowego części wirujących.



Rys.4 Energia kinetyczna autobusu JELCZ PR110

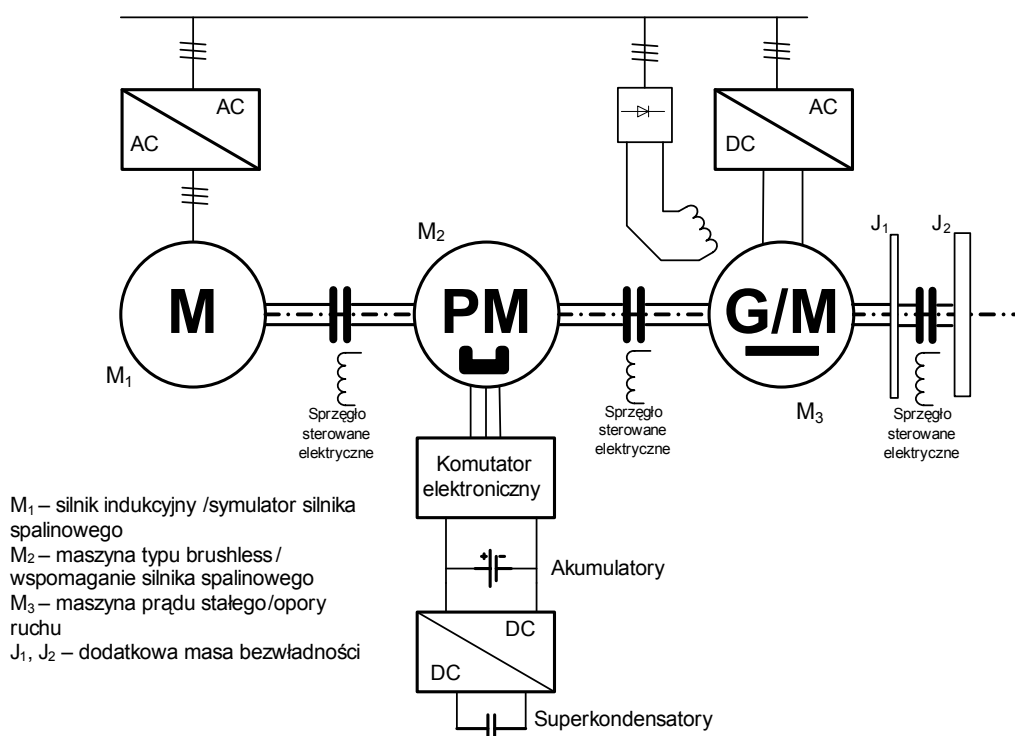
4. Obliczenie parametrów stanowiska laboratoryjnego

Stanowisko laboratoryjne napędu hybrydowego autobusu składa się z asynchronicznego silnika napędowego (symulującego silnik spalinowy), wspomagającego silnika z magnesami trwałymi, układu sprzęgieł oraz prądnicy prądu stałego symulującej opory ruchu pojazdu. Wszystkie maszyny połączone są na wspólnym wale, co pokazano na rysunku 5. Obliczona bezwładność maszyn elektrycznych oraz sprzęgieł w stanowisku wynosi $0,1 \text{ kgm}^2$. Aby odwzorować bezwładność autobusu na stanowisku laboratoryjnym niezbędne jest doposażenie go w układ bezwładnika. Zespół dodatkowej masy wirującej będzie symulował zarówno bezwładność w ruchu postępowym jak i obrotowym autobusu. Moment bezwładności krążka do stanowiska został tak dobrany aby zachować podobne czasy przyspieszania autobusu i głównego silnika napędowego w stanowisku. Obliczony moment bezwładności dodatkowego bezwładnika ($1,6 \text{ kgm}^2$), w zależności od promienia krążka oraz długości, przedstawiono w tabeli 2. Dodatkowo zamieszczono odpowiednie masy bezwładnika wykonanego z żeliwa.

Tabela 2.

Wymiary dodatkowego bezwładnika ($1,6 \text{ kgm}^2$) wykonanego z żeliwa

r [m]	l [m]	m [kg]
0,16	0,222035	125,00
0,18	0,138616	98,77
0,2	0,090946	80,00
0,22	0,062117	66,12
0,24	0,043859	55,56
0,26	0,031843	47,34
0,28	0,023674	40,82
0,3	0,017965	35,56

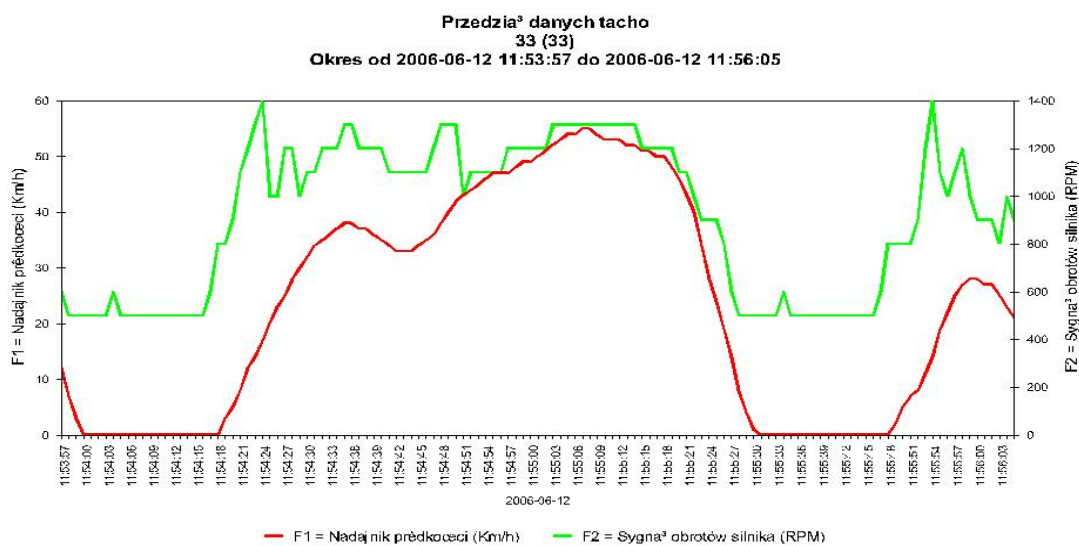


Rys.5. Stanowisko laboratoryjne hybrydowego układu napędowego

5. Pomiary parametrów jazdy autobusu

Parametry jazdy autobusu poruszającego się po terenie miasta Gliwice były rejestrowane przy pomocy istniejącego systemu monitorowania autobusów. System ten umożliwia pomiar prędkości obrotowej silnika i prędkości pojazdu oraz bezprzewodowy przesył danych do komputera centralnego.

Na podstawie przebiegów prędkości opracowany zostanie reprezentatywny cykl jazdy autobusu w terenie miejskim. Następnie takie cykle jazdy zadawane będą na stanowisku laboratoryjnym. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy przebieg prędkości autobusu i wału silnika podczas dwóch minut jazdy.



Rys. 6. Zarejestrowane przebiegi prędkości autobusu i prędkości obrotowej silnika

6. Zakończenie

Obecnie w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej i Informatyki trwają prace konstrukcyjne stanowiska. Obliczane są wymiary części podtrzymujących, łożysk itp. Dobierana jest pojemność układu superkondensatorów do odzysku energii hamowania oraz energii zużywanej na przyspieszanie autobusu. Aby dokładnie odwzorować zmianę biegów autobusu należałoby w stanowisku zastosować kilka kół zamachowych i dołączać je podczas wirowania silników za pomocą sprzęgieł elektromagnetycznych. Rozwiązanie takie jest jednak kosztowne i byłoby kłopotliwe w eksploatacji. Sprzęgła, które rozważano zastosować nie mogą pracować w poślizgu. Pociągałoby to za sobą konieczność wyposażenia każdego z kół zamachowych we własny silnik napędowy, który rozpędzałby bezwładnik do prędkości porównywalnej z aktualną prędkością wału silnika napędowego.

Praca wykonywana w ramach projektu badawczego nr N510 054 31/3358 pt. „*Hybrydowy napęd pojazdu miejskiego*” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

7. Literatura

- [1]. Dębicki M.: Teoria samochodu: teoria napędu, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1971
- [2]. Dobrzyński J., Lisowski T., Stecki A.: Szybkoobrotowe Silniki Wysokoprężne, Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego, Warszawa 1976
- [3]. Mitschke M.: Dynamika samochodu, WKŁ Warszawa 1977