

Model obliczeniowy uwzględnia przyjęcie następujących założeń dla danego pojazdu i warunków prowadzonych badań:

- masa pojazdu,
- współczynnik oporu toczenia,
- współczynnik kształtu,
- powierzchnia ściany przedniej,
- przyspieszenie grawitacyjne,
- gęstość powietrza,
- droga całkowita testu,
- sumaryczne straty wywołane ograniczoną sprawnością układu napędowego oraz poszczególnych komponentów pojazdu,
- współczynnik mas wirujących,
- szczegółowe parametry poszczególnych faz ruchu.

Model nie uwzględnia pracy urządzeń dodatkowych pojazdu, tj. między innymi klimatyzacja, ogrzewanie, nawiew, kasowniki, drzwi oraz system informacji pasażerskiej. Ponadto nie uwzględniony jest wpływ temperatury otoczenia [4,5,7].

Obliczenie oraz zestawienie przyjętych współczynników wykorzystywanych podczas badań symulacyjnych

Jednym z etapów przygotowania algorytmu obliczeniowego energochłonności ruchu pojazdów z napędem elektrycznym było obliczenie oraz zestawienie wszystkich niezbędnych przyjętych współczynników oraz danych technicznych pojazdów wykorzystywanych podczas badań symulacyjnych: trolejbusu Solaris Trollino 12S

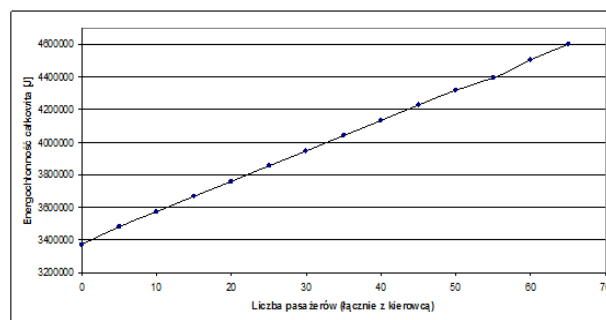
Tab. 1. Zestawienie przyjętych współczynników oraz podstawowych danych technicznych trolejbusu Solaris Trollino 12S

Parametr	Wartość
Masa własna pojazdu	11 600 kg
Masa trolejbusu przewożącego 15 pasażerów	12 620 kg
Masa trolejbusu przewożącego 30 pasażerów	13 640 kg
Masa trolejbusu przewożącego 45 pasażerów	14 660 kg
Masa trolejbusu przewożącego 60 pasażerów	15 680 kg
Dopuszczalna masa całkowita	18 000 kg
Współczynnik kształtu	0,6
Współczynnik oporu toczenia	0,015
Współczynnik mas wirujących	1,2
Oszacowane sumaryczne straty wywołane ograniczoną sprawnością układu napędowego	0,849
Powierzchnia ściany przedniej pojazdu	6 m ²

2. WYNIKI

Badanie wpływu liczby przewożonych pasażerów na energochłonność ruchu trolejbusu

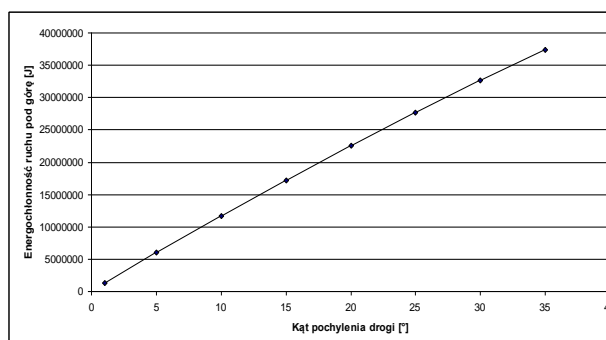
Pierwszą częścią badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelu symulacyjnego było zbadanie teoretycznej zależności pomiędzy ilością przewożonych pasażerów, a wartością energochłonności całkowitej, jednostkowej oraz przebiegowej ruchu dla trolejbusu Solaris Trollino 12S pokonującego test jezdny o parametrach zbliżonych do panujących w miastach średniej wielkości. Do badań przyjęto średnią masę przewożonego pasażera równą 68 kg. W celu wyznaczenia wpływu napełnienia na energochłonność ruchu trolejbusu wyznaczone zostało zbiorcze zestawienie masy pojazdu w zależności od napełnienia. Przy użyciu modelu symulacyjnego uzyskano wyniki teoretycznego wpływu napełnienia trolejbusu na wartość energochłonności (rys. 2)



Rys. 2. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością energochłonności całkowitej, a liczbą przewożonych pasażerów dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S

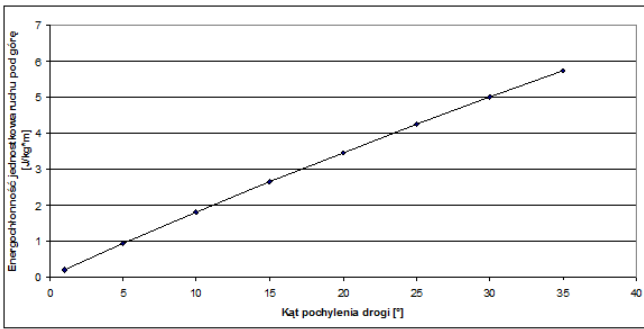
Badanie teoretycznego wpływu kąta wzdłużnego pochylenia drogi na energochłonność całkowitą, jednostkową oraz przebiegową ruchu w przypadku jazdy pod górę

Kolejna część badań teoretycznych obejmowała analizę wpływu kąta wzdłużnego pochylenia drogi na energochłonność całkowitą, jednostkową oraz przebiegową w przypadku jazdy pod górę. Ponadto zbadany został wpływ kąta wzdłużnego pochylenia drogi na wartość sił hamujących przeciwdziałających zwiększeniu prędkości pojazdu oraz na ilość energii rozproszonej podczas hamowania w fazie zjazdu po odcinku o różnym kącie pochylenia wzdłużnego jezdni. Do modelu obliczeniowego podstawione zostały podstawowe dane techniczne trolejbusu typu Solaris Trollino 12S. W celu odzwierciedlenia rzeczywistych warunków eksploatacji w ruchu miejskim podczas badań przyjęto, że badany trolejbus obciążony jest masą kierowcy oraz 20 pasażerów. Do badań przyjęto średnią masę przewożonego pasażera równą 68 kg. Badania zostały wykonane dla dwóch prędkości jazdy trolejbusu - 30 km/h oraz 60 km/h. Długość odcinka pomiarowego wynosi 500 metrów. Przy użyciu modelu obliczeniowego uzyskano wyniki teoretycznego wpływu kąta wzdłużnego pochylenia jezdni na wartość energochłonności w przypadku ruchu po odcinkach o stałej długości, zostały one zaprezentowane na rysunkach 3 i 4,5.

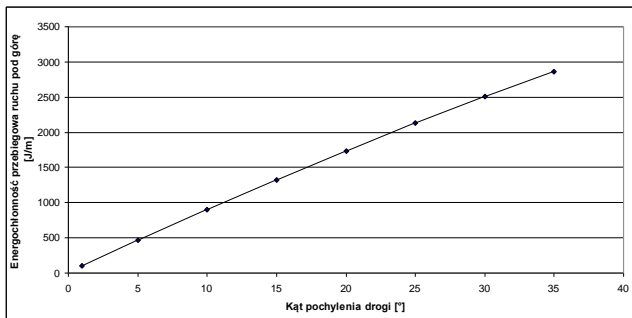


Rys. 3. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością energochłonności ruchu pod górę, a kątem wzdłużnego pochylenia jezdni w przypadku ruchu ze stałą prędkością równą 30 km/h po odcinku o stałej długości dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S

Na podstawie analizy otrzymanych wyników można wywnioskować, iż energochłonność całkowita, jednostkowa oraz przebiegowa w przypadku jazdy po odcinku o stałej długości pod górę zwiększa się liniowo wraz ze wzrostem kąta wzdłużnego pochylenia jezdni.



Rys. 4. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością energochłonności jednostkowej ruchu pod górę, a kątem wzdłużnego pochylenia jezdni w przypadku ruchu ze stałą prędkością równą 30 km/h po odcinku o stałej długości dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S

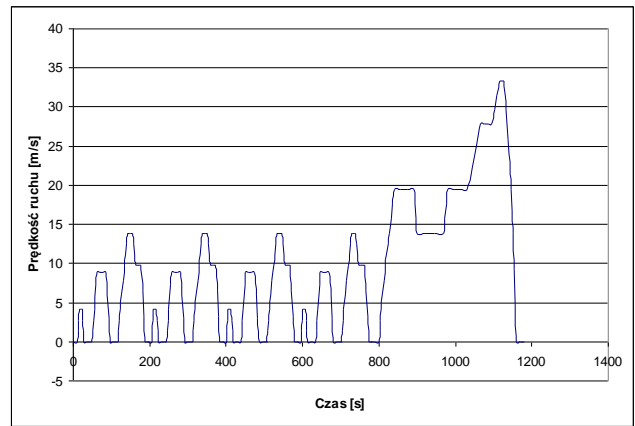


Rys. 5. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością energochłonności przebiegowej ruchu pod górę, a kątem wzdłużnego pochylenia jezdni w przypadku ruchu ze stałą prędkością równą 30 km/h po odcinku o stałej długości dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S

Energochłonność trolejbusu realizującego test jezdny

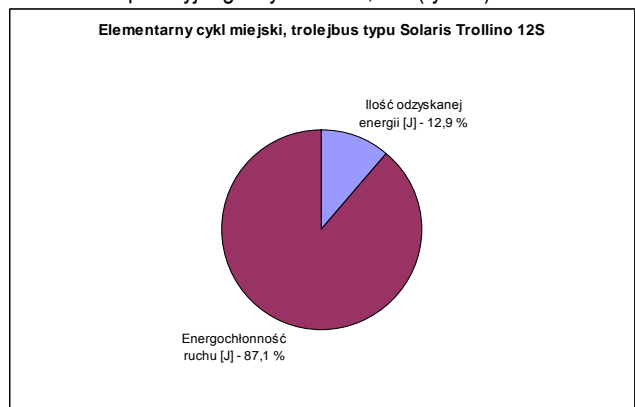
Celem kolejnej części badań symulacyjnych było uzyskanie teoretycznych przebiegów zużycia energii dla trolejbusu realizującego test jezdny zawarty w normie PN-EN1986-1:2011. Do modelu obliczeniowego podstawione zostały podstawowe dane techniczne dla trolejbusu Solaris Trollino 12S. W celu odzwierciedlenia rzeczywistych warunków eksploatacji w ruchu miejskim podczas badań przyjęto, że badany trolejbus obciążony jest masą kierowcy oraz 20 pasażerów. Zgodnie z założeniami modelu obliczania energochłonności bazującego na równaniach kinematycznych oddzielnie rozpatrywany był każdy rodzaj ruchu, tj. przyspieszanie, ruch ustalony oraz hamowanie. Jako, że napęd elektryczny umożliwia proces odzysku energii podczas hamowania rekuperacyjnego uwzględniono również przebiegi wartości odzysku energii [8,9,10].

Na podstawie otrzymanych wyników utworzone zostały teoretyczne przebiegi czasowe energochłonności ruchu, energochłonności przebiegowej, energochłonności jednostkowej oraz odzysku energii. Profil prędkości elementarnego cyklu miejskiego złożonego z czterech cykli miejskich przedstawia rysunek 6.

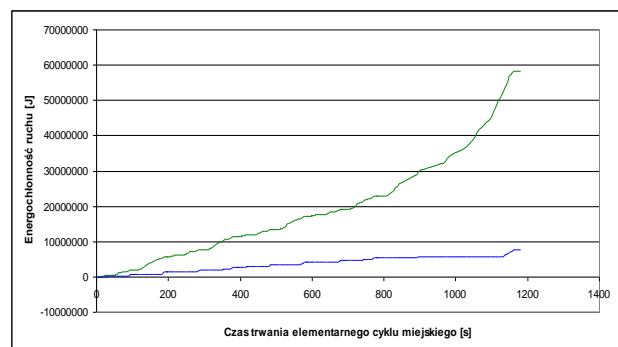


Rys. 6. Profil prędkości przyjętego elementarnego cyklu miejskiego

Podczas pokonywania elementarnego cyklu miejskiego dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S energia odzyskana podczas hamowania rekuperacyjnego wynosiła 12,9 % (rys. 7.).



Rys. 7. Wykres porównujący energochłonność ruchu oraz ilość odzyskanej energii podczas hamowania rekuperacyjnego dla trolejbusu Solaris Trollino 12S realizującego elementarny cykl miejski



Rys. 8. Przebieg czasowy energochłonności ruchu (kolor zielony) oraz ilości odzyskanej energii w czasie hamowania odzyskowego (kolor niebieski) dla trolejbusu Solaris Trollino 12S realizującego elementarny cykl miejski

Na podstawie powyższych wykresów można wywnioskować, iż na wartość odzyskanej energii w czasie hamowania rekuperacyjnego największy wpływ ma intensywność hamowania oraz prędkość początkowa pojazdu.

WNIOSKI

Na podstawie analizy otrzymanych wyników badań można wywnioskować, iż na wartość odzyskanej energii w czasie fazy hamowania rekuperacyjnego największy wpływ ma masa całkowita pojazdu, intensywność fazy hamowania oraz prędkość początkowa fazy hamowania.

Zależność pomiędzy wartością energochłonności całkowitej ruchu pojazdu elektrycznego, a wartością kąta wzdłużnego pochylenia jezdni jest zbliżona do liniowej. Energochłonność całkowita ruchu trolejbusu w przypadku ruchu po odcinku o kącie wzdłużnego pochylenia jezdni większym od 0° wzrasta liniowo wraz ze wzrostem ilości przewożonych pasażerów.

BIBLIOGRAFIA

1. Bartłomiejczyk M. Połom M.: Przechylenie aspekty efektywności hamowania odzyskowego w komunikacji trolejbusowej, Logistyka 6/2013.
2. Bartłomiejczyk M. Połom M.: Trolejbusy z bateryjnym źródłem zasilania – doświadczenia eksploatacyjne i koncepcja liniowego zastosowania w Gdyni, Technika Transportu Szynowego 5-6/2011.
3. Bartłomiejczyk M. Połom M.: Wpływ przestrzennego zróżnicowania systemu zasilania sieci trakcyjnej na energochłonność komunikacji trolejbusowej. Aspekty planistyczno-ekonomiczne, Logistyka 6/2013.
4. Chłopek Z.: Badanie zużycia energii przez samochód elektryczny, Archiwum Motoryzacji 3/2012.
5. Chłopek Z.: Badania zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach symulujących jazdę w mieście, Eksploatacja i Niezawodność 15/2013.
6. Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o.: Realizacja metodyki SORT pomiaru zużycia paliwa autobusów, Dostęp on-line: 2017/10/10.
7. Merkiś J. Molik P. Nowak M. Ziółkowski A.: Cykle jezdne pojazdów komunikacji miejskiej na przykładzie aglomeracji poznańskiej, Logistyka 3/2012.
8. Siemionek E.: Analiza energochłonności ruchu trolejbusów, ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH JOURNAL - 2013, nr 18, vol. 7, s. 81-84.
9. Siemionek E. Dziubiński M.: Testing energy consumption in the trolleybus and the bus on a chosen public transport line in Lublin, ADVANCES IN SCIENCE AND TECHNOLOGY RESEARCH JOURNAL - 2015, nr 26, vol. 9, s. 152-153.
10. Siłka W. Analiza wpływu parametrów cyklu jezdnego na energochłonność ruchu samochodu, Zeszyt 14 Monografia 2 PAN oddział Kraków 1998.

Analysis and simulation of trolleybus energy consumption

Contemporary electrically powered trolley buses allow for regenerative braking, with the recuperation of electricity to supercapacitors, batteries or traction lines. The study of the used trolleybuses is carried out on the basis of the road cycles characteristic of this group of vehicles. During the research, apart from energy consumption, Vehicle range and capacity for battery power. The paper presents the results of simulated tests and analysis of the influence of the number of passengers transported and the longitudinal inclination of the roadway on the total energy consumption for Solaris Trollino 12S trolleybus.

Autorzy:

mgr inż. **Ewa Siemionek** – Politechnika Lubelska,
dr inż. **Mieczysław Dziubiński** – Politechnika Lubelska,
dr inż. **Marek Adamiec** – Politechnika Lubelska,
mgr inż. **Sławomir Kołodziej** – Politechnika Lubelska.