



Ewa Siemionek

Energochłonność pojazdów z napędem elektrycznym



MONOGRAFIE

Serdeczne podziękowania dla Świętej Pamięci Pana Profesora Piotra Tarkowskiego za ukierunkowanie i wskazanie obszaru prowadzonych badań oraz dla recenzentów monografii Pana Profesora Wincentego Lotko oraz Profesora Politechniki Lubelskiej Rafała Longwica. Ponadto podziękowania kieruję do wszystkich, którzy przekazali mi cenne i życzliwe uwagi merytoryczne w procesie tworzenia monografii, w szczególności do Pana Profesora Mirosława Wendekera oraz Mieczysława Dziubińskiego. Serdecznie podziękowania należą się pracownikom przedsiębiorstwa MPK Lublin, URSUS Sp. z o. o. oraz Politechniki Lubelskiej, zaangażowanym w prowadzone badania energochłonności trolejbusów i autobusów: Panu dr hab. inż. Jackowi Huniczowi, dr inż. Piotrowi Filipek, dr inż. Krzysztofowi Kolano, mgr inż. Piotrowi Hołyszko, mgr inż. Dariuszowi Kasperk, mgr inż. Kazimierzowi Furtakowi. Serdeczne podziękowania kieruję również do wszystkich dyplomantów, którzy pod moim kierunkiem realizowali swoje prace magisterskie i inżynierskie z tematyki zawartej w monografii oraz uczestniczyli w prowadzonych badaniach naukowych. Wydanie monografii nie byłoby możliwe bez wielkiego wsparcia członków mojej rodziny, którym z całego serca dziękuję.

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Ewa Siemionek

Energochłonność pojazdów z napędem elektrycznym



Wydawnictwo
Politechniki Lubelskiej

Lublin 2021

Recenzeci:

dr hab. inż. Rafał Longwic, prof. uczelni, Politechnika Lubelska
prof. dr hab. inż. Wincenty Lotko, UTH w Radomiu

Wydanie monografii zostało sfinansowane z Projektu Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego na podstawie umowy nr 030/RID/2018/19

Monografia powstała na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Metoda oceny energochłonności ruchu pojazdu z napędem elektrycznym” napisanej pod kierunkiem prof. dr hab. Inż. Piotra Tarkowskiego, która została obroniona w roku 2019 na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2021

ISBN: 978-83-7947-500-1

Wydawca: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
www.biblioteka.pollub.pl/wydawnictwa
ul. Nadbystrzycka 36C, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59

Druk: Soft Vision Mariusz Rajski
www.printone.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl
Książka udostępniona jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa – na tych samych warunkach 4.0 Międzynarodowe (CC BY-SA 4.0)
Nakład: 50 egz.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	7
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI	9
WPROWADZENIE	11
1. STAN WIEDZY	13
1.1. Elektryczne układy napędowe.....	15
1.2. Energochłonność ruchu.....	22
1.3. Bilans energetyczny	28
1.4. Metody oceny efektywności energetycznej pojazdu	28
1.4.1. Sprawność eksploatacyjna pojazdu	28
1.4.2. Przebiegowe zużycie energii	29
1.5. Metody identyfikacji warunków eksploatacji pojazdu	29
1.5.1. Profil prędkości pojazdu	29
1.5.2. Założona trasa przejazdu	34
1.5.3. Średnia prędkość jazdy.....	34
1.5.4. Moc dostarczona do kół napędowych	34
1.5.5. Energochłonność przebiegowa i jednostkowa	34
1.6. Podsumowanie stanu wiedzy	35
2. MODEL TEORETYCZNY ENERGOCHŁONOŚCI RUCHU POJAZDU.....	36
2.1. Budowa oraz istota uproszczonego modelu matematycznego energochłonności autobusu elektrycznego	36
2.2. Model symulacyjny zmian energochłonności autobusu	41
2.3. Model symulacyjny energochłonności autobusu elektrycznego dla zmiennego obciążenia	43
2.4. Symulacja zasięgu autobusu elektrycznego dla testów SORT	45
2.5. Algorytm realizujący obliczenia energochłonności oraz zasięgu autobusu w programie MATLAB Simulink	48

2.6. Model matematyczny energochłonności dla trzech faz ruchu	53
2.7. Algorytm realizujący obliczenia energochłonności trolejbusu w programie MATLAB Simulink dla testów SORT.....	56
2.8. Model symulacyjny energochłonności trolejbusu dla zmiennego obciążenia	62
2.9. Wyznaczenie energochłonności trolejbusów realizujących test jezdny według normy PN-EN 1986-1:2001.....	67
2.10. Określenie wpływu kąta wzdłużnego pochylenia drogi na energochłonność całkowitą, jednostkową oraz przebiegową	75
2.11. Podsumowanie modelu teoretycznego energochłonności ruchu	79
3. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELU TEORETYCZNEGO ENERGOCHŁONNOŚCI	80
3.1. Charakterystyka obiektów badań	80
3.2. Wyznaczenie charakterystyki średniej prędkości autobusu Ursus EkoVolt	85
3.3. Metodyka badań trolejbusu URSUS T7016	90
3.4. Metodyka badań trolejbusu Solaris Trollino 18M.....	95
3.5. Wyznaczenie energochłonności dla trolejbusów Solaris Trollino 12S,18M oraz autobusu elektrycznego E70110	99
3.6 . Metodyka badań SORT	114
3.7. Podsumowanie	118
4. OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ	119
5. WNIOSKI KOŃCOWE	124
BIBLIOGRAFIA.....	126

ENERGOCHŁONNOŚĆ RUCHU POJAZDÓW Z NAPĘDEM ELEKTRYCZNYM

Streszczenie

W monografii przeanalizowano współczesną literaturę poświęconą zagadnieniom energochłonności pojazdów z napędem elektrycznym podczas ich eksploatacji. Przedstawiono nową metodę oceny energochłonności ruchu dla rzeczywistych warunków eksploatacji pojazdu z napędem elektrycznym. Zaprezentowano definicje dotyczące analizowanego zagadnienia. Przedstawiono metodykę i wyniki badań własnych dotyczących energochłonności dla wybranych typów pojazdu w warunkach ich eksploatacji. Opracowano model obliczeniowy umożliwiający przeprowadzenie symulacji energochłonności autobusów elektrycznych, trolejbusów dla testów SORT 1, SORT2, SORT3 oraz wyznaczenie zasięgu autobusu elektrycznego dla założonych warunków eksploatacji. Doświadczalnie zweryfikowano oraz uzasadniono autorski model oceny energochłonności ruchu dla autobusu elektrycznego realizującego test jezdny według metody SORT 2.

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, energochłonność ruchu, autobus elektryczny, trolejbus.

THE ENERGY INTENSITY OF ELECTRIC VEHICLE TRAFFIC

Abstract

This monography provides an overview of the up-to-date literature devoted to the problem of operational energy consumption in electric vehicles. A new method for estimating the energy consumption of an electric vehicle in real operating conditions is proposed. Definitions pertaining to the analyzed problem are presented. Methods employed in the study are described and the results of the author's own research on the energy consumption of selected vehicle types in operating conditions are reported. A computational model is proposed for both the simulation of energy consumption of electric buses and trolleybuses for SORT 1, SORT2, SORT3 and the determination of a range of an electric bus for the assumed operating conditions. The proposed energy consumption estimation model is verified in experimental tests of an electric bus for a driving cycle performed in compliance with SORT 2.

Keywords: electric vehicle, energy consumption, electric bus, trolleybus.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I SYMBOLI

Oznaczenie	Jednostka	Opis
α	[°]	kąt nachylenia drogi
δ	[%]	błąd względny
f_t	[-]	współczynnik oporu toczenia
ρ_p	[kg/m ³]	gęstość powietrza
a	[m/s ²]	Przyspieszenie
A_t	[m ²]	współczynnik powierzchni czołowej
Q_{ak}	[Ah]	pojemność baterii
Q_{min}	[%]	dopuszczalny poziom rozładowania baterii
C_x	[-]	współczynnik czołowego oporu aerodynamicznego
d	[m]	długość pojazdu
E_{ak}	[kWh]	energia baterii
F_b	[N]	siła oporu bezwładności
F_c	[N]	wypadkowa siła oporów
F_p	[N]	siła oporu powietrza (aerodynamicznego)
F_t	[N]	siła oporu toczenia
F_w	[N]	siła oporu wzniesienia
g	[m/s ²]	przyspieszenie ziemskie
i	[-]	przełożenie całkowite przekładni
I_{ak}	[A]	prąd pobierany z baterii
L_{ckl}	[-]	maksymalna liczba cykli ładowania
m_p	[kg]	masa pasażerów
m_w	[kg]	masa własna pojazdu
P_{ak}	[W]	moc pobierana przez silnik z akumulatora
P_k	[W]	moc na kołach potrzebna do poruszania pojazdu
sz	[m]	szerokość pojazdu
η_h	[%]	sprawność odzysku energii z hamowania

Oznaczenie	Jednostka	Opis
η_p	[%]	sprawność przekładni
η_s	[%]	sprawność silnika
t	[s]	czas
U_{ak}	[V]	napięcie baterii
V	[km/h], [m/s]	prędkość
w	[m]	wysokość pojazdu
Z_d	[kWh/km]	kilometrowe zużycie energii przez urządzenia dodatkowe
Z_s	[kWh/km]	kilometrowe zużycie energii dla samego ruchu
Z_{sc}	[kWh/km]	całkowite kilometrowe zużycie energii
Z_t	[kWh/h]	godzinowe zużycie energii dla samego ruchu
Z_{tc}	[kWh/h]	całkowite godzinowe zużycie energii
$\dot{Z}_s$	km	kilometrowa żywotność baterii
$\dot{Z}_t$	h	godzinowa żywotność baterii

WPROWADZENIE

Pierwsze pojazdy elektryczne zostały zastosowane w XVIII wieku. Jednak ograniczony ich zasięg spowodował większe zainteresowanie pojazdami o napędzie spalinowym. Wzrost zanieczyszczenia środowiska naturalnego spowodowany zwiększeniem emisji spalin przez eksploatację środków transportu oraz wzrost świadomości proekologicznej ludności zainicjowały poszukiwanie bardziej ekologicznych rozwiązań. Zintensyfikowano prace mające na celu wytwarzanie źródeł zasilania oraz magazynowania energii w oparciu o najnowsze technologie i materiały, umożliwiając szersze zastosowanie napędu elektrycznego w pojazdach samochodowych. Współczesny pojazd samochodowy o napędzie elektrycznym jest złożonym urządzeniem technicznym, w skład którego wchodzi podzespoły elektryczne, mechaniczne oraz elektroniczne [97, 98].

Zastosowanie napędu elektrycznego zamiast tradycyjnego spalinowego powoduje brak emisji spalin podczas jego eksploatacji. Pojazd charakteryzuje się wówczas płynną oraz cichą pracą, lepszą zdolnością do pokonywania wzniesień oraz stosunkowo długim czasem eksploatacji. Czynnikiem ograniczającym charakterystyki eksploatacyjne pojazdów samochodowych o napędzie elektrycznym jest konieczność zastosowania źródła energii w postaci baterii akumulatorowych o ograniczonym zasięgu. Stąd też samochody o napędzie elektrycznym są wykorzystywane głównie w ruchu miejskim [97, 135].

Zakorkowanie dużych aglomeracji przyczyniające się do wzrostu emisji spalin na ich terenie, jest jednym z głównych problemów do rozwiązania w metropoliach na całym świecie. Obecnie można zaobserwować zmianę kierunku rozwoju w stronę rozwiązań bardziej przyjaznych środowisku. Na uwagę zasługuje wdrożenie systemu zasilania pociągów holenderskich kolei państwowych energią wytworzoną wyłącznie w elektrowniach wiatrowych [141]. Zaobserwować można coraz większe wykorzystanie w komunikacji miejskiej pojazdów zasilanych energią elektryczną, gdyż ochrona środowiska staje się obecnie kluczowym aspektem dla transportu publicznego. Autobusy elektryczne są znacznie droższe od konwencjonalnych z silnikiem diesla, lecz w trakcie eksploatacji zdają się być bardziej oszczędne. Celowe jest dokładne przeanalizowanie dostępnych rozwiązań i wybór takiego, które w perspektywie czasu okaże się najbardziej korzystne [93, 95, 97, 134, 136, 141].

W pracy przedstawiono wyniki prowadzonych prac badawczych związanych z oceną energochłonności ruchu pojazdu z napędem elektrycznym na przykładzie środków komunikacji miejskiej: autobusu elektrycznego wyprodukowanego przez firmę Ursus Bus S.A. oraz trolejbusów eksploatowanych przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Lublinie. Analiza literatury i stanu wiedzy ukierunkowana była w oparciu o dwa wybrane rodzaje środków transportu.

Analiza teoretyczna zagadnienia energochłonności pozwoliła na opracowanie modelu matematycznego, dzięki któremu po uwzględnieniu odpowiednich założeń możliwe jest przeprowadzenie symulacji energochłonności dowolnego

pojazdu z napędem elektrycznym. Na podstawie modelu matematycznego, przeprowadzonych symulacji dla testu SORT 2, wyników badań empirycznych oraz weryfikacji modelu obliczeniowego opracowano metodę oceny energochłonności. Sporządzono zestawienie porównujące środki transportu miejskiego stosowane obecnie: autobusy spalinowe, trolejbusy oraz autobusy elektryczne zasilane akumulatorami. Zaletą autobusów spalinowych jest ich niezależność, której nie mają trolejbusy zasilane z sieci trakcyjnej. Zaletą stosowania trolejbusów jest ograniczenie emisji szkodliwych substancji do otoczenia oraz mniejsze koszty ich eksploatacji. Autobus w pełni elektryczny wyposażony w baterie łączy zalety obu powyższych rozwiązań [49].

1. STAN WIEDZY

Własnością energetyczną pojazdu bezpośrednio wpływającą na koszt eksploatacji jest zużycie energii elektrycznej lub paliwa. Zużycie energii zależy w głównej mierze od energochłonności ruchu stanowiącej zgodnie z definicją wydatek energii doprowadzonej do kół napędzanych w celu realizacji ruchu według określonego profilu prędkości.

Analiza dostępnych publikacji z zakresu rozpatrywanego zagadnienia wskazuje, że autorzy zajmowali się z reguły energochłonnością pojazdów z napędem spalinowym. W publikacjach [30, 115–121] przedstawiono model obliczeniowy energochłonności, oporów ruchu oraz bilansu energetycznego pojazdu. Zaprezentowane w pracach [115–121] parametry energochłonności jednostkowej oraz przebiegowej wykorzystano w pracach badawczych dotyczących oceny efektywności energetycznej pojazdów samochodowych z silnikami spalinowymi [78].

Zagadnieniem energochłonności pojazdów wyposażonych w napęd elektryczny zajmowali się następujący autorzy: Zdzisław Chłopek, Tadeusz Rudnicki, Piotr Tarkowski, Mieczysław Dziubiński. Tematyka publikacji Chłopka [23–26] dotyczy badań samochodu elektrycznego Zilent Courant w warunkach odpowiadających rzeczywistej eksploatacji, wyznaczenie drogowego zużycia energii oraz sprawności ogólnej pojazdu. Analizę kosztów eksploatacji pojazdów elektrycznych przedstawiono w publikacjach [102, 103], w których zestawiono podstawowe wady oraz zalety wraz z algorytmem obliczeniowym zasięgu pojazdu elektrycznego. Tematyka energochłonności pojazdu wyposażonego w napęd elektryczny i dyskusja bilansu energetycznego ruchu pojazdu przedstawiona została w publikacji [127].

Zagadnieniem komunikacji trolejbusowej w Polsce zajmowali się następujący autorzy: Jacek Pudło [99], Mikołaj Bartłomiejczyk [7–15], Marcin Połom [96]. Perspektywy wykorzystania trolejbusów hybrydowych w lubelskiej komunikacji miejskiej oraz przegląd rozwiązań sterowania układem napędowym stosowanych w innych miastach europejskich przedstawiono w publikacjach [83, 84, 113, 114].

Stosowane obecnie napędy trakcyjne umożliwiają przeprowadzenie procesu hamowania odzyskowego z rekuperacją energii do sieci trakcyjnej, bądź zasobników magazynujących energię. Przyczynia się to znacznie do ograniczenia zużycia energii elektrycznej przez pojazdy komunikacji miejskiej wyposażone w napęd elektryczny [13, 15, 50]. Zagadnieniem badania procesu hamowania odzyskowego zajmowali się następujący autorzy: Bartłomiejczyk, Połom [8], Stefan Hamacek [57], Witold Kobos [72]. Autorzy publikacji [8, 10] zbadali wpływ struktury układu zasilania na efektywność procesu rekuperacji i ocenili stopień jego wykorzystania w gdyńskiej komunikacji miejskiej. Głównym zagadnieniem wyżej wymienionej publikacji było opisanie założeń konstrukcyjnych oraz doświadczeń z dwuletniej eksploatacji trolejbusu wyposażonego w zasobniki superkondensatorowe. Opisane zostały związki sumarycznych strat wywołanych ograniczoną sprawnością

falownika, silnika, przekładni. Analizowano proces hamowania odzyskowego oraz zasadę działania zasobnika kondensatorowego.

Energochłonność tramwaju przedstawiono w opracowaniu Marcina Jędryczka [68], który przeprowadził doświadczalne badanie zużycia energii przez napędy tramwajowe z silnikami szeregowymi prądu stałego dla dwóch rodzajów tego typu pojazdów różniących się sposobem rozruchu (rezystancyjny i impulsowy). Pomiary energochłonności zrealizowano poprzez pomiar całkowitego prądu i napięcia pojazdu oraz jego prędkości. Po czterech tygodniach testów wyznaczona energochłonność wynosiła 2,1 kWh/km dla starszej konstrukcji tramwaju oraz 1,7 kWh/km dla wersji zmodernizowanej [100, 101].

Bartłomiejczyk i Połom w licznych artykułach przedstawiają wyniki badań wpływu struktury przestrzennej układu zasilania na energochłonność trakcji miejskiej. W badaniach uwzględniono rekuperację energii z hamowania, starty przesyłowe oraz aspekty planistyczno-ekonomiczne, a także wpływ temperatury na energochłonność elektrycznego transportu miejskiego oraz napięcia sieci trakcyjnej jako wyznacznika możliwości zwiększenia odzysku energii. W publikacjach opisano zastosowanie autonomicznego źródła energii oraz napędu alternatywnego w komunikacji trolejbusowej.

Tematyką badań energochłonności pojazdów komunikacji miejskiej zajmowali się następujący autorzy: Ramazan Ayaz, Ali Durusu, Hakan Akca [5], Chłopek [23–26], Arkadiusz Małek, Jacek Hunicz [85], Jerzy Ostaszewicz [94], Dziubiński [44, 46, 111, 114] oraz Sun Feng-chun, Bin Liu, Wang Zhen-po [123]. Autorzy publikacji [5] porównywali energochłonność oraz emisję dwutlenku węgla komunikacji autobusowej oraz trolejbusowej w warunkach symulacyjnych. Badania przeprowadzono w mieście Istanbuł. W publikacji [25] przedstawiona została procedura obliczania zużycia paliwa oraz gazu ziemnego przez autobusy komunikacji miejskiej w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Do badań wykorzystano cykle jezdne SORT oraz opracowano test jezdny MZA. Głównym zagadnieniem publikacji [94] było przedstawienie problemów związanych z energią i jej zużyciem przez transport. Określono zależności między jednostkowym zużyciem energii, a obciążeniem pojazdu, odległością międzyprzystankową, prędkością pojazdu oraz analizowano możliwości zmniejszenia zużycia energii przez pojazdy komunikacji miejskiej. Tematyką prac [108, 109] była analiza energochłonności ruchu trolejbusu w warunkach rzeczywistej eksploatacji. W celu wykonania badań został opracowany test jezdny MPKPL uwzględniający warunki określone na podstawie badań porównawczych autobusu oraz trolejbusu dla wybranej linii komunikacji miejskiej w Lublinie. Podczas badania rejestrowane były rzeczywiste wartości napięcia oraz natężenia prądu zasilającego trolejbus typu Trollino 12S oraz aktualna prędkość. Na podstawie zarejestrowanych wyników opracowano przebieg zmian wartości energochłonności ruchu w czasie [20, 21, 27, 28, 131].

Przeprowadzeniem testów jezdnych, symulujących warunki ruchu miejskiego, podmiejskiego i drogowego, które są charakterystyczne dla danego regionu zajmują się następujące jednostki badawcze oraz autorzy: Instytut Badań i Rozwoju

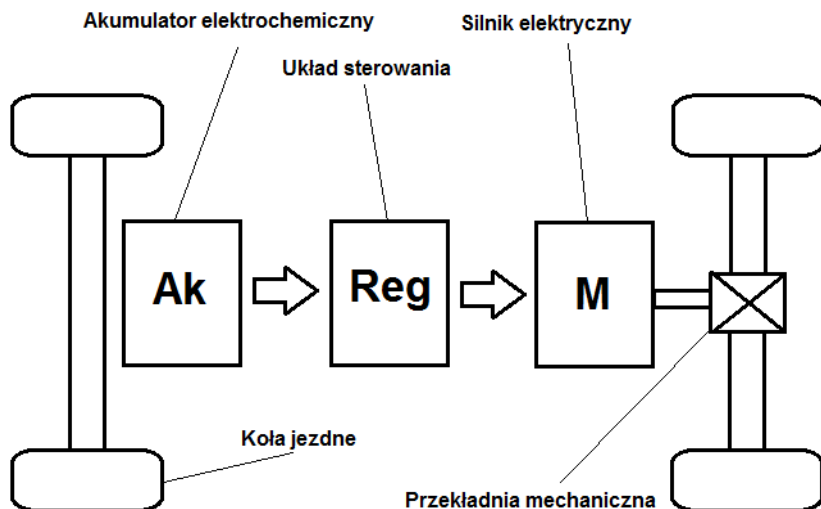
Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. [137], Jerzy Merkisz [88, 89], Piotr Molik, Mateusz Nowak, Andrzej Ziółkowski [88] oraz *Union Internationale des Transports Publics* (UITP). Głównym zagadnieniem poruszonym przez Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. jest przedstawienie procedury realizacji metodyki pomiaru zużycia paliwa przez autobusy komunikacji miejskiej z użyciem testów SORT. W testach SORT przedstawiono podstawowe wymagania podczas pomiaru zużycia paliwa zgodnie z wyżej wymienionym testem oraz charakterystykę używanych urządzeń pomiarowych. W publikacji [89] autorzy przedstawili wybrane rodzaje cykli jezdnych pojazdów komunikacji publicznej, w tym testy SORT oraz test Braunschweig Cycle. Testy jezdne SORT i e-SORT symulujące warunki ruchu w dużym mieście, przeciętnym mieście oraz na przedmieściach większych miast zostały opracowane przez UITP w celu ujednolicenia procedur związanych z pomiarem przebiegowego zużycia energii lub paliwa dla pojazdów komunikacji publicznej [137]. W publikacji Piotra Bielaczycy [18] opisano metodę pomiaru emisji w warunkach rzeczywistej jazdy pojazdu na drodze RDE (*Real Driving Emissions*), a także nowo wprowadzany cykl jezdny na hamowni podwoziowej WLTC (*Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles*) według procedury WLTP (*Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedures*) opisanej w regulaminie EKG ONZ GTR 15.

Badania napędów elektrycznych, w tym autobusów o zasilaniu bateryjnym, przedstawiono w pracach Merkisz. Publikacje autora obejmują przegląd i porównanie dostępnych rodzajów akumulatorów (kinetycznych, hydropneumatycznych i elektrochemicznych) w odniesieniu do zasięgu jaki można osiągnąć poprzez ich zastosowanie w miejskich autobusach [87–90].

Analiza literatury wykazała brak kompleksowego ujęcia zagadnienia dotyczącego oceny energochłonności ruchu pojazdu z napędem elektrycznym.

1.1. Elektryczne układy napędowe

Podstawowy zespół napędowy pojazdu o napędzie elektrycznym (rys. 1.1., patrz na s. 16.) składa się z następujących podzespołów: układu sterowania, akumulatora elektrochemicznego, silnika elektrycznego, przekładni mechanicznej oraz kół jezdnych.



Rys. 1.1. Schemat blokowy układu napędowego pojazdu wyposażonego w napęd elektryczny

Do podstawowych parametrów eksploatacyjnych współczesnych pojazdów o napędzie elektrycznym należą:

- zasięg,
- przyspieszenie,
- zdolność do pokonywania wzniesień,
- prędkość maksymalna,
- zużycie energii,
- czas ładowania akumulatorów,
- trwałość podzespołów mechanicznych, elektrycznych i elektronicznych.

Dla oceny trakcyjnych pojazdów o napędzie elektrycznym zostały określone warunki ich eksploatacji w trakcie badań. Badania pojazdów elektrycznych prowadzone są na podstawie cykli jezdnych charakterystycznych dla wybranej grupy pojazdów. Podczas badań poza energochłonnością oceniany jest zasięg pojazdu, którego procedura badawcza jest ściśle określona.

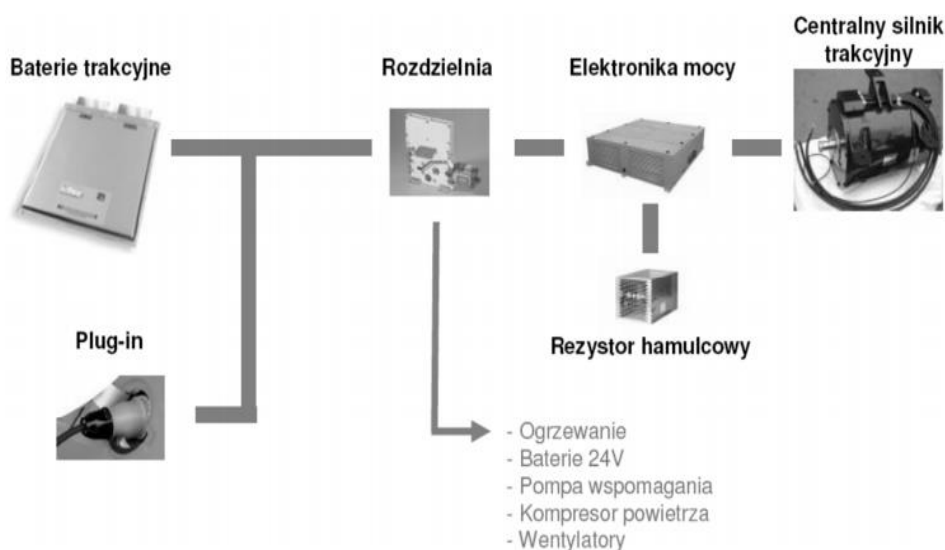
W pojazdach o napędzie elektrycznym możliwe jest ograniczenie zużycia energii dzięki procesowi hamowania odzyskowego, nazywanego rekuperacją. Energia odzyskana podczas fazy hamowania pojazdu magazynowana jest w zasobnikach superkondensatorowych. Szczególnie istotną kwestią bezpośrednio wpływającą na charakterystyki trakcyjne pojazdu z napędem elektrycznym jest dobór odpowiedniego układu sterowania układem napędowym pojazdu. Do głównych kryteriów oceny jego pracy należą: niezawodność, realizacja sterowania oraz energooszczędność.

Znaczącą grupę eksploatowanych pojazdów z napędem elektrycznym stanowią akumulatorowe pojazdy samochodowe.

Pojazd samochodowy o napędzie elektrycznym składa się z trzech podstawowych zespołów funkcjonalnych:

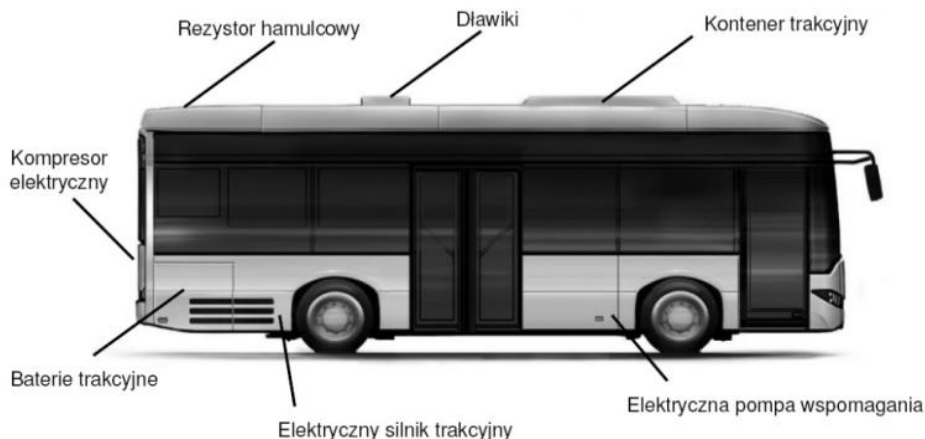
- zespołu ładowania,
- zespołu źródeł energii,
- zespołu napędowego.

Zespół ładowania jest złożony z następujących podzespołów: urządzenia służącego do ładowania akumulatora trakcyjnego ze źródeł zewnętrznych oraz urządzenia służącego do ładowania akumulatora pomocniczego. Zespół źródeł energii jest złożony z dwóch akumulatorów: trakcyjnego oraz pomocniczego. Zespół napędowy pojazdu elektrycznego (rys. 1.2.) składa się z podstawowych podzespołów: silnika trakcyjnego, przekładni mechanicznej i układu sterowania napędem pojazdu. Tego typu budowa pozwala na realizację wszystkich funkcji ruchowych, takich jak: rozruch, przyspieszanie, regulacja prędkości jazdy, jazda do tyłu oraz rekuperacja energii elektrycznej [26].



Rys. 1.2. Schemat układu napędowego autobusu wyposażonego w napęd elektryczny [145]

Większość pojazdów o napędzie elektrycznym oparta jest o nadwozie oraz podwozie konwencjonalnych pojazdów wyposażonych w napęd spalinowy. Podstawowe zespoły układu elektrycznego rozmieszczone są wewnątrz konstrukcji dostosowanej do montażu napędu elektrycznego (rys. 1.3., patrz na s. 18).



Rys. 1.3. Rozmieszczenie głównych podzespołów układu napędowego autobusu wyposażonego w napęd elektryczny typu Solaris Urbino 8,9 LE Electric [145]

Układ napędowy pojazdu samochodowego o napędzie elektrycznym składa się z: silnika elektrycznego, przekładni mechanicznej, wału napędowego, mechanizmu różnicowego oraz przekładni głównej. Istnieje wiele rozwiązań układów napędowych pojazdów elektrycznych.

Do innowacyjnych rozwiązań należy zastosowanie elektrycznego napędu osi. Układ E-oś (rys. 1.4.) stanowi połączenie trzech podzespołów układu napędowego w jedną całość. Silnik, układ elektroniczny i przekładnia główna z mechanizmem różnicowym tworzą jednostkę napędzającą bezpośrednio oś samochodu.



Rys. 1.4. Struktura i miejsce zamontowania E-osi [136]

Dla różnych konfiguracji E-osi moc wyjściowa wynosi od 50 do 300 kilowatów, co umożliwia jej montaż w samochodach kompaktowych oraz lekkich pojazdach użytkowych. Moment obrotowy przekazywany na oś pojazdu wynosi od 1000 do 6000 Nm. Napęd montowany może być z przodu jak i z tyłu w pojazdach hybrydowych i elektrycznych.

W pojazdach elektrycznych obecnie najczęściej wykorzystywane są silniki indukcyjne prądu zmiennego ze względu na korzystne charakterystyki trakcyjne oraz bezobsługowość. Zastosowanie silnika prądu przemiennego wymusiło

użycie przetwornicy DC/AC, zwanej falownikiem. Zadaniem falownika jest zamiana prądu stałego pobieranego z akumulatorów na prąd przemienny wykorzystywany do zasilania silnika trakcyjnego.

W celu zapewnienia wymaganego zasięgu pojazdu niezbędne jest wykorzystanie akumulatorów o znacznej pojemności. Głównym problemem ograniczającym zasięg współczesnych pojazdów elektrycznych jest wzrost masy oraz wymiarów zewnętrznych akumulatorów trakcyjnych, proporcjonalny do zwiększenia pojemności akumulatorów. Baterie trakcyjne stosowane w pojazdach elektrycznych powinny być dostosowane do szybkiego ładowania w trakcie postoju. Współczesne pojazdy elektryczne często są wyposażane w akumulatory litowo-jonowe o gęstości energii w zakresie 80–200 Wh/kg oraz gęstości mocy wynoszącej 400 W/kg (rys. 1.5.). Można naładować je do poziomu 80% pojemności w czasie 15–60 min.



Rys. 1.5. Baterie litowo-jonowe zastosowane w autobusie typu Urbino 12 Electric

Dodatkowo stosowane są kondensatory o dużej pojemności elektrycznej, zwane superkondensatorami. Służą one jako dodatkowe źródło energii, a ich zasadniczą zaletą jest bardzo krótki czas ładowania. Energia z zasobnika superkondensatorowego może być pobierana w czasie fazy przyspieszania pojazdu, natomiast w trakcie hamowania odzyskowego z rekuperacją energii elektrycznej zasobnik jest doładowywany. W przypadku osiągnięcia progowej, maksymalnej wartości naładowania zasobnika superkondensatorowego w obwód włączany jest rezystor hamowania, dzięki któremu odzyskana energia jest rozpraszana w postaci ciepła. Zasobniki superkondensatorowe wpływają korzystnie na trwałość akumulatorów, ograniczając prąd ich ładowania. Proces ładowania i rozładowywania

akumulatorów sterowany jest przez system zarządzania zasilaniem w celu zapewnienia większej trwałości akumulatorów oraz ich efektywnego ładowania.

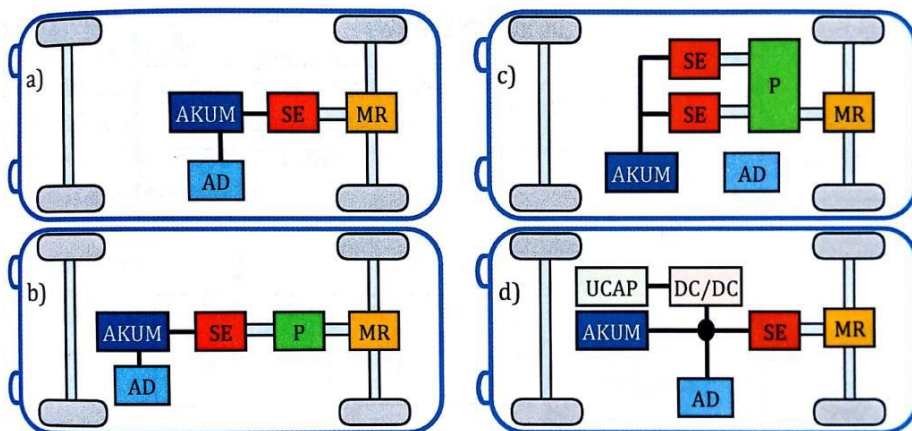
Okresowe ładowanie akumulatorów pojazdu elektrycznego może odbywać się:

- podczas postoju korzystając z sieci stacjonarnej poprzez złącze *plug-in*,
- na przystanku, przy użyciu pantografu (rys. 1.6.),
- na przystanku poprzez układ ładowania indukcyjnego zabudowany w podłożu zatoki przystankowej.



Rys. 1.6. Autobus miejski typu Urbino 8,9 LE Electric w trakcie ładowania baterii trakcyjnych przy użyciu pantografu

Podstawowymi układami, niezbędnymi do realizacji czynności jezdnych są: silnik elektryczny z kontrolerem (sterownikiem) oraz źródło zasilania połączone przez przetwornicę. Napęd przenoszony jest z silnika poprzez przekładnię do mechanizmu różnicowego, który przekazuje moment na oś napędzaną. W autobusach stosuje się również dodatkowe akumulatory 12/24V służące do obsługi instalacji pokładowej. Taki układ można modyfikować poprzez wprowadzanie dodatkowych składników jak zasilanie superkondensatorowe. Najczęściej stosowane są cztery konfiguracje układów napędowych (rys. 1.7., patrz na s. 21.).



Rys. 1.7. Konfiguracja układów napędu elektrycznego autobusów: AK– akumulator, SE–silnik elektryczny/kontroler, MR–mechanizm różnicowy, AD–akumulator dodatkowy, P–przekładnia, UCAP–ultrakondensator, DC/DC–przekształtnik [91]

Silniki elektryczne ze względu na rodzaj napięcia zasilającego dzielą się na dwa rodzaje: prądu stałego i przemiennego. O doborze odpowiedniego silnika napędowego decyduje szereg czynników, które należy uwzględnić. Najważniejszymi z nich są: odpowiednia charakterystyka mechaniczna, łatwość sterowania w obrębie pracy silnikowej jak i prądnicowej, moc jednostkowa silnika, sprawność, niezawodność oraz koszt eksploatacji.

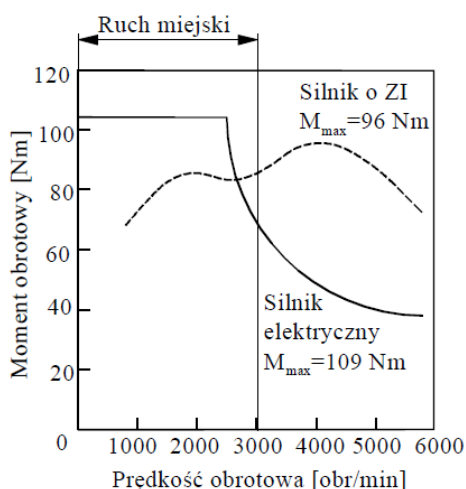
Wyodrębnia się cztery podstawowe rodzaje silników, których parametry odpowiadają wymaganiom stawianym przy projektowaniu autobusu elektrycznego. Tabela 1.1. przedstawia zestawienie właściwości silników elektrycznych o tej samej mocy.

Tab.1.1. Wskaźniki techniczno–eksploatacyjne autobusów [90, 92]

Parametr		Silnik prądu stałego (DC)		Silnik prądu zmiennego (AC)	
		obcowzbudny	szeregowy	indukcyjny	Synchroniczny o magnesach trwałych
Masa	[kg]	100	115	45	39
Wymiary	[cm]	43 x 30	53 x 36	30 x 30	18 x 46
Maksymalna prędkość obrotowa	[obr/min]	5000	5000	150000	15000
Maksymalna sprawność	[–]	0,90	0,85	0,92	0,95
Koszt porównawczy	[–]	1	0,9	0,5	0,5
Moc jednostkowo	[W/kg]	150	130	333	385

Coraz częściej obserwuję się tendencję stosowania silników prądu przemiennego zamiast prądu stałego, co jest uzasadnione wartościami parametrów zestawionych w tab. 1.1. (patrz tab. na s. 21)

Pojazdy komunikacji miejskiej z napędem elektrycznym poruszają się z mniejszą prędkością obrotową silników, co jest ich zaletą w porównaniu do silników spalinowych i przyjmują korzystny przebieg charakterystyki momentu obrotowego (rys. 1.8.). Silnik elektryczny może wytwarzać maksymalny moment obrotowy już od rozruchu i utrzymać go do prędkości obrotowej 2500 obr/min. Autobus elektryczny nie potrzebuje skrzyni biegów, gdyż odpowiednie przełożenie oraz silnik o wystarczającej mocy są w stanie w przedziale 0–2500 obr/min zrealizować ruch o prędkości do 70 km/h, co jest ważne dla ruchu miejskiego.

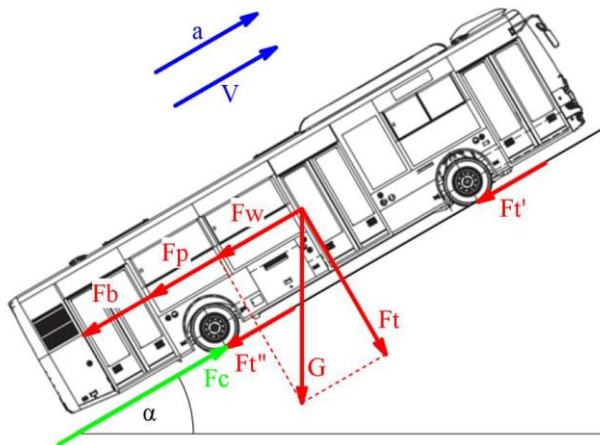


Rys. 1.8. Porównanie charakterystyk momentu obrotowego silnika elektrycznego (o mocy 23 kW) i spalinowego z ZI (o mocy 48 kW) [33]

1.2. Energochłonność ruchu

Pod względem energetycznym ruch pojazdu jest następstwem działania siły wzdłużnej, która równoważąc opory ruchu i przewyższając siłę bezwładności, wykonuje pracę na danym odcinku przebytej drogi. Praca ta odnosi się bezpośrednio do wydatku energii elektrycznej, którą należy pobrać ze źródła zasilania np. akumulatorów, przetworzyć na energię mechaniczną poprzez silnik i doprowadzić do kół pojazdu poprzez przekładnię. Na wymienione powyżej własności dynamiczne oraz energetyczne bezpośredni wpływ może wywierać również stan techniczny podzespołów pojazdu oraz ciężar przewożonych pasażerów.

Na ogólną energochłonność ruchu pojazdu składają się cztery podstawowe siły oddziałujące na pojazd w trakcie jego jazdy (rys. 1.9., patrz na s. 23.).



Rys. 1.9. Rozkład sił podczas ruchu pojazdu [33]

Siła oporu toczenia związana jest z tarciem występującym pomiędzy ogumieniem kół pojazdu, a drogą po jakiej porusza się pojazd. Wartość tej siły przedstawia wzór:

$$F_t = f_t \cdot (m_w + m_p) \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (1.1)$$

gdzie:

m_w – masa własna pojazdu,

m_p – masa pasażera,

f_t – współczynnik oporu toczenia,

g – przyspieszenie ziemskie,

α – kąt nachylenia drogi.

Współczynnik oporu toczenia f_t , wynika z dynamiki koła samochodowego. Dla opon stosowanych we współczesnych pojazdach charakteryzuje się niewielkim przyrostem wartości dla przedziału prędkości od 0 do 90–100 km/h. Zważając na ten fakt w większości opracowań autorzy przyjmują aproksymację charakterystyki tego współczynnika jako funkcję liniową o stałej wartości, co wydaje się jak najbardziej prawidłowe w przypadku autobusu, który zwykle nie przekracza prędkości 70 km/h. Wartość współczynnika oporu toczenia dla pojazdów ciężarowych przyjmuje się jako równą 0,007 dla asfaltowej drogi gładkiej. W rzeczywistości wartość ta zależy od takich czynników jak:

- stan oraz rodzaj nawierzchni (opór dla drogi gruntowej jest większy niż na asfalcie),
- konstrukcji ogumienia (np. rodzaj bieżnika, średnica koła),
- ciśnienia (ośrodka, w którym pracuje opona i panującego wewnątrz opony),
- temperatury (otoczenia i na powierzchni opony).

Siła oporu aerodynamicznego wynika z oporu jaki stawia ośrodek, w którym porusza się pojazd. Opór ten jest wprost proporcjonalny do gęstości ośrodka i zależy od prędkości, wymiarów oraz kształtu poruszającego się pojazdu. Na podstawie średniej temperatury w skali roku, która wynosi ok. 9°C i w oparciu o statystyki z ostatnich 10 lat dla średniego ciśnienia atmosferycznego równego 1013,25 hPa, należy przyjąć wartość gęstości powietrza na poziomie 1,2 kg/m³. Wpływ rozmiaru i kształtu pojazdu definiuje się poprzez dwa współczynniki. Jednym z nich jest współczynnik czołowego oporu aerodynamicznego C_x , który dla autobusu przyjmuje się w granicach 0,6–0,7. Dla samochodu osobowego wartość współczynnika zawiera się w zakresie 0,25–0,7. Współczynnik ten wyznacza się drogą eksperymentalną lub przybliża poprzez symulacje. Zależy on głównie od:

- oporów profilowych (kształtu w przekroju wzdłużnym),
- oporów indukcyjnych (kształtu powierzchni bocznej),
- oporów tarcia,
- oporów zakłóceń (dowolne nierówności karoserii),
- oporów układu chłodzenia i wentylacji.

Drugim czynnikiem związanym z wymiarami jest współczynnik powierzchni czołowej, zależny od pola powierzchni przedniej części pojazdu wyrażony wzorem:

$$A_t = 0,9 \cdot w \cdot sz \quad (1.2)$$

gdzie:

w – wysokość,

sz – szerokość.

Znając wszystkie składowe równania otrzymuje się wzór na siłę oporu powietrza:

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho_p \cdot C_x \cdot A_t \cdot V^2 \quad (1.3)$$

gdzie:

ρ_p – gęstość powietrza,

C_x – współczynnik czołowego oporu aerodynamicznego.

Ukształtowanie drogi po jakiej porusza się pojazd wpływa na wartość siły oporu toczenia. Samochód poruszający się pod górę musi pokonać dodatkowo **siłę oporu wzniesienia**, wyrażoną wzorem:

$$F_w \approx (m_w + m_p) \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (1.4)$$

Przy opisie ujemna wartość dotyczy jazdy z góry, natomiast dodatnia występuje gdy jej zwrot ma kierunek zgodny z kierunkiem jazdy pojazdu.

Najważniejszą składową jest **siła oporu bezwładności** wyrażona równaniem:

$$F_b = (m_w + m_p) \cdot a \cdot \delta \quad (1.5)$$

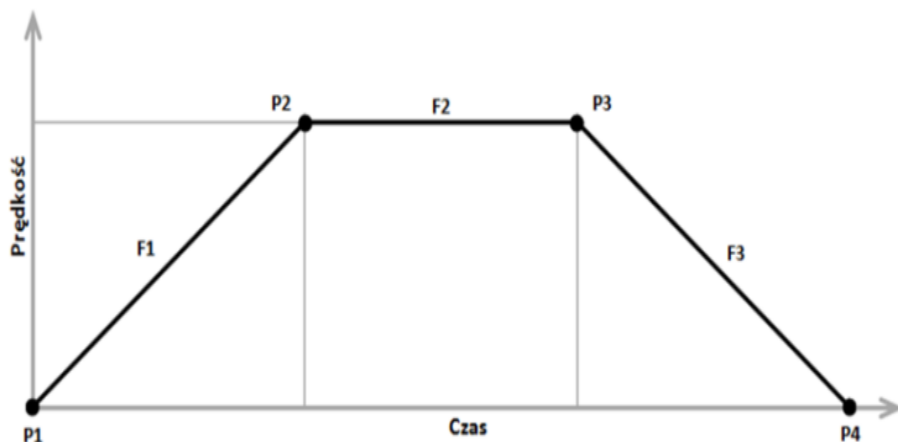
gdzie:

δ – współczynnik mas wirujących.

Stanowi integralną część bilansu sił występującą podczas zmiany prędkości pojazdu [4, 29].

Wartość siły oporu bezwładności zależy wprost proporcjonalnie od przyspieszenia (lub opóźnienia – dla hamowania), które również nadaje jej odpowiedni zwrot biorąc pod uwagę to czy samochód przyspiesza czy zwalnia.

Zgodnie z podstawowymi zasadami teorii ruchu podczas cyklu jezdny można wyodrębnić 3 fazy: przyspieszanie (F1), jazdę ze stałą prędkością (F2) i hamowanie (F3) oraz 4 punkty charakterystyczne określające zakończenie jednej i początek kolejnej fazy: rozpoczęcie ruchu (P1), osiągnięcie założonej prędkości (P2), rozpoczęcie hamowania (P3), zatrzymanie pojazdu (P4) (rys. 1.10.).



Rys. 1.10. Teoretyczny cykl jezdny:

F1 – faza przyspieszania, F2 – faza jazdy ze stałą prędkością, F3 – faza hamowania;

P1 – punkt rozpoczęcia ruchu, P2 – punkt osiągnięcia założonej prędkości,

P3 – punkt rozpoczęcia hamowania, P4 – punkt zatrzymania pojazdu

Istotną w analizie energochłonności ruchu jest faza, podczas której pojazd porusza się ze stałą prędkością. W takim przypadku na pojazd działają jedynie siły wynikające z oporu toczenia (F_t) i powietrza (F_p), które określa się je siłami oporu podstawowego, gdyż występują w każdych warunkach. W związku z tym sumaryczna energia jaką należy przeznaczyć na ruch pojazdu w tym stanie zależy jedynie od zmiany kąta nachylenia drogi.

$$F_{c2} = F_t(\alpha) + F_p + F_w(\alpha) \quad (1.6)$$

Zwiększanie prędkości jest najbardziej energochłonną fazą ruchu, a szczególnie jeżeli odbywa się od stanu spoczynku do osiągnięcia prędkości zadanej przez kierowcę. Podczas przyspieszania na pojazd działają nie tylko siły F_t i F_p , ale także siła oporu bezwładności (F_b) zależna od intensywności przyrostu prędkości. Ze względu na to wypadkowa siła potrzebna do przeciwstawienia się siłom oporu wynosi:

$$F_{c1} = F_t(\alpha) + F_p + F_w(\alpha) + F_b(a_p) \quad (1.7)$$

Należy zwrócić uwagę, że w tej sytuacji występują dwie zmienne warunkujące poziom energochłonności tej fazy.

Ruch opóźniony jest najbardziej złożoną z wymienionych faz cyklu jeźdnego i obejmuje:

- hamowanie planowane w celu zatrzymania pojazdu,
- hamowanie zmniejszające prędkość będące następstwem dostosowania prędkości jazdy do aktualnych warunków drogowych,
- hamowanie awaryjne spowodowane losowym zdarzeniem, które wymusza od kierowcy zatrzymanie samochodu w możliwie najkrótszym czasie.

Podsumowując, całkowitą siłę oporu tej fazy ruchu określa się wzorem:

$$F_{c3} = F_t(\alpha) + F_p + F_w(\alpha) - F_b(a_h) \quad (1.8)$$

Należy stwierdzić, że podczas analizy energochłonności konieczne jest uwzględnianie wszystkich wyżej wymienionych czynników, gdyż odgrywają one kluczową rolę w ostatecznym bilansie energetycznym cyklu jeźdnego, a ich symulację można przeprowadzić jedynie poprzez przyjęcie odpowiednich założeń, dla których przeprowadzone zostaną badania.

W ogólnym przypadku energochłonność ruchu pojazdu można przedstawić jako sumę wszystkich energii w celu pokonania oporów ruchu oraz przyrostu energii kinetycznej (1.9) [111–117].

$$E = E_t + E_p + E_w + E_k \quad (1.9)$$

gdzie:

E – energochłonność ruchu,

E_t – energia przeznaczona na pokonanie oporów toczenia,

E_p – energia przeznaczona na pokonanie oporów powietrza,

E_w – energia przeznaczona na pokonanie wzniesienia,

E_k – energia kinetyczna.

Energochłonność ruchu dla pojedynczego modułu jest sumą wydatków niezbędnych do pokonania oporów oraz przewyciężenia siły bezwładności podczas fazy przyspieszania. Uwzględniając równowartość pracy i energii poszczególne składniki energochłonności ruchu należy przedstawić następująco:

$$E_t = mg \int_0^{L_N} f_t ds = \bar{F}_t L_N \quad (1.10)$$

$$E_p = K \int_0^{L_N} V^2 ds = \bar{F}_p L_N \quad (1.11)$$

$$E_w = mg \int_0^{L_{NW}} \sin \alpha ds = \bar{F}_w L_{NW} \quad (1.12)$$

$$E_K = m \delta \int_0^{L_A} a ds = \bar{F}_b L_A \quad (1.13)$$

W przypadku pokonywania długiego odcinka drogi złożonego z szeregu modułów tj. przyspieszanie, ruch ustalony oraz hamowanie energochłonność ruchu pojazdu samochodowego może być obliczona przy wykorzystaniu wzoru (1.14):

$$E = \sum \int_0^{L_N} (F_{op})_N ds + \sum E_k \quad (1.14)$$

W szczegółowej postaci powyższe równanie energochłonności ruchu pojazdu samochodowego (4.17.) można przedstawić jako równanie (1.15.):

$$E = m \cdot g \cdot f_t \cdot L_N + K \cdot \vartheta_N \cdot L_N + \frac{m}{2} \cdot (v_k^2 - v_p^2) \quad (1.15)$$

gdzie:

ϑ_N – uśredniona wartość kwadratu prędkości ruchu,

K – współczynnik oporu powietrza.

Współczynnik oporu powietrza wykorzystany w równaniu (1.15) może zostać obliczony przy użyciu równania (1.16):

$$K = c_x \cdot A \cdot \varepsilon \quad (1.16)$$

Podsumowując energochłonność ruchu pojazdu samochodowego można przedstawić jako równanie (1.17):

$$E = m \cdot g \cdot f_t \cdot \int_0^{T_N} v dt + K \cdot \int_0^{T_N} v^3 dt + \frac{m}{2} \cdot (v_k^2 - v_p^2) \quad (1.17.)$$

Energochłonność przebiegowa jest stosunkiem wydatku energii wykorzystanej w czasie fazy napędzania oraz całkowitej długości pokonanej drogi w kompletnym cyklu prędkości [111–117].

Energochłonność przebiegowa obliczona jest zgodnie ze wzorem (1.18):

$$\psi = \frac{E}{L_C} \quad (1.18)$$

gdzie:

L_C – całkowita droga pokonana w kompletnym cyklu prędkości.

Równanie (1.18.) można przedstawić w formie równania (1.19):

$$\psi = m \cdot g \cdot f_t \cdot \frac{L_N}{L_C} + K \cdot \frac{\vartheta_N \cdot L_N}{L_C} + m \cdot \frac{v_k^2 - v_p^2}{2 \cdot L_C} \quad (1.19)$$

Energochłonność jednostkową definiuje się jako stosunek sumarycznego wydatku energii podczas fazy napędzania do iloczynu pokonanej drogi oraz masy pojazdu [38]. Energochłonność jednostkowa może być obliczona przy pomocy wzoru (1.20):

$$\Phi = \frac{E}{m \cdot L} \quad (1.20)$$

gdzie: L – przejechana droga.

W przypadku jazdy ze zmienną wartością prędkości równanie (1.20) przybiera postać równania (1.21), patrz na s.28.:

$$\Phi = g \cdot f_t \cdot \frac{L_N}{L_C} + \frac{K \cdot \vartheta_N \cdot L_N}{m \cdot L_C} + \frac{v_k^2 - v_p^2}{2 \cdot L_C} \quad (1.21)$$

1.3. Bilans energetyczny

Podstawową własnością energetyczną pojazdu jest zużycie energii elektrycznej albo paliwa, które zależne jest od sprawności układu napędowego oraz energochłonności ruchu, stanowiącej ilość energii na kołach pojazdu podczas pokonywania określonego odcinka drogi. Na energochłonność wpływa wiele czynników, a określenie maksymalnej odległości jaką jest w stanie pokonać pojazd z napędem elektrycznym podczas jednego cyklu naładowania (od stanu pełnego naładowania akumulatorów do osiągnięcia minimalnego dopuszczalnego stanu naładowania) jest możliwe na podstawie przeprowadzenia bilansu energetycznego.

Równanie bilansu energetycznego ruchu pojazdu wyposażonego w silnik spalinowy przedstawia wzór (1.22):

$$G_L W_d = E_t + E_p \pm E_w \pm E_k + \Delta E_s + \Delta E_p \quad (1.22)$$

gdzie:

W_d – wartość opałowa paliwa,

G_L – ilość zużytego paliwa,

ΔE_p – straty energii związane ze sposobem przykazywania napędu,

ΔE_s – straty związane z wytwarzaniem energii w silniku.

W przypadku pojazdu z napędem elektrycznym należy uwzględnić rodzaj źródła zasilania pojazdu oraz możliwości zastosowania dodatkowych źródeł energii (np. instalacje fotowoltaiczne).

$$E_z + E_{Dz} = E_t + E_p \pm E_w \pm E_k + \Delta E_s + \Delta E_p \quad (1.23)$$

E_z – energia zgromadzona w źródle zasilania pojazdu,

E_{Dz} – energia dostarczona do źródła, pochodząca z dodatkowych źródeł energii.

1.4. Metody oceny efektywności energetycznej pojazdów

1.4.1. Sprawność eksploatacyjna pojazdu

Pojęcie sprawności najczęściej stosowane jest w odniesieniu do maszyn oraz urządzeń, dla których jest ona wyznaczana w oparciu o normy. W przypadku pojazdów z napędem elektrycznym, realizujących podczas ruchu szereg zróżnicowanych funkcji, rozważania na temat sprawności skoncentrowane są głównie mierze na przetwarzaniu energii mechanicznej i elektrycznej przez odbiorniki energii: elektryczny układ napędowy, koła napędowe oraz układ transmisji mocy (przekładnie, wały, łożyska, sprzęgła). W odniesieniu do elektrycznych układów napędowych uwzględniane są zmienne stany pracy silnika oraz warunki podczas

ruchu pojazdu (bieg jałowy, ruch miejski i pozamiejski, testy jezdne). Odpowiednie wartości sprawności odnoszone są zwykle do chwilowych wartości strumieni energii. Dla pojazdów z napędem elektrycznym rozpatrywany jest strumień energii doprowadzonej do silnika ze źródła zasilania oraz moc użyteczna wykorzystywana do napędu pojazdu [78].

1.4.2. Przebiegowe zużycie energii

Ocena energochłonności pojazdu z wykorzystaniem przebiegowego zużycia energii wyrażonego w kWh/100km, jest przyjmowana w pracach badawczych, przez firmy komunikacyjne oraz korzystają z niej indywidualni użytkownicy pojazdów. Zastosowanie tej metody umożliwia powiązanie kosztów eksploatacji z porównywanym parametrem, gdyż istnieje proporcjonalny związek między zużyciem energii a jej kosztem. Energochłonność wyznaczana jest dla założonego okresu eksploatacji i przy określonych warunkach np. dla danej trasy przejazdu. Warunki eksploatacji mogą zostać założone lub uwzględnione przez okresową rejestrację parametrów pracy silnika oraz pojazdu. Znane są różne metody identyfikacji warunków eksploatacji, w większości których są ściśle określone rodzaje włączonych odbiorników energii elektrycznej, cieplnej i mechanicznej. W metodzie oceny energochłonności na podstawie przebiegowego zużycia energii porównywać można pojazdy o podobnej konstrukcji, przeznaczeniu oraz gabarytach. Metoda ta charakteryzuje się tym, że umożliwia prowadzenie niezależnych pomiarów, porównanie różnych układów napędowych oraz obliczenie kosztów eksploatacji [78].

1.5. Metody identyfikacji warunków eksploatacji pojazdów

1.5.1. Profil prędkości pojazdu

Podstawowym czynnikiem wpływającym bezpośrednio na bilans energetyczny ruchu pojazdu jest realizowany podczas eksploatacji profil prędkości. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi profil prędkości są między innymi długość danej fazy ruchu, jej intensywność oraz występowanie faz przejściowych. Istnieje wiele reprezentatywnych cykli jazdy opracowanych głównie przez organizacje związane z ochroną środowiska oraz instytucje motoryzacyjne. Wśród nich można wyróżnić: WLTP (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*), EDC (*European Drive Cycle*), NEDC (*New European Driving Cycle*), ESC (*European Drive Cycle*), ELR (*European Load Response*), FTP 72 (*Federal Test Procedure*), FTP 75, SC03, US06, NYCC (*New York City Cycle*), UC (*Unified California*), HWFET (*Highway Fuel Economy Test*). Powyższe testy mają w założeniach odwzorowywać typowe warunki ruchu pojazdów w mieście lub poza miastem, które rozpoznano w drodze badań rzeczywistego ruchu drogowego.

Obecnie powszechnie stosowany jest test WLTP, który jest światowym zharmonizowanym standardem określającym poziom zanieczyszczeń, emisji CO₂ oraz zużycia paliwa przez samochody tradycyjne i hybrydowe, a także zasięg pojazdów w pełni elektrycznych. WLTP zastąpił europejski test NEDC stosowany do homologacji pojazdów. Procedura testu WLTP zawiera ściśle określone wytyczne dotyczące warunków badań, oporów ruchu, zmiany biegów, całkowitej masy pojazdu, jakości paliwa, temperatury otoczenia oraz doboru ciśnienia opon. Stosowane są trzy cykle testowe w zależności od klasy pojazdu. W każdej klasie jest kilka reprezentatywnych testów jezdnych odzwierciedlających rzeczywistą eksploatację pojazdu na drogach miejskich, pozamiejskich, autostradach i drogach szybkiego ruchu. Czas trwania każdej części jest stały dla poszczególnych klas, jednak krzywe przyspieszenia i prędkości są kształtowane w różny sposób. Kolejność testów jest dodatkowo ograniczona maksymalną prędkością pojazdu [76].

Dla pojazdów transportu publicznego stosowane są testy SORT i E-SORT (ang. *Standardised On-Road Test*) opracowane przez UITP (fr. *Union Internationale des Transports Publics* – Międzynarodowe Stowarzyszenie Transportu Publicznego). Stanowią one procedurę badawczą, której celem jest odzwierciedlenie warunków ruchu drogowego w standardowym mieście, mające na celu wyznaczenie energochłonności danego środka transportu miejskiego w prosty, powtarzalny i dokładny sposób. Istotna jest standaryzacja wyników, które umożliwiają porównanie różnych obiektów przebadanych tą samą metodą.

Kompletny test zaproponowany przez UITP składa się z trzech cykli podstawowych, z których każdy symuluje inny profil prędkości [137,143]:

- SORT 1 – Heavy Urban Cycle (rys. 1.11.) – odzwierciedlenie warunków eksploatacji występujących w dużych miastach, a szczególnie centrum (średnia prędkość wliczając postoje na przystankach i/lub światłach $V_{sr} = 12,1$ km/h),
- SORT 2 – Easy Urban Cycle (rys. 1.12.) – odzwierciedlenie warunków eksploatacji występujących dla typowych tras miejskich ($V_{sr} = 18$ km/h),
- SORT 3 – Easy Suburban Cycle (rys. 1.13.) – odzwierciedlenie warunków eksploatacji występujących dla tras pozamiejskich ($V_{sr} = 25,3$ km/h).

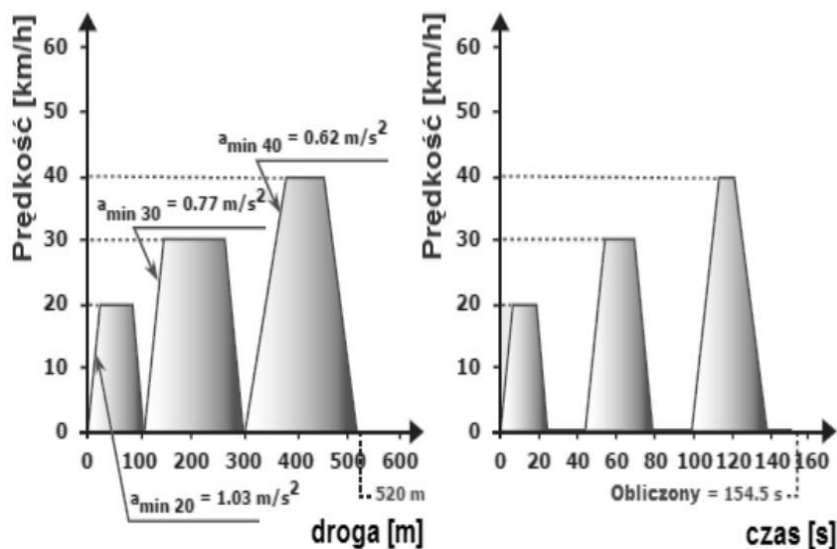
Każdy z cykli składa się z trzech profili obejmujących przyspieszenie z daną intensywnością, jazdę ze stałą prędkością na poziomie 20–60 km/h i hamowanie z określoną siłą. Po każdym bazowym profilu następuje krótki postój, po którym rozpoczyna się kolejna sekcja.

SORT 1

Pierwszy cykl odwzorowuje natężenie ruchu w dużych aglomeracjach, gdzie środki komunikacji miejskiej osiągają średnie prędkości na poziomie 12,1 km/h, co wynika z dużego udziału (39,7%) postojów symulujących zatrzymywanie na światłach oraz przystankach (rys. 1.11, tab. 1.2., patrz na s.30).

Przyspieszenie $a_{\min} = f(v)$
Opóźnienie $b = 0.8 \text{ m/s}^2$

Średnia prędkość $v_m = 12.1 \text{ km/h}$



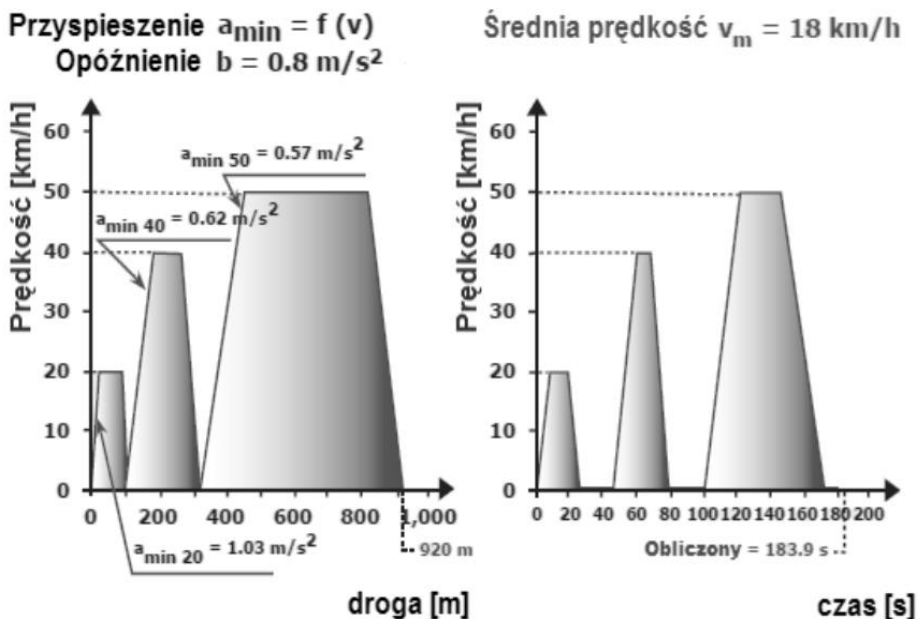
Rys. 1.11. Cykl jezdny SORT 1 do badania autobusów miejskich [137, 143]

Tab. 1.2. Parametry określające przebieg cyklu SORT 1 [137, 143]

	Etap	s [m]	Δt [s]	V [km/h]	a [m/s ²]
Profil 1	Przyspieszenie	0	5,4	0–20	1,03
	Prędkość stała	15	11,8	20	0
	Hamowanie	81	6,9	20–0	–0,8
	Postój	100	20	0	0
Profil 2	Przyspieszenie	100	10,8	0–30	0,77
	Prędkość stała	145	13,4	30	0
	Hamowanie	257	10,4	30–0	–0,8
	Postój	300	20	0	0
Profil 3	Przyspieszenie	300	17,9	0–40	0,62
	Prędkość stała	400	3,9	40	0
	Hamowanie	443	13,9	40–0	–0,8
	Postój	520	20	0	0

SORT 2

Drugi cykl odwzorowuje natężenie ruchu w mniejszych miastach, gdzie autobusy osiągają średnie prędkości na poziomie 18 km/h, co jest wynikiem mniejszego udziału postojów w perspektywie całej trasy (33,4%) (rys. 1.12, tab. 1.3.).



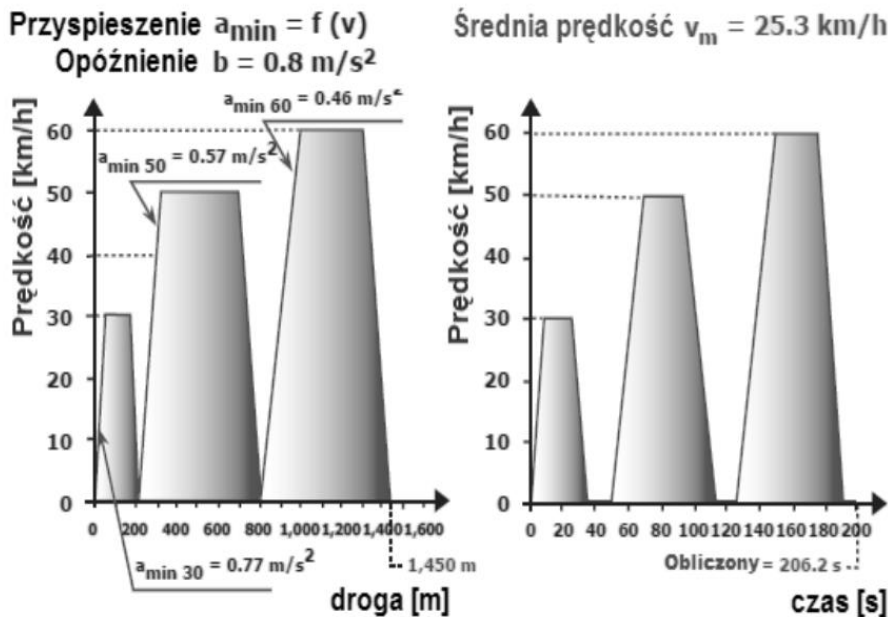
Rys. 1.12. Cykl jezdny SORT 2 do badania autobusów miejskich [137, 143]

Tab. 1.3. Parametry określające przebieg cyklu SORT 2 [137, 143]

	Etap	s [m]	Δt [s]	V [km/h]	a [m/s ²]
Profil 1	Przyspieszenie	0	5,4	0–20	1,03
	Prędkość stała	15	17,2	20	0
	Hamowanie	81	24,1	20–0	–0,8
	Postój	100	44,1	0	0
Profil 2	Przyspieszenie	100	62	0–40	0,62
	Prędkość stała	200	65,9	40	0
	Hamowanie	243	79,8	40–0	–0,8
	Postój	320	99,8	0	0
Profil 3	Przyspieszenie	489	124,2	0–50	0,57
	Prędkość stała	799	146,5	50	0
	Hamowanie	920	163,9	50–0	–0,8
	Postój	920	183,9	0	0

SORT 3

Trzeci cykl odwzorowuje natężenie ruchu poza miastem, gdzie pojazdy komunikacyjne osiągają średnie prędkości na poziomie 25,3 km/h, a postoje są znacznie zredukowane, bo aż do 20,1% (rys. 1.13, tab. 1.4).



Rys. 1.13. Cykl jezdny SORT 3 do badania autobusów miejskich [137, 143]

Tabela 1.4. Parametry określające przebieg cyklu SORT 3 [137, 143]

	Etap	s [m]	Δt [s]	V [km/h]	a [m/s ²]
Profil 1	Przyspieszenie	0	10,8	0–30	0,77
	Prędkość stała	45	13,4	30	0
	Hamowanie	157	10,4	30–0	– 0,8
	Postój	200	13,3	0	0
Profil 2	Przyspieszenie	200	24,4	0–50	0,57
	Prędkość stała	369	22,3	50	0
	Hamowanie	679	17,4	50–0	– 0,8
	Postój	800	13,3	0	0
Profil 3	Przyspieszenie	800	36,2	0–60	0,46
	Prędkość stała	1102	10,5	60	0
	Hamowanie	1276	20,8	60–0	– 0,8
	Postój	1450	13,3	0	0

1.5.2. Założona trasa przejazdu

Odmianą metody przyjętego profilu przejazdu jest wykorzystanie założonej trasy przejazdu. Metoda jest powszechnie stosowana w przedsiębiorstwach komunikacyjnych, w której trasa przejazdu dotyczy określonej linii autobusowej lub trolejbusowej. Warunki eksploatacji są zróżnicowane, powtarzalna jest liczba skrzyżowań z sygnalizacją świetlną oraz liczba przystanków, natomiast zmianie ulega natężenie ruchu oraz liczba pasażerów w zależności od pory dnia, tygodnia i roku. Metodę można stosować do pojazdów o podobnych parametrach, przeszerzeniach pasażerskich oraz rodzajach silników [28, 29, 78].

1.5.3. Średnia prędkość jazdy

Do rozpoznawania warunków eksploatacji pojazdu wykorzystywana jest średnia prędkość jazdy. Główną zaletą tej metody jest jej powszechność oraz możliwie prosty sposób przeprowadzenia istotnych pomiarów i interpretacji wyników. W ramach interpretacji wyników dla przyjętych określonych prędkości progowych dokonywana jest klasyfikacja warunków eksploatacji na jazdę miejską, pozamiejską lub jazdę miejską z utrudnieniami (np. zatory drogowe). Średnia prędkość jazdy na trasach o znanych długościach umożliwia w sposób bezpośredni przeprowadzenie porównania czasu przejazdu dla alternatywnych dróg. Metoda ta posiada ograniczone zastosowanie przy wyznaczeniu optymalnej drogi przejazdu ze względu na minimalizację zużycia energii.

1.5.4. Moc dostarczana do kół napędowych

Kolejnym parametrem, który umożliwia identyfikację warunków eksploatacji pojazdu stanowi moc dostarczona przez układ napędowy pojazdu do kół. Metoda może być stosowana do wyznaczania przebiegowego zużycia energii jak również sprawności eksploatacyjnej. Modelowanie zużycia energii przy użyciu tej metody może być obciążone znacznym błędem, podobnie jak w przypadku średniej prędkości jazdy.

1.5.5. Energochłonność przebiegowa, energochłonność jednostkowa

Innym parametrem stosowanym do identyfikacji warunków eksploatacji pojazdu jest energochłonność przebiegowa stanowiąca wartość energii mechanicznej dostarczonej do kół przez silnik elektryczny lub spalinowy odniesioną do przebytej drogi. Najczęściej parametr ten wykorzystywany jest do wyboru optymalnej trasy przejazdu, optymalizacji techniki jazdy i wyborze właściwej strategii sterowania układem napędowym uwzględniającej minimalizację zużycia paliwa lub energii. Zastosowanie tego parametru staje się problematyczne, podczas porównywania wyników uzyskanych dla pojazdów o różnych masach, z racji tego, że masa pojazdu stanowi jeden z głównych czynników wpływających na ilość energii doprowadzanej do kół napędowych [78].

1.6. Podsumowanie stanu wiedzy

Analizowane w monografii metody oceny energochłonności pojazdu dla określonych warunków eksploatacji stanowią tylko wybraną część spośród powszechnie wykorzystywanych metod.

Ze względu na brak międzynarodowych norm regulujących metody oceny efektywności energetycznej eksploatowanych pojazdów wprowadzone zostały różne rodzaje testów jezdnych. Część z nich określona jest przez krajowe normy pomiaru energochłonności, lecz równolegle stosowane są umowne, nieoficjalne rodzaje testów jezdnych opracowane przez poszczególne jednostki badawcze. Ich metodyka jest uzależniona od wymagań jednostki zlecającej badania, rodzaju badanego pojazdu oraz przewidywanych warunków pracy panujących podczas jego przyszłej eksploatacji. Testy jezdne mogą symulować między innymi warunki ruchu panujące w centrach dużych oraz średnich miast, warunki występujące podczas jazdy międzymiastowej, podmiejskiej, jak również warunki indywidualne, charakterystyczne dla przewidywanego miejsca eksploatacji badanego pojazdu.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu istniejącego stanu wiedzy można stwierdzić, że istniejące metody oceny energochłonności pojazdów bazują głównie na wyznaczaniu przebiegowego zużycia energii dla założonych warunków eksploatacji. Występują duże różnice w zakresie osiąganego dokładności w odwzorowywaniu przebiegowego zużycia energii z użyciem poszczególnych metod, jak również w stopniu ich uniwersalności oraz w stopniu komplikacji wykonywanych pomiarów. Wykorzystując wyniki analizy stanu wiedzy, należy sformułować kryteria wyboru metody oceny energochłonności ruchu pojazdu z napędem elektrycznym. Taka metoda powinna:

- zapewniać dużą dokładność odwzorowywania przebiegowego zużycia energii, gdyż pozwala wykorzystać wyniki oceny energochłonności pojazdu podczas rzeczywistej eksploatacji, np. do prognozowania zużycia energii,
- odznaczać się uniwersalnością umożliwiającą wykorzystanie jej przy eksploatacji pojazdów o zbliżonej konstrukcji i zastosowaniu do porównywania prognozowanych kosztów eksploatacji floty pojazdów oraz optymalizacji zadań przydzielanych poszczególnym pojazdom.

Na podstawie przeprowadzonej analizy metod wnioskuje się, że dalsze ich wykorzystanie wymaga opracowania modeli przyczynowo-skutkowych z wykorzystaniem programów symulacyjnych.

2. MODEL TEORETYCZNY ENERGOCHŁONNOŚCI RUCHU POJAZDÓW

Analizę teoretyczną energochłonności ruchu dla pojazdu z napędem elektrycznym wykonano na podstawie symulacji komputerowej z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB Simulink. Przeprowadzenie modelowania bilansu energochłonności pozwala na dokładne prześledzenie poszczególnych składowych wpływających na energochłonność ruchu. Opracowanie modelu pozwoli dokładniej zaplanować przebieg badań, co przekłada się na znaczne oszczędzenie czasu oraz nakładów finansowych oraz zwiększenie pewności przyjętych rozwiązań dla nowoprojektowanych autobusów komunikacji miejskiej oraz innych pojazdów elektrycznych. Celem opracowanego modelu jest określenie istotnych parametrów ruchu wpływających na pracę użyteczną oraz energochłonność ruchu.

2.1. Budowa oraz istota uproszczonego modelu matematycznego energochłonności autobusu elektrycznego

Na podstawie analizy teorii ruchu samochodu oraz przeprowadzonych badań opracowano model matematyczny, przy pomocy którego można przeprowadzić symulację energochłonności autobusu elektrycznego dla dowolnie zdefiniowanego profilu prędkości. W celu przeprowadzenia weryfikacji modelu symulację przeprowadzono dla wytycznych testu jezdni SORT oraz profilu prędkości uzyskanego podczas przejazdu pomiarowego.

Model matematyczny opracowany metodą analityczną stanowi algorytm, którego zadaniem jest obliczenie energochłonności, jednostkowego zużycia energii oraz maksymalnego zasięgu na podstawie danych obiektu badań, realizowanego profilu prędkości oraz danych dotyczących trasy, po której porusza się badany pojazd. Dla weryfikacji modelu możliwe jest przeprowadzenie symulacji wpływu wprowadzanych zmian dla wybranych parametrów oraz prognozowanie w fazie projektowania. Przykładem tego może być dobór odpowiedniej pojemności akumulatorów do wymaganego zasięgu, planowanie punktów oraz czasu ładowania.

Schemat blokowy algorytmu wyznaczającego energochłonność pojazdu z napędem elektrycznym należy zbudować na podstawie analizy zmiennych zależnych i niezależnych mających wpływ na energochłonność pojazdu.

Przy analizie energochłonności należy uwzględnić wartości sił działających na pojazd podczas jego ruchu.

W pierwszej kolejności konieczne jest wyliczenie z charakterystyki prędkościowej średniej prędkości pojazdu. Średnia prędkość posłuży do wyznaczenia siły oporu powietrza, dla uproszczenia przyjętej jako stała dla całej trasy.

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho_p \cdot C_x \cdot A_t \cdot V_{sr}^2 \quad (2.1)$$

W następnej kolejności konieczne jest obliczenie średniej siły oporu bezwładności, wynikającej z profilu prędkości dla ustalonej trasy.

Z danych zawartych w profilu prędkości realizowanym przez pojazd z napędem elektrycznym należy wyznaczyć charakterystykę przyspieszeń, która posłuży do wyznaczenia siły oporu bezwładności F_b . Na podstawie średniego kąta nachylenia drogi, wyznaczonego z charakterystyki ukształtowania terenu należy obliczyć średnie siły oporu toczenia i oporu wzniesienia dla ustalonej trasy.

W przypadku analizowanej trasy, która zaczyna i kończy się w tym samym punkcie, a także jej przebieg jest lustrzany w obu kierunkach, średni kąt określający ukształtowanie terenu wynosi zero. Ze względu na to wartości sił oporu toczenia oraz oporu wzniesienia są następujące:

$$F_t = \mu \cdot (m_w + m_p) \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (2.2)$$

$$F_w = (m_w + m_p) \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.3)$$

Kolejną siłą oddziałyującą na autobus jest siła bezwładności, której wartość definiuje się jako średnia arytmetyczna tej siły dla każdego elementarnego punktu na charakterystyce prędkościowej. Ważnym aspektem jest zdefiniowanie wartości tej siły podczas hamowania, tj. gdy $a < 0$.

$$F_b = \begin{cases} (m_w + m_p) \cdot a \cdot \delta & \text{dla } a \geq 0 \\ (m_w + m_p) \cdot a \cdot \delta \cdot \eta_p \cdot \eta_s \cdot \eta_h & \text{dla } a < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

gdzie:

η_p – sprawność przekładni,

η_s – sprawność silnika,

η_h – sprawność odzysku energii z hamowania.

Po zsumowaniu czterech wyznaczonych sił jednostkowych oraz przemnożeniu otrzymanej wielkości siły wypadkowej przez średnią prędkość, otrzymuje się moc na kołach potrzebną do poruszania pojazdu z zadaną prędkością P_k .

$$P_k = (F_n + F_w + F_p + F_b) \cdot V_{sr} \quad (2.5)$$

Na podstawie równania (3.5.) oraz czasowego przebiegu prędkości pojazdu należy w przybliżony sposób określić ilość potrzebnej energii na pokonanie odcinka drogi. Znając wartość energii skumulowanej w bateriach autobusu można wyliczyć maksymalny zasięg jaki będzie w stanie pokonać na założonej trasie.

Energia pobrana z akumulatora dostarczana jest do kół poprzez silnik i przekładnię, dlatego też obliczając moc całkowitą należy uwzględnić straty występujące w całym układzie. Moc pobierana z akumulatora na pokonanie przez pojazd określonej trasy z zadaną prędkością należy wyznaczyć ze wzoru:

$$P_{ak} = \frac{P_k}{\eta_p \cdot \eta_s} \quad (2.6)$$

gdzie:

η_p – sprawność przekładni,

η_s – sprawność przekładni.

Dzieląc otrzymaną wartość przez wartości napięcia dla układów zasilania i napędowego, otrzymuje się chwilową wartość prądu.

$$I_{ak} = \frac{P_{ak}}{U_{ak}} \quad (2.7)$$

Na podstawie wartości prądu pobieranego z akumulatorów na potrzeby ruchu można określić czas jazdy na jaki wystarczy zgromadzonej energii w akumulatorach. Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż wartość pojemności oraz energii akumulatorów należy pomniejszyć o przyjętą wartość dopuszczalnego poziomu rozładowania (Q_{min}).

$$t = \frac{Q_{ak} \cdot (100\% - Q_{min})}{I_{ak}} \quad (2.8)$$

Na podstawie przyjętych założeń, przedstawiony model matematyczny dla ruchu jednostajnego, przy wyznaczonej średniej prędkości pojazdu pozwala obliczyć maksymalny zasięg jaki pokona pojazd w określonych warunkach.

$$s = V_{sr} \cdot t \quad (2.9)$$

W bilansie energetycznym należy uwzględnić czynniki nie związane z ruchem pojazdu. Przykładem tych czynników są dodatkowe odbiorniki w postaci urządzeń elektrycznych zainstalowanych w autobusie, takie jak: oświetlenie zewnętrzne, kierunkowskazy, oświetlenie wewnętrzne, silniki wycieraczek, ogrzewanie lusterek, informacja pasażerska, tablice kierunkowe, zasilanie kasowników i biletomatów, zasilanie urządzeń monitorujących oraz wspomagających układ kierowniczy, kompresor powietrza.

Największą część poboru mocy przez odbiorniki dodatkowe stanowią systemy ogrzewania i klimatyzacji, których moce osiągają nawet kilkanaście kilowatów. Praktycznie żadne z wymienionych urządzeń nie pracują bez przerwy, bo dla przykładu klimatyzację stosuje się jedynie w okresie letnim, a ogrzewanie jest eksploatowane najbardziej w zimie oraz w znacznie mniejszym stopniu wiosną i jesienią. Dlatego ważnym jest określenie w miarę rzeczywistych założeń co do procentowej pracy. Po uśrednieniu w skali roku wartość poboru energii skumulowano do postaci jednego wskaźnika opisującego wymienione dodatkowe urządzenia. Dla ułatwienia wskaźnik ten wyraża się w jednostce kWh/km, jako wielkość zwiększającą kilometrowe zużycie energii.

W celu uwzględnienia wartości zużycia dodatkowego należy wyliczyć kilometrowe zużycie energii wynikające z przemieszczania się autobusu dla wyznaczenia zasięgu:

$$Z_s = \frac{E_{ak}}{s} \quad (2.10)$$

Otrzymany zasięg jest wartością cząstkową wynikającą z analizy energochłonności jazdy. Zużycie energii układu jezdnego wynosi:

$$Z_s = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min})}{s} \quad (2.11)$$

Do obliczonej w ten sposób wartości należy dodać kilometrową wartość energii przeznaczoną na urządzenia dodatkowe.

W rzeczywistości zasięg nie jest stały i zależy między innymi od pory roku.

$$Z_{sc} = Z_s + Z_d \quad (2.12)$$

Z badań przeprowadzonych przez firmę Ursus parametr ten został wyznaczony i przyjęty jako wartość 0,4 kWh/km.

Na podstawie otrzymanego zużycia całkowitego obliczono rzeczywisty zasięg dla badanego pojazdu elektrycznego zgodnie ze wzorem 2.13.

$$s_c = \frac{E_{ak}}{Z_{sc}} \quad (2.13)$$

$$s_c = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min})}{Z_{sc}} \quad (2.14)$$

Nieodzowną częścią badań homologacyjnych pojazdów jest test sprawności energetycznej oraz analizowanie autobusu pod względem jego kosztów eksploatacyjnych, a w szczególności okresu eksploatacji akumulatorów. Podczas testów tego typu wyznacza się podstawowe parametry:

- kilometrowe zużycie energii wyrażone w kWh/km

$$Z_{sc} = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min})}{s_c} \quad (2.15)$$

- godzinowe zużycie energii wyrażone w kWh/h

$$Z_{tc} = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min}) \cdot V_{\dot{s}r}}{s_c} \quad (2.16)$$

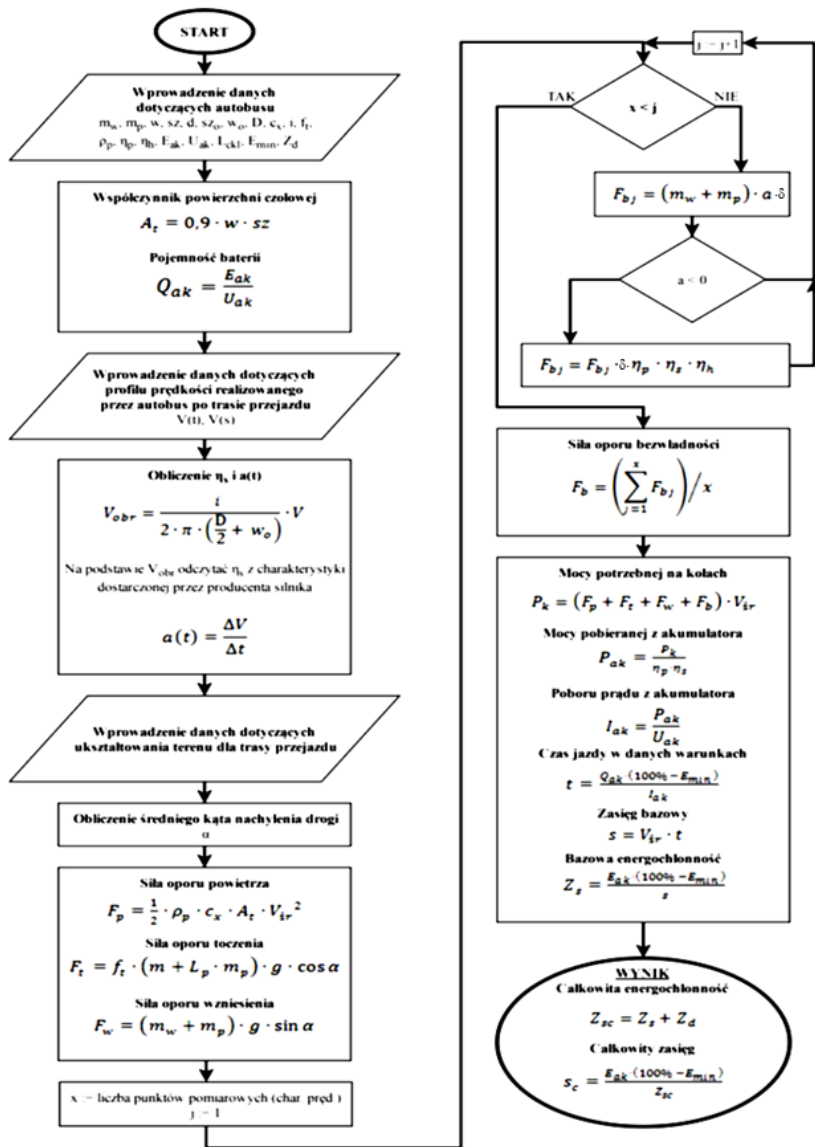
- kilometrową żywotność baterii wyrażoną w km

$$\dot{Z}_s = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min}) \cdot L_{ckl}}{Z_{sc}} \quad (2.17)$$

- godzinową żywotność baterii wyrażoną w roboczogodzinach

$$\dot{Z}_t = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min}) \cdot L_{ckl}}{Z_{tc}} \quad (2.18)$$

Schemat blokowy algorytmu wyznaczającego energochłonność pojazdu z napędem elektrycznym przedstawia rysunek 2.1. (patrz rys. na s.40)



Rys. 2.1. Schemat blokowy algorytmu realizującego symulację energochłonności autobusu

2.2. Model symulacyjny zmian energochłonności autobusu

W tabeli 2.1. przedstawiono dane do matematycznego modelu umożliwiającego symulację energochłonności autobusu elektrycznego EkoVolt. Zestawienie obejmuje dane techniczne pojazdu oraz wyniki pomiarów z przejazdu testowego.

Tabela 2.1. Zestawienie parametrów najbardziej istotnych podczas symulacji

Parametr	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Średnia prędkość	V_{sr}	19,8	km/h
		5,5	m/s
Masa własna pojazdu	m_w	12000	kg
Masa pasażerów (przyjęta średnia liczba = 40)	m_p	3000	kg
Wysokość pojazdu	w	3,1	m
Szerokość pojazdu	sz	2,55	m
Współczynnik czołowego oporu aerodynamicznego	C_x	0,7	–
Przełożenie całkowite przekładni	i	6,2	–
Współczynnik oporu toczenia	f_t	0,007	–
Gęstość powietrza	ρ_p	1,2	kg/m ³
Średni kąt nachylenia drogi	α	0	°
Współczynnik powierzchni czołowej	A_t	7,11	m ²
Współczynnik mas wirujących	δ	1,04	–
Sprawność przekładni	η_p	95%	–
Sprawność silnika	η_s	87%	–
Sprawność odzysku z hamowania	η_h	59%	–
Energia baterii	E_{ak}	120	kWh
Napięcie baterii	U_{ak}	500	V
Pojemność baterii	Q_{ak}	240	Ah
Żywotność baterii	L_{ckl}	3600	cykle
Dopuszczalny poziom rozładowania	Q_{min}	10%	–

Analizę energochłonności przeprowadzono przy wyznaczeniu wartości sił działających na pojazd podczas jego ruchu. Na podstawie danych z tabeli wyznaczono siłę oporu powietrza, wartości sił oporu toczenia oraz oporu wzniesienia oraz siły podczas przyspieszania i hamowania pojazdu:

$$F_p = \frac{1}{2} \cdot \rho_p \cdot C_x \cdot A_t \cdot V^2 = 90,53 \text{ N} \quad (2.19)$$

$$F_t = f_t \cdot (m_w + m_p) \cdot g \cdot \cos \alpha = 839,49 \text{ N} \quad (2.20)$$

$$F_w = (m_w + m_p) \cdot g \cdot \sin \alpha = 0 \text{ N} \quad (2.21)$$

$$F_b = \begin{cases} (m_w + m_p) \cdot a \cdot \delta & \text{dla } a \geq 0 \\ (m_w + m_p) \cdot a \cdot \delta \cdot \eta_p \cdot \eta_s \cdot \eta_h & \text{dla } a < 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\overline{F_b} = 1314,9 \text{ N} \quad (2.23)$$

Po wyznaczeniu wartości podstawowych sił należy je zsumować i pomnożyć przez średnią prędkość dla wyznaczenia wartości mocy na kołach potrzebnej do poruszania pojazdu z tą prędkością.

$$P_k = (F_p + F_t + F_w + F_b) \cdot V_{sr} = 12356,66 \text{ W} \quad (2.24)$$

Dla otrzymania całkowitej mocy pobranej przez silnik z akumulatora, należy otrzymaną wartość pomniejszyć o straty w przekładni i silniku.

$$P_{ak} = \frac{P_k}{\eta_p \cdot \eta_s} = 14930,73 \text{ W} \quad (2.25)$$

Pobór prądu z akumulatora wynosi:

$$I_{ak} = \frac{P_{ak}}{U_{ak}} = 29,86 \text{ A} \quad (2.26)$$

Na podstawie wartości chwilowej prądu pobieranego z akumulatorów na potrzeby ruchu określono czas jazdy na jaki wystarczy energii zgromadzonej w akumulatorach. Pojemność akumulatora należy pomniejszyć o przyjętą wartość dopuszczalnego poziomu rozładowania (Q_{min}).

$$t = \frac{Q_{ak} \cdot (100\% - Q_{min})}{I_{ak}} = 7,23 \text{ h} \quad (2.27)$$

Maksymalny zasięg dla wyznaczonej prędkości określa wzór:

$$s = V_{sr} \cdot t = 143,33 \text{ km} \quad (2.28)$$

Otrzymany zasięg jest wartością cząstkową wynikającą z analizy energochłonności jazdy. Zużycie energii układu jeźdnego wynosi:

$$Z_s = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min})}{s} = 0,75 \text{ kWh/km} \quad (2.29)$$

Do zużycia należy dodać pobór energii przez urządzenia dodatkowe. W rzeczywistości zasięg nie jest stały lecz powiększony o wartość 0,4 kWh/km.

$$Z_{sc} = Z_s + Z_d = 1,15 \text{ kWh/km} \quad (2.30)$$

Całkowity zasięg autobusu elektrycznego wynosi:

$$s_c = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min})}{Z_{sc}} = 93,63 \text{ km} \quad (2.31)$$

Podstawowe parametry testów podczas badań określają wzory:

- kilometrowe zużycie energii

$$Z_{sc} = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min})}{s_c} = 1,15 \text{ kWh/km} \quad (2.32)$$

- godzinowe zużycie energii

$$Z_{tc} = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min}) \cdot V_{sr}}{s_c} = 22,86 \text{ kWh/h} \quad (2.33)$$

- kilometrowa żywotność baterii

$$\dot{Z}_s = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min}) \cdot L_{ckl}}{Z_{sc}} = 337064 \text{ km} \quad (2.34)$$

- godzinowa żywotność baterii

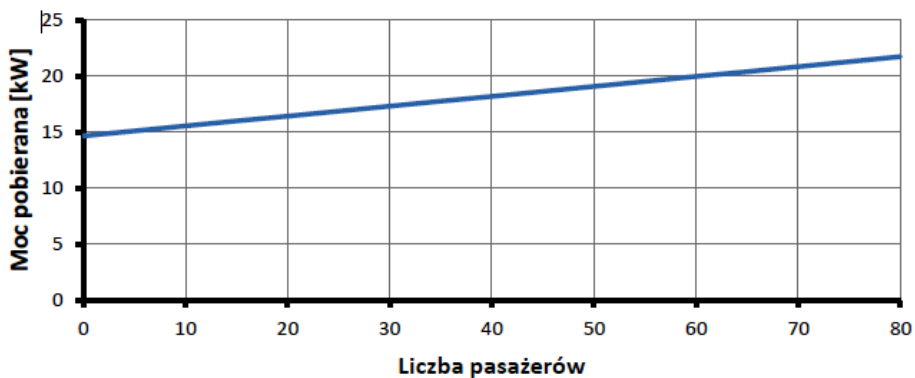
$$\dot{Z}_t = \frac{E_{ak} \cdot (100\% - Q_{min}) \cdot L_{ckl}}{Z_{tc}} = 17010 \text{ h} = 708,75 \text{ dni} = 1,94 \text{ lat} \quad (2.35)$$

2.3. Model symulacyjny energochłonności autobusu elektrycznego dla zmiennego obciążenia

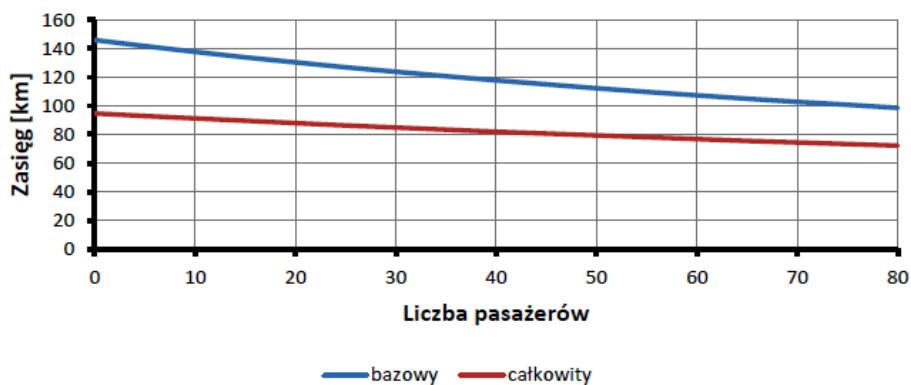
Do przedstawionych w rozdziale 2.2. obliczeń, przeprowadzono symulację energochłonności autobusu elektrycznego przy zmiennym obciążeniu dla różnej liczby pasażerów. W tabeli 2.2 zestawiono otrzymane wartości średniej mocy pobieranej przez silnik z akumulatora, zasięg oraz kilometrową energochłonność dla różnych obciążeń. Zależność mocy pobieranej przez silnik z akumulatora, zasięg oraz kilometrową energochłonność od obciążenia przedstawiają rysunki 2.2 i 2.4.

Tab. 2.2. Symulacja energochłonności przy zmiennym obciążeniu

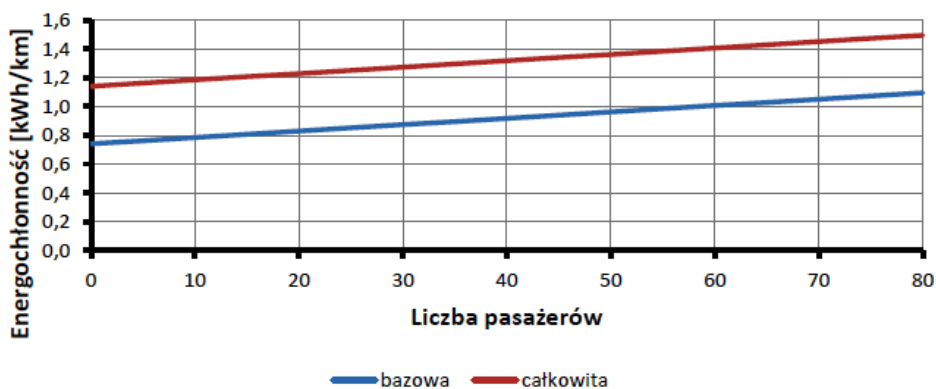
L_p [szt]	$m_w + m_p$ [kg]	P_{ak} [W]	s [km]	Z_s [kWh/km]	s_{sc} [km]	Z_{sc} [kwh/km]
0	12000	14667	145,91	0,74	94,72	1,14
5	12375	15107	141,66	0,76	92,91	1,16
10	12750	15546	137,66	0,78	91,17	1,18
15	13125	15986	133,87	0,81	89,50	1,21
20	13500	16425	130,29	0,83	87,88	1,23
25	13875	16865	126,90	0,85	86,32	1,25
30	14250	17304	123,67	0,87	84,82	1,27
35	14626	17744	120,61	0,90	83,37	1,30
40	15000	18183	117,69	0,92	81,97	1,32
45	15375	18623	114,92	0,94	80,61	1,34
50	15750	19062	112,27	0,96	79,30	1,36
55	16125	19502	109,74	0,98	78,02	1,38
60	16500	19941	107,32	1,01	76,79	1,41
65	16875	20381	105,00	1,03	75,60	1,43
70	17250	20820	102,79	1,05	74,45	1,45
75	17625	21260	100,66	1,07	73,32	1,47
80	18000	21699	98,62	1,10	72,24	1,50



Rys. 2.2. Zależność mocy pobieranej przez silnik z akumulatora od obciążenia



Rys. 2.3. Zależność zasięgu od obciążenia

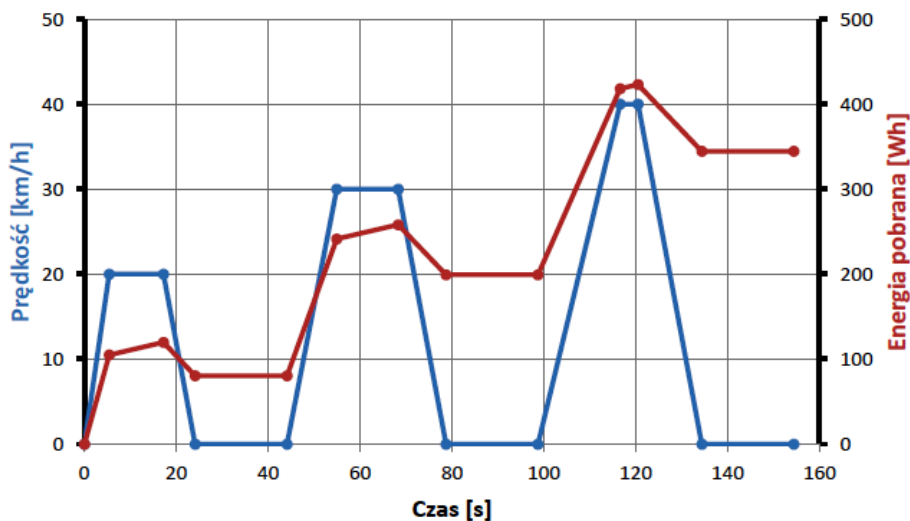


Rys. 2.4. Zależność kilometrowej energochłonności od obciążenia

2.4. Symulacja zasięgu autobusu elektrycznego dla testów SORT

Na podstawie uproszczonego modelu matematycznego przeprowadzono symulację energochłonności autobusu EkoVolt dla przyjętej trasy. Do obliczeń niezbędne są charakterystyki prędkościowe silnika i nachylenia drogi. Dla testów SORT przyjmuje się prowadzenie badań na płaskiej drodze. Do obliczeń wykorzystywany jest przebieg prędkości w funkcji czasu na podstawie którego określona zostaje średnia wartość siły oporu bezwładności. Uproszczeniem w modelu jest brak konieczności dołączania współczynnika zużycia energii przez urządzenia dodatkowe, gdyż w wytycznych dotyczących testu można znaleźć punkt, który mówi o konieczności wyłączenia wszystkich dodatkowych odbiorników (np. klimatyzacji czy ogrzewania). W założeniach dotyczących metodyki testów SORT określa się, że podczas przejazdu pomiarowego pojazd obciążony jest masą równą połowie dopuszczalnej ładowności. W przedstawionych symulacjach przyjęto ilość pasażerów równą 40, co odpowiada masie 3000 kg. Na rysunkach 2.5 do rys. 2.7. przedstawiono profile prędkości oraz pobór energii dla trzech testów SORT. W tabelach 2.3. do 2.5 przedstawiono punkty charakterystyczne trasy dla poszczególnych testów SORT.

SORT 1



Rys. 2.5. Profil prędkości oraz pobór energii dla testu SORT 1

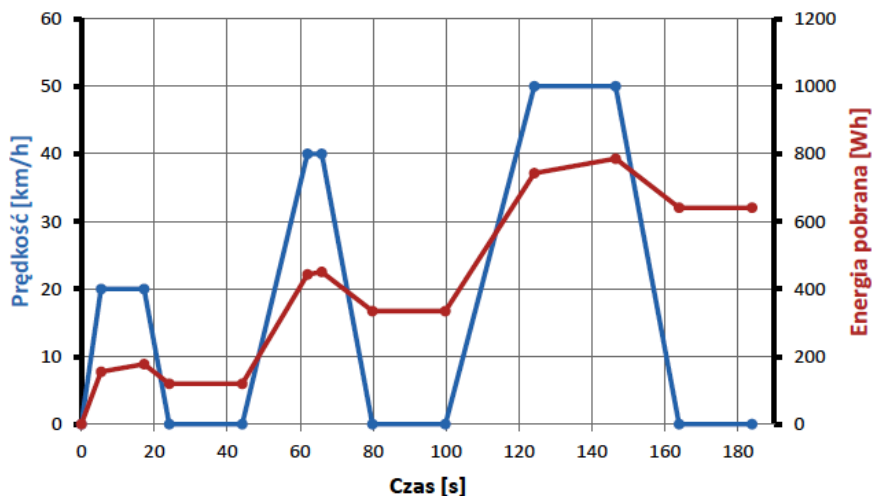
Tab. 2.3. Punkty charakterystyczne trasy SORT 1

s	t	V	a	V_{obr}	η_s	F_b	E_{pob}
[m]	[s]	[km/h]	[m/s]	[obr/min]	%	[N]	[Wh]
0	0,0	0	0,00	0	60%	0	0
15	5,4	20	1,03	688	88%	15432	105
81	17,2	20	0,00	688	88%	0	120
100	24,1	0	-0,81	0	60%	-5894	80
100	44,1	0	0,00	0	60%	0	80
145	54,9	30	0,77	1032	93%	11574	241
257	68,3	30	0,00	1032	93%	0	258
300	78,7	0	-0,80	0	60%	-5866	199
300	98,7	0	0,00	0	60%	0	199
400	116,6	40	0,62	1376	93%	9311	418
443	120,5	40	0,00	1376	93%	0	423
520	134,4	0	-0,80	0	60%	-5852	345
520	154,4	0	0,00	0	60%	0	345

Wyniki otrzymane dla testu SORT 1:

- średnia prędkość: 12,1 km/h,
- średnia sprawność: 83%,
- średnia siła oporu bezwładności: 1243,4 N,
- średnia moc pobierana przez silnik z akumulatora: 8089,5 W,
- zasięg: **161,5 km**,
- kilometrowa energochłonność: **0,67 kWh/km**,
- godzinowa energochłonność: 12,93 kWh/h,
- przewidywany przebieg eksploatacji baterii: 363857 km,
- przewidywany okres eksploatacji baterii: 30071 h.

SORT 2



Rys. 2.6. Profil prędkości oraz pobór energii dla testu SORT 2

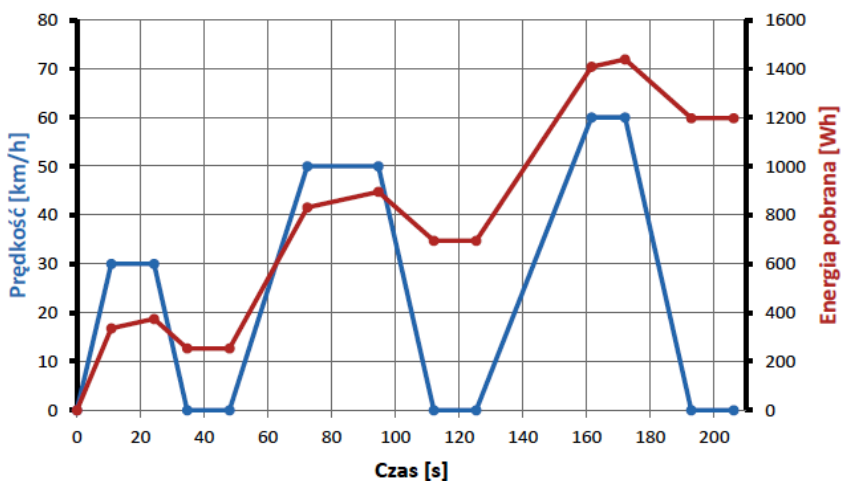
Tab. 2.4. Punkty charakterystyczne trasy SORT 2

s	t	V	a	V_{obr}	η_s	F_b	E_{pob}
[m]	[s]	[km/h]	[m/s]	[obr/min]	%	[N]	[Wh]
0	0,0	0	0,00	0	60%	0	0
15	5,4	20	1,03	688	88%	15432	155
81	17,2	20	0,00	688	88%	0	178
100	24,1	0	-0,81	0	60%	-5955	120
100	44,1	0	0,00	0	60%	0	120
200	62,0	40	0,62	1376	93%	9311	443
243	65,9	40	0,00	1376	93%	0	450
320	79,8	0	-0,80	0	60%	-5912	335
320	99,8	0	0,00	0	60%	0	335
489	124,2	50	0,57	1719	92%	8538	743
799	146,5	50	0,00	1719	92%	0	786
920	163,9	0	-0,80	0	60%	-5904	641
920	183,9	0	0,00	0	60%	0	641

Wyniki otrzymane dla testu SORT 2:

- średnia prędkość: 18 km/h,
- średnia sprawność: 84%,
- średnia siła oporu bezwładności: 1263,4 N,
- średnia moc pobierana przez silnik z akumulatora: 12693,9 W,
- zasięg: **153,14 km**,
- kilometrowa energochłonność: **0,71 kWh/km**,
- godzinowa energochłonność: 19,89 kWh/h,
- przewidywany przebieg eksploatacji baterii: 351786 km,
- przewidywany okres eksploatacji baterii: 19544 h.

SORT 3



Rys. 2.7. Profil prędkości oraz pobór energii dla testu SORT 3

Tab. 2.5. Punkty charakterystyczne trasy SORT 3

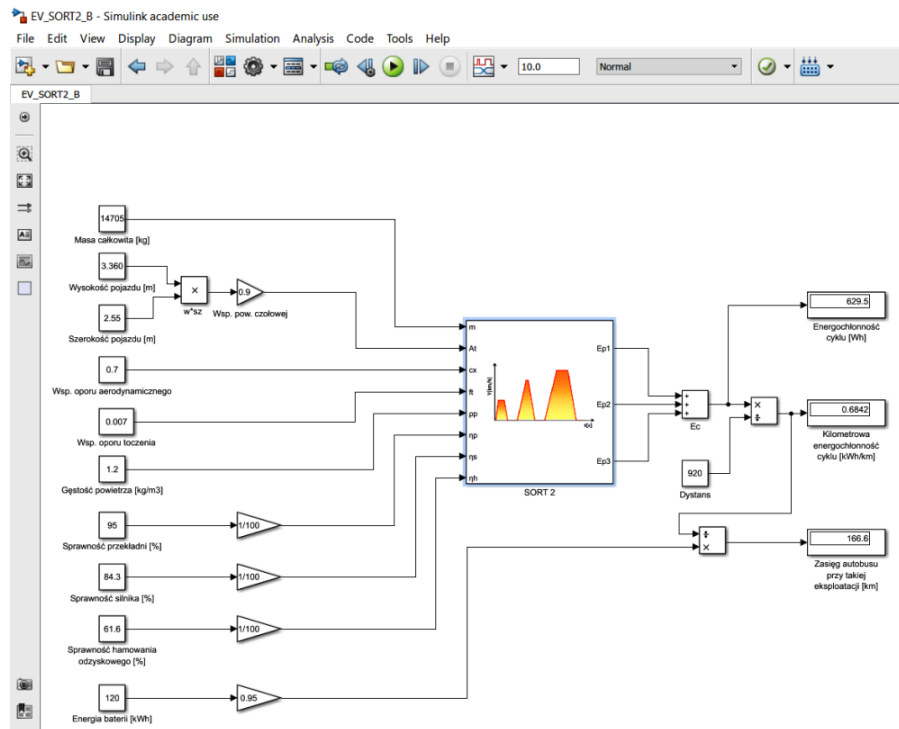
s	t	V	a	V_{obr}	η_s	F_b	E_{pob}
[m]	[s]	[km/h]	[m/s]	[obr/min]	%	[N]	[Wh]
0	0,0	0	0,00	0	60%	0	0
45	10,8	30	0,77	1032	93%	11574	336
157	24,2	30	0,00	1032	93%	0	374
200	34,6	0	-0,80	0	60%	-5931	254
200	47,9	0	0,00	0	60%	0	254
369	72,3	50	0,57	1719	92%	8538	831
679	94,6	50	0,00	1719	92%	0	895
800	112,0	0	-0,80	0	60%	-5908	695
800	125,3	0	0,00	0	60%	0	695
1102	161,5	60	0,46	2063	91%	6906	1408
1276	172,0	60	0,00	2063	91%	0	1438
1450	192,8	0	-0,80	0	60%	-5931	1197
1450	206,1	0	0,00	0	60%	0	1197

Wyniki otrzymane dla testu SORT 3:

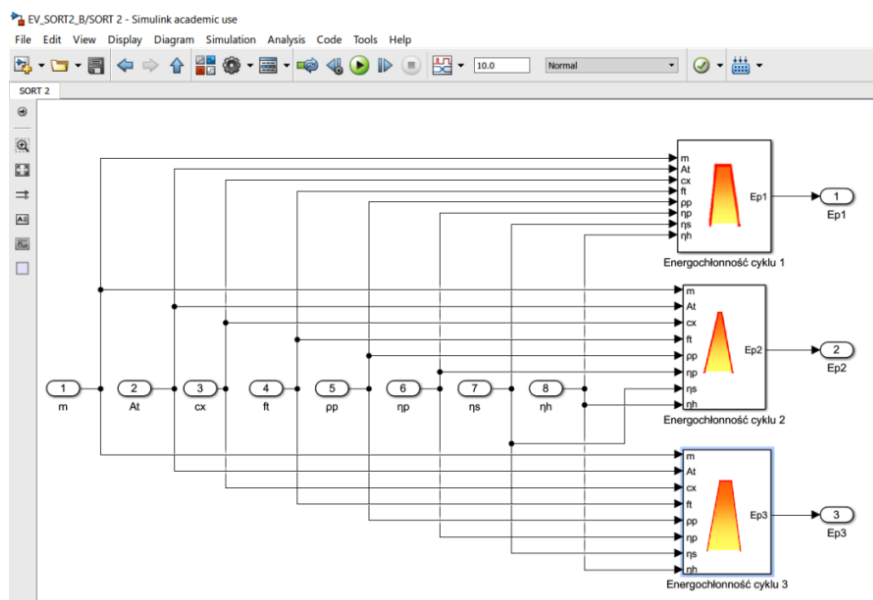
- średnia prędkość: 25,3 km/h,
- średnia sprawność: 84%,
- średnia siła oporu bezwładności: 1433,7 N,
- średnia moc pobierana przez silnik z akumulatora: 21156 W,
- zasięg: **129,15 km**,
- kilometrowa energochłonność: **0,84 kWh/km**,
- godzinowa energochłonność: 31,28 kWh/h,
- przewidywany przebieg eksploatacji baterii: 314511 km,
- przewidywany okres eksploatacji baterii: 12431 h.

2.5. Algorytm realizujący obliczenia energochłonności oraz zasięgu autobusu w programie MATLAB Simulink

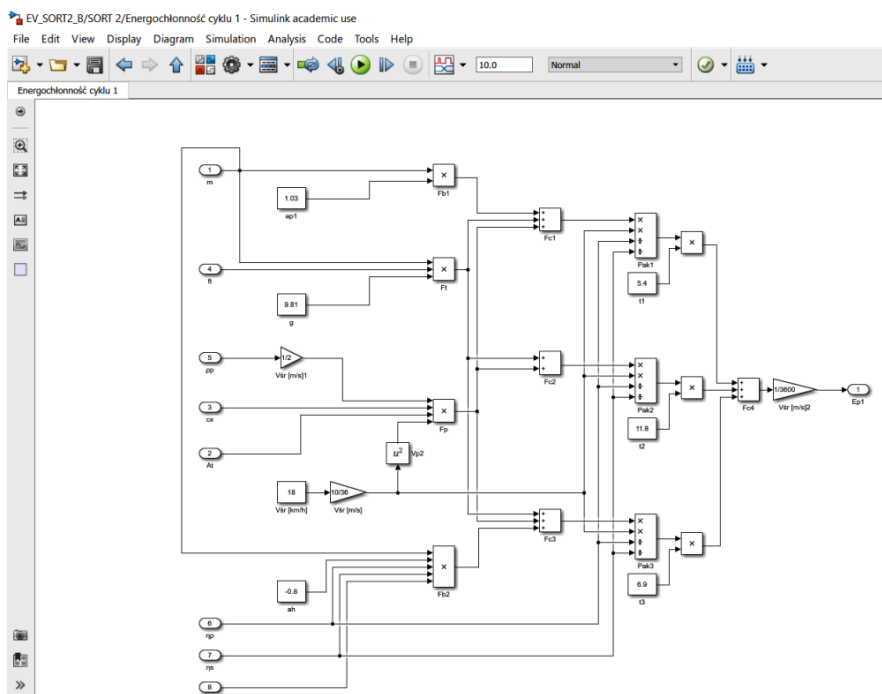
Weryfikację otrzymanych wyników obliczeń energochłonności dla poszczególnych testów SORT przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania matematycznego MATLAB Simulink. Opracowany model obliczeń energochłonności uwzględnia trzy elementy profili, z których składa się każdy test typu SORT. Na rysunkach 2.8.–2.12. (patrz na s. 49, 50, 51) przedstawiono budowę modelu wyznaczającego energochłonność profilu wg testu SORT 2, w którym pojazd rozpędza się z przyspieszeniem równym $1,03 \text{ m/s}^2$ przez 5,4 s, aż do osiągnięcia prędkości 20 km/h, którą następnie utrzymuje przez 17,2 s, a następnie hamuje z opóźnieniem $0,8 \text{ m/s}^2$. Danymi wejściowymi są: masa całkowita pojazdu m , współczynnik powierzchni czołowej A_f (wyliczany na podstawie podanej geometrii pojazdu – wysokość w i szerokość sz), współczynnik oporu aerodynamicznego C_x , współczynnik oporu toczenia f_t , gęstość powietrza ρ_p , sprawność przekładni η_p , sprawność silnika η_s oraz sprawność hamowania odzyskowego η_h . Obliczenia dla pozostałych profili wykonuje się w sposób analogiczny.



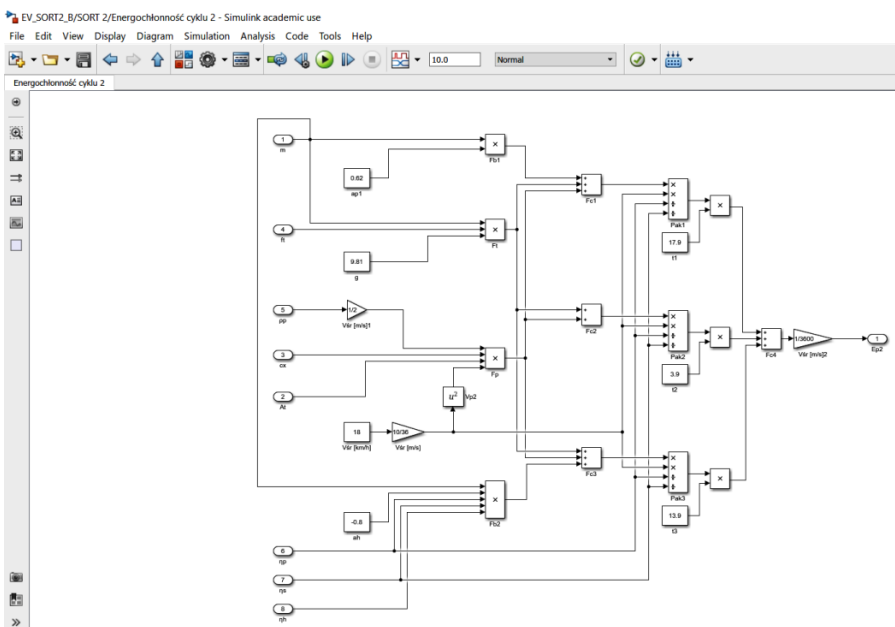
Rys. 2.8. Model obliczeniowy energochłonności testu SORT 2



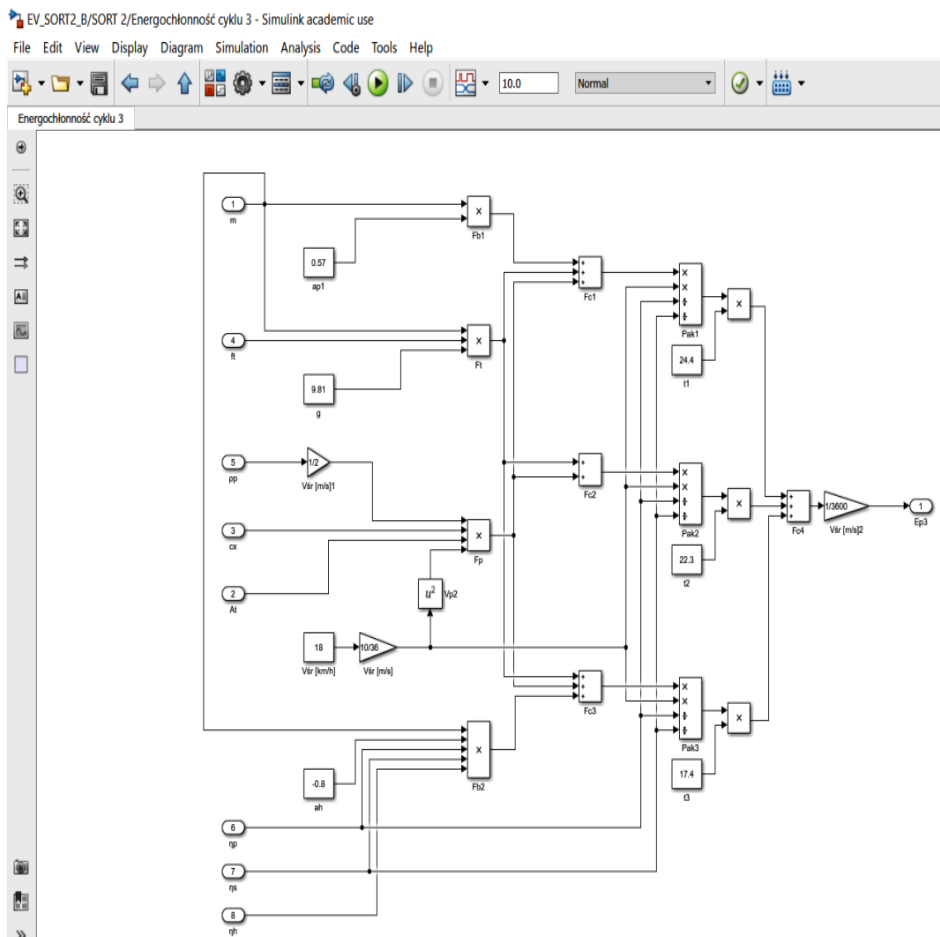
Rys. 2.9. Model energochłonności dla trzech profili testu SORT 2



Rys. 2.10. Model energochłonności dla pierwszego profilu testu SORT 2



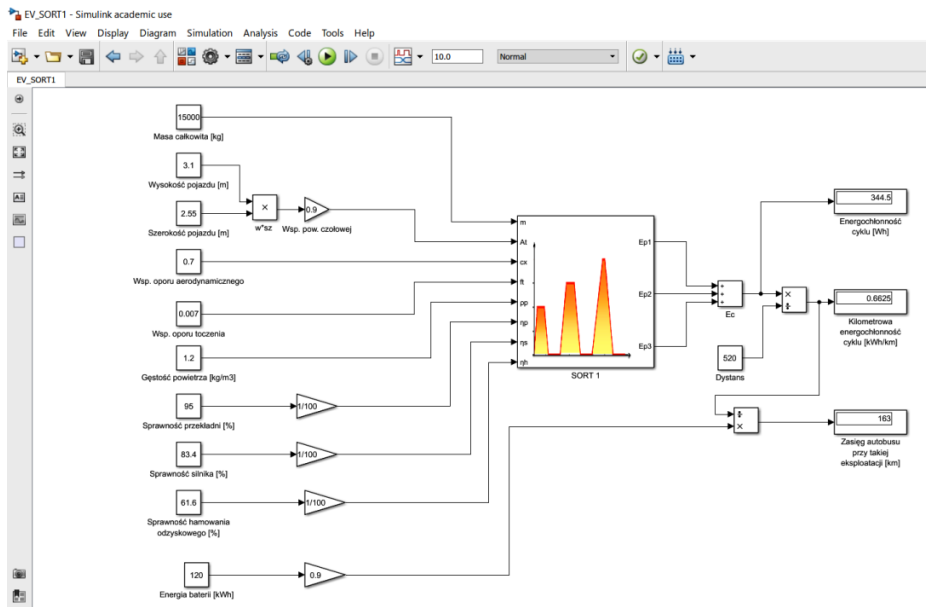
Rys. 2.11. Model energochłonności dla drugiego profilu testu SORT 2



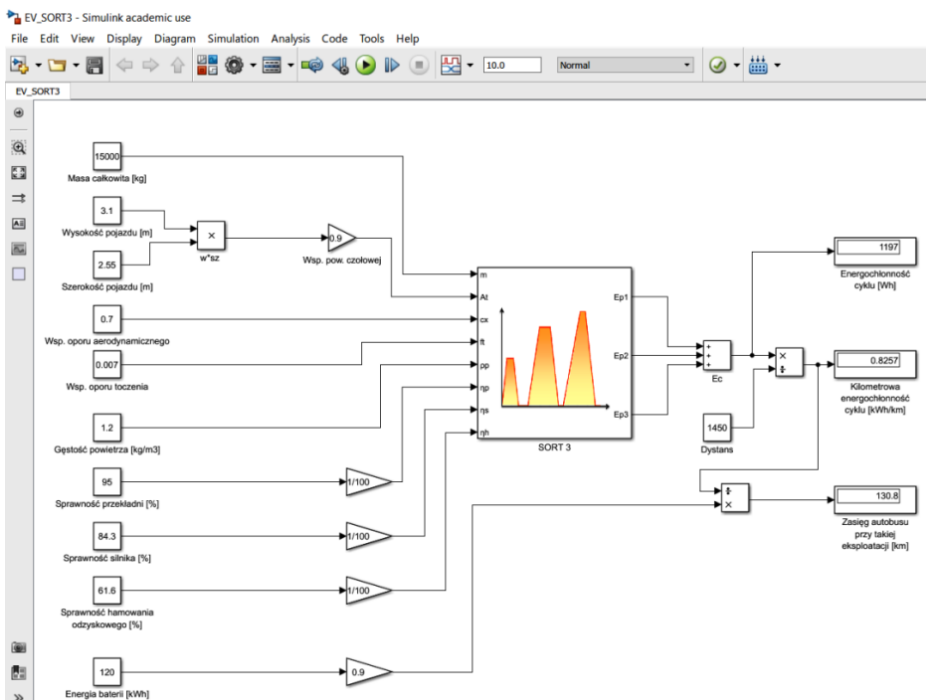
Rys. 2.12. Model energochłonności dla trzeciego profilu testu SORT 2

Otrzymane obliczenia energochłonności dla poszczególnych odcinków elementarnych sumuje się w celu wyznaczenia energochłonności całego cyklu.

Poprzez podzielenie energochłonności przez długość odcinka pomiarowego otrzymuje się kilometrową energochłonność, na podstawie której określa się maksymalny zasięg, jaki jest w stanie pokonać badany pojazd przy założonych warunkach eksploatacji. Przykładowe wyniki symulacji dla dwóch wybranych testów SORT przedstawiono na rysunku 2.13. i 2.14. (patrz na s. 52). Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić zgodność z otrzymanymi wynikami dla punktów charakterystycznych poszczególnych testów SORT. Minimalne rozbieżności wynikają z przyjętych sposobów zaokrąglania oraz dokładności wykorzystanych programów.



Rys. 2.13. Widok modelu MATLAB energochłonności dla testu SORT 1 oraz otrzymane wyniki



Rys. 2.14. Widok modelu MATLAB energochłonności dla testu SORT 3 oraz otrzymane wyniki

2.6. Model matematyczny energochłonności dla trzech faz ruchu

Algorytm obliczeniowy energochłonności dla trzech faz ruchu został opracowany na podstawie równań przedstawionych w monografiach profesora Wojciecha Siłki [35–38]. Na podstawie równań przedstawionych w tych publikacjach energochłonność rozpatrywana jest dla trzech faz ruchu: oddzielnie dla ruchu ze stałym przyspieszeniem, ustalonego oraz opóźnionego.

W celu opracowania modelu obliczeniowego wykorzystano równania: Energochłonność ruchu ze stałą wartością przyspieszenia jest wyrażona wzorem:

$$(E_{op})_a = \frac{m \cdot g \cdot f_t \cdot (v_k^2 - v_p^2)}{2 \cdot a} + \frac{c_x \cdot A \cdot \varepsilon}{4 \cdot a} (v_k^4 - v_p^4) + \frac{m}{2} \cdot (v_k^2 - v_p^2) \quad (2.36)$$

gdzie:

A – powierzchnia czołowa ściany przedniej pojazdu,

a – wartość przyspieszenia,

c_x – współczynnik kształtu,

f_t – współczynnik oporu toczenia,

g – przyspieszenie ziemskie,

m – masa badanego pojazdu,

ε – 1/2 wartości gęstości powietrza,

v_p, v_k – prędkość początkowa/końcowa fazy przyspieszania.

Energochłonność ruchu ze stałą prędkością po poziomym podłożu wyraża równanie (2.37):

$$(E_{op})_u = (m \cdot g \cdot f_t + c_x \cdot A \cdot \varepsilon \cdot v^2) \cdot L_u \quad (2.37)$$

gdzie:

v – prędkość.

Energię zużytą na przyrost wartości energii kinematycznej wyraża równanie:

$$E_k = m \cdot a_h \cdot L_h \quad (2.38)$$

gdzie:

L_h – długość drogi hamowania,

a_h – opóźnienie.

Energochłonność cyklu elementarnego przedstawiono za pomocą równania:

$$E_c = (E_{op})_a + (E_{op})_u + E_k - E_{odz} \quad (2.39)$$

Zaś w przypadku kompletnego testu jezdnego energochłonność jest wyrażana wzorem (2.40):

$$E_i = \sum_1^n E_n \quad (2.40)$$

gdzie:

n – liczba występujących cykli elementarnych.

Energochłonność ruchu ze stałą prędkością po drodze o wzdłużnym pochyleniu jezdni oblicza się przy pomocy wzoru (2.41), (patrz na s. 54):

$$(E_{op})_w = m \cdot g \cdot H \cdot (f_t \cdot ctg \alpha + 1) + K \cdot v^2 \cdot \frac{H}{\sin \alpha} \quad (2.41)$$

Siły hamujące ograniczające wzrost prędkości pojazdu podczas zjazdu z drogi o wzdłużnym pochyleniu jezdni oblicza się przy pomocy wzoru (2.42):

$$F_h = m \cdot g \cdot \sin \alpha - m \cdot g \cdot f_t \cdot \cos \alpha - K \cdot v^2 \quad (2.42)$$

Wartość rozproszonej energii podczas procesu hamowania ograniczającego prędkość w przypadku zjazdu z drogi o wzdłużnym pochyleniu jezdni oblicza przy pomocy wzoru (2.43):

$$(E_{op})_z = m \cdot g \cdot H \cdot (f_t \cdot ctg \alpha + 1) + K \cdot v^2 \cdot \frac{H}{\sin \alpha} \quad (2.43)$$

Energochłonność jednostkowa w przypadku kompletnego cyklu jezdni wyrażona jest wzorem (2.44):

$$\Phi_c = \frac{E_i}{m \cdot L_c} \quad (2.44)$$

gdzie:

L_c – droga cyklu.

Energochłonność przebiegowa w przypadku kompletnego cyklu jezdni wyrażona jest wzorem (3.45):

$$\psi = \frac{E_i}{L_c} \quad (2.45)$$

Do opracowania modelu wykorzystano równania Witolda Kobosa [22–23] służące do wyrażenia wartości sumarycznych strat występujących w pojazdach o napędzie elektrycznym oraz ilość odzyskanej energii w fazie hamowania odzyskowego z rekuperacją energii elektrycznej.

Równanie zawierające wartość sumarycznych strat występujących w pojazdach o napędzie elektrycznym, wywołanych ograniczoną sprawnością silnika elektrycznego, falownika, przekładni oraz przekształtnika napięcia [22] wyrażone jest wzorem (2.46):

$$\eta_E = \eta_n \cdot \eta_s \cdot \eta_f \cdot \eta_z \quad (2.46)$$

gdzie:

η_E – sumaryczne straty występujące w pojeździe o napędzie elektrycznym,

η_n – wartość sprawności układu przeniesienia napędu,

η_f – wartość sprawności falownika,

η_z – wartość sprawności przekształtnika napięcia,

η_s – wartość sprawności silnika elektrycznego.

Ilość odzyskanej energii w fazie hamowania odzyskowego z rekuperacją energii wyznacza się z wzoru (2.47):

$$E_{odz} = \eta_E \cdot \frac{m \cdot \delta \cdot v_p^2}{2} \quad (2.47)$$

gdzie:

v_p – prędkość początkowa,

δ – współczynnik mas wirujących.

Opracowany model energochłonności uwzględnia równania Tomasza Rudnickiego dzięki którym możliwe jest wyznaczenie zasięgu pojazdu z elektrycznym układem napędowym [98, 99].

Wartość siły oporu toczenia wyraża się za pomocą wzoru (2.48):

$$F_t = g \cdot f_t \cdot m \quad (2.48)$$

Wartość siły oporu powietrza wyraża się za pomocą wzoru (2.49):

$$F_p = c_x \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot A = 0,6 \cdot c_x \cdot A \cdot v^2 \quad (2.49)$$

gdzie:

ρ – wartość gęstości powietrza.

Wymaganą moc do ruszenia pojazdu wyraża się za pomocą wzoru (2.50):

$$N_k = (F_t + F_p) \cdot v \quad (2.50)$$

gdzie:

v – prędkość.

Moc na wale silnika elektrycznego wyrażana jest przy pomocy wzoru (2.51):

$$N_s = \frac{N_k}{\eta_p} \quad (2.51)$$

Moc pobierana z akumulatorów trakcyjnych wyraża się za pomocą wzoru:

$$N_{ak} = \frac{N_k}{\eta_s} \quad (2.52)$$

Zaś wartość prądu pobieranego z akumulatorów trakcyjnych wyrażana jest wzorem (2.53):

$$I_{ak} = \frac{N_{ak}}{U_{ak}} \quad (2.53)$$

gdzie:

U_{ak} – napięcie akumulatora trakcyjnego.

Zasięg pojazdu elektrycznego wyraża się za pomocą wzoru (2.54):

$$Z = v \cdot t = v \cdot \frac{Q_{ak}}{I_{ak}} \quad (2.54)$$

gdzie:

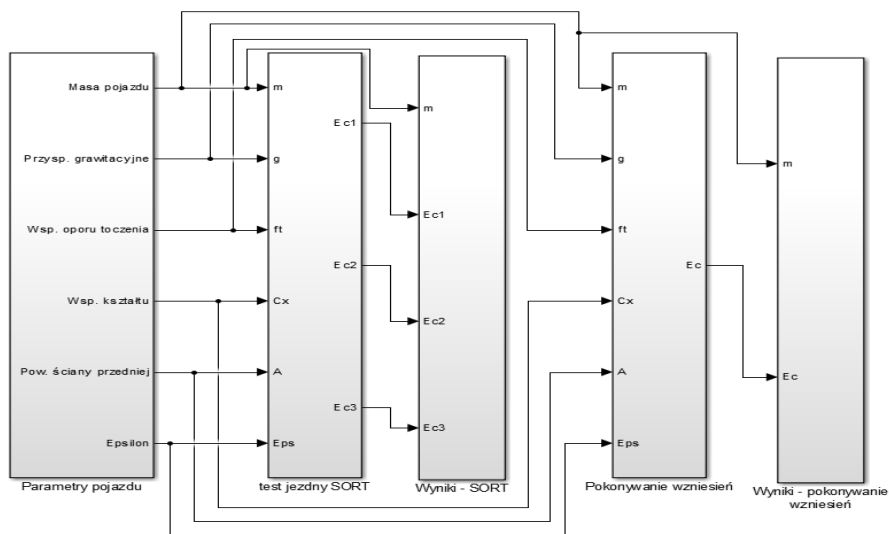
Q_{ak} – pojemność baterii trakcyjnych.

2.7. Algorytm realizujący obliczenia energochłonności trolejbusu w programie MATLAB Simulink dla testów SORT

Model obliczeniowy uwzględnia następujące parametry mające stałą wartość dla danego pojazdu oraz warunków badań:

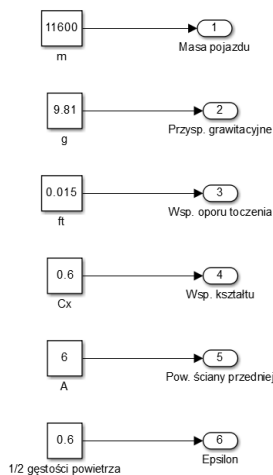
- masa pojazdu,
- współczynnik oporu toczenia,
- współczynnik kształtu,
- powierzchnia ściany przedniej,
- przyspieszenie grawitacyjne,
- gęstość powietrza,
- droga całkowita testu,
- sumaryczne straty wywołane ograniczoną sprawnością układu napędowego oraz poszczególnych elementów pojazdu,
- współczynnik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

Model nie uwzględnia pracy urządzeń dodatkowych pojazdu: klimatyzacji, ogrzewania, nawiewu, kasownika, drzwi oraz systemu informacji pasażerskiej. Ponadto nie uwzględniony jest wpływ temperatury otoczenia. W celu rozwinięcia modelu można dla powyższych warunków przyjąć stałe wartości i powiązać je z sumaryczną energochłonnością ruchu pojazdu. System główny stanowią rozwinięcie schematu modelu umożliwiające realizację poszczególnych funkcji. Model został nazwany „symulacja.slx” przedstawiony na rysunku 2.15. Podsystemy wchodzące w skład modelu obliczeniowego „symulacja.slx” stanowią rozwinięcie schematu modelu umożliwiające realizację wybranych funkcji.



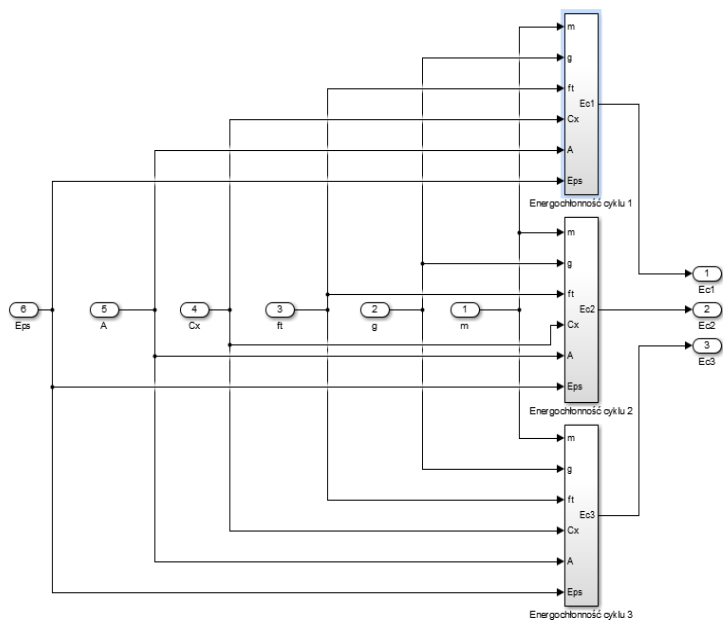
Rys. 2.15. Schemat systemu głównego modelu „symulacja.slx”

Podstawowe parametry badanego pojazdu takie jak: masa pojazdu, przyspieszenie grawitacyjne, współczynnik oporu toczenia, współczynnik kształtu oraz powierzchnia ściany przedniej wprowadzone są do podsystemu „Parametry pojazdu” (rys. 2.16.).



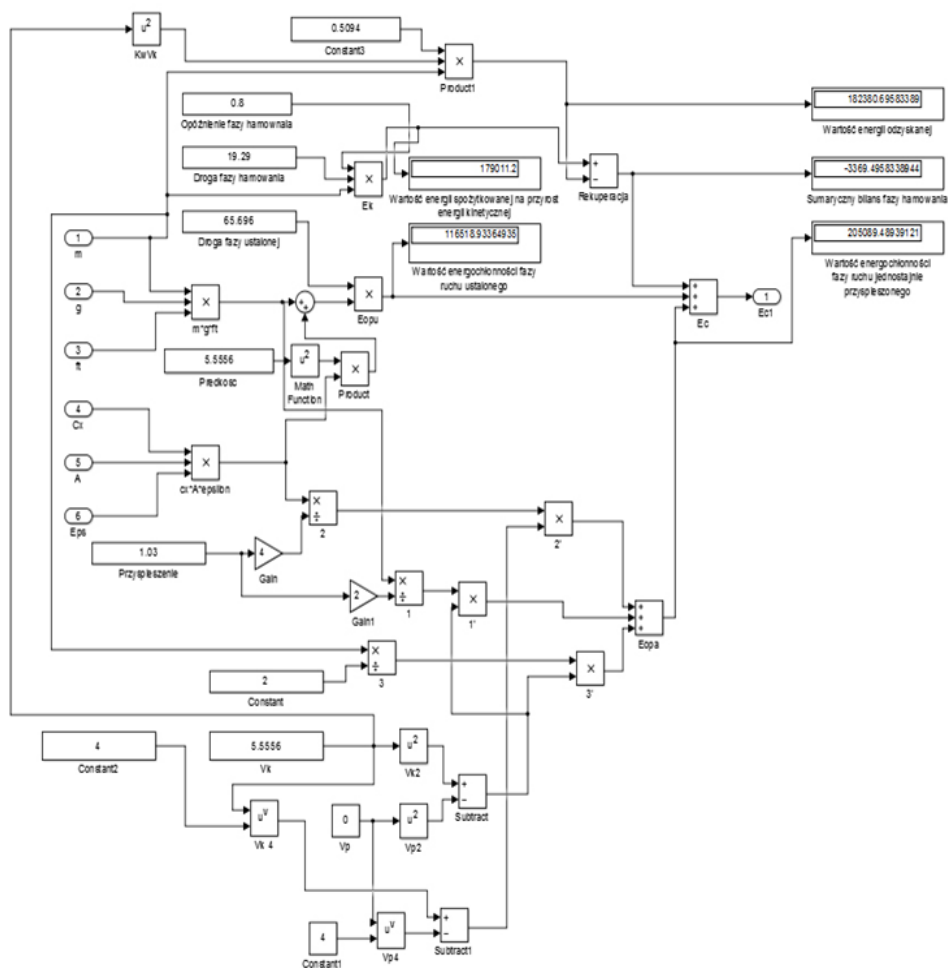
Rys. 2.16. Podsystem „Parametry pojazdu”

Podsystem „Test jezdny SORT” (rys. 2.17) obejmuje trzy profile testu SORT.



Rys. 2.17. Schemat podsystemu „Test jezdny SORT”

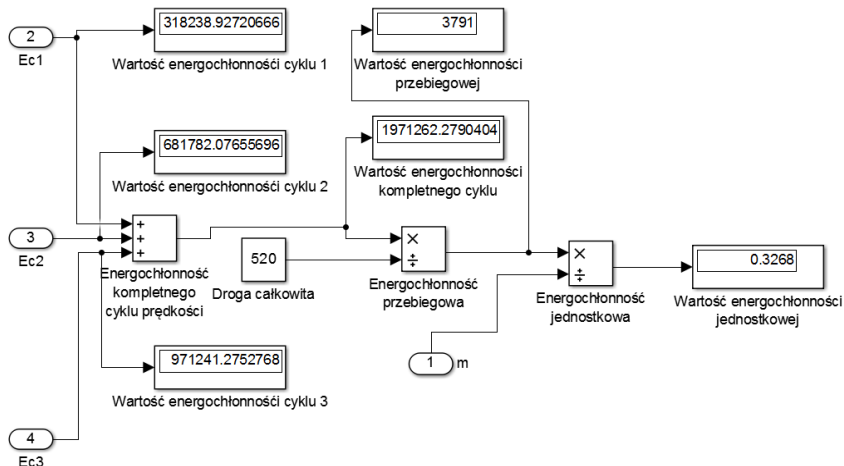
Podsystemy „Energochłonność cyklu 1”, „Energochłonność cyklu 2” oraz „Energochłonność cyklu 3” zostały przedstawione w celu oddzielenia każdego z cykli elementarnych testu SORT. Służą do wprowadzenia parametrów każdej z faz ruchu, czyli ruchu jednostajnie przyspieszonego, ruchu ze stałą prędkością oraz ruchu jednostajnie opóźnionego. Na podstawie parametrów obliczana jest energochłonność dla każdej z faz ruchu oraz ilość energii odzyskanej podczas hamowania rekuperacyjnego. Przykładowy podsystem „Energochłonność cyklu 1” został przedstawiony na rysunku 2.18. Podsystemy „Energochłonność dla cyklu 2” oraz „Energochłonność cyklu 3” zostały opracowane w analogiczny sposób.



Rys. 2.18. Schemat podsystemu „Cykl 1”

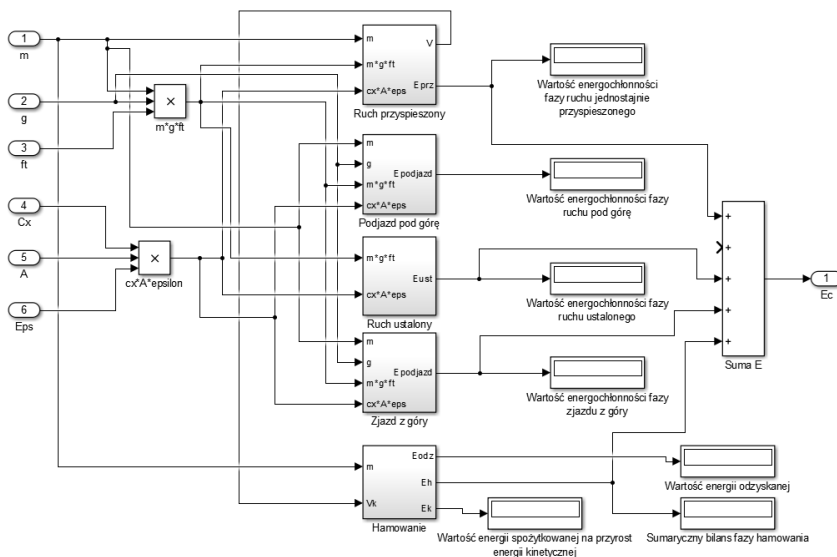
Podsystem „Wyniki – SORT” (rys. 2.19.) został opracowany w celu odczytania obliczonych parametrów ruchu. Składa się on z sześciu bloków

funkcjonalnych. Wyniki obliczeń przedstawione zostały w oknach bloków funkcyjalnych służących do odczytu wartości.



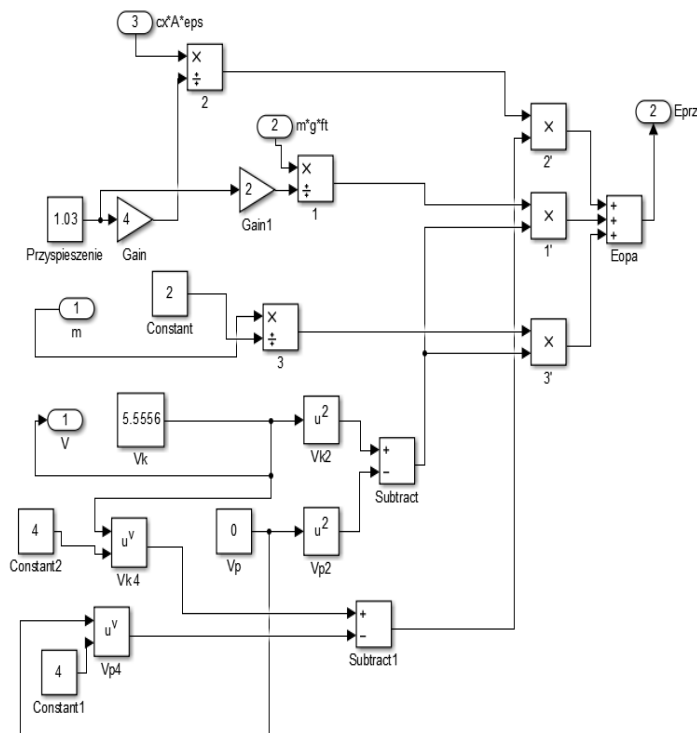
Rys. 2.19. Schemat podsystemu „Wyniki – SORT”

Kolejnym podsystemem modelu jest podsystem „Pokonywanie wzniesień” (rys. 2.20.) opracowany w celu wykonania obliczeń dla każdego z możliwych przypadków ruchu pojazdu.



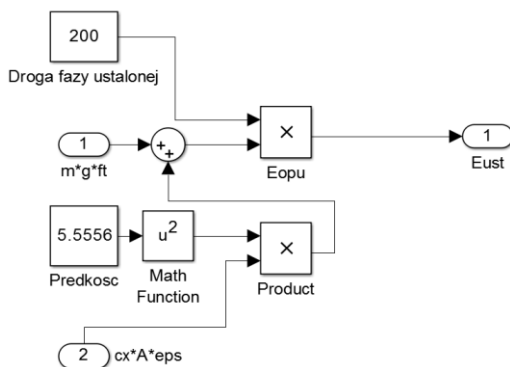
Rys. 2.20. Schemat podsystemu „Pokonywanie wzniesień”

Pierwszym z analizowanych rodzajów ruchu jest ruch ze stałą wartością przyspieszenia po podłożu poziomym. Parametry dla tego ruchu wprowadza się, używając podsystem „Ruch przyspieszony” (rys. 2.21.).



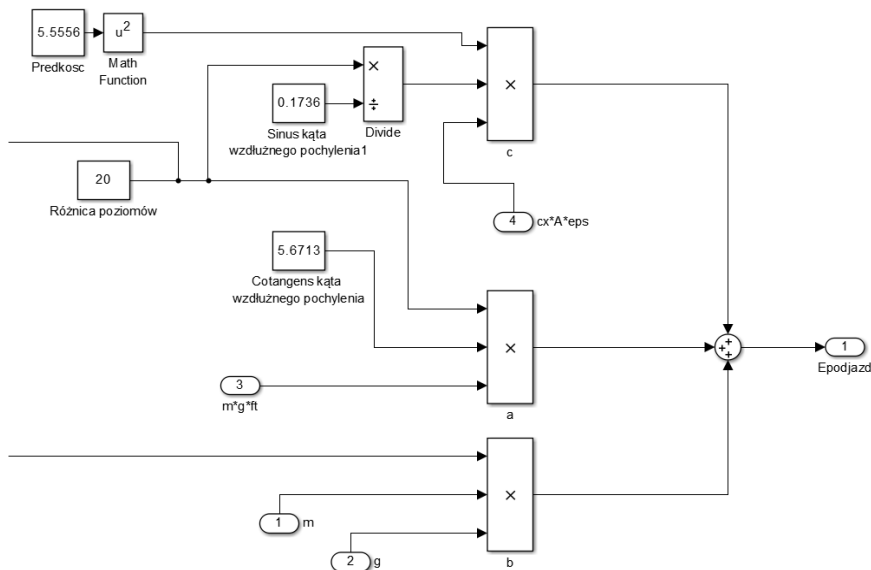
Rys. 2.21. Schemat podsystemu „Ruch przyspieszony”

Drugim z analizowanych rodzajów ruchu jest ruch ze stałą wartością prędkości po podłożu poziomym. Parametry wybranego ruchu wprowadza się, używając podsystem „Ruch ustalony” (rys. 2.22.).



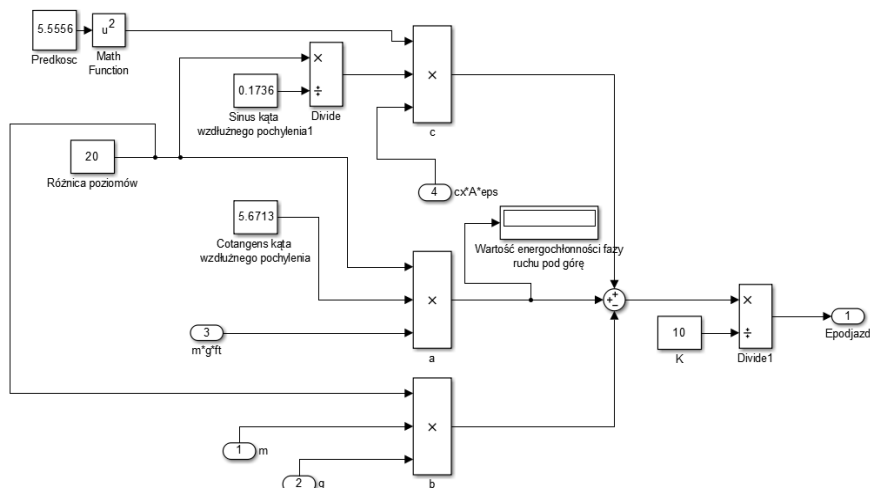
Rys. 2.22. Schemat podsystemu „Ruch ustalony”

Trzecim z analizowanych rodzajów ruchu jest ruch ze stałą wartością prędkości po drodze o nachyleniu wzdłużnym jezdni. Parametry dla tego ruchu wprowadza się używając podsystem „Podjazd pod górę” (rys. 2.23.).



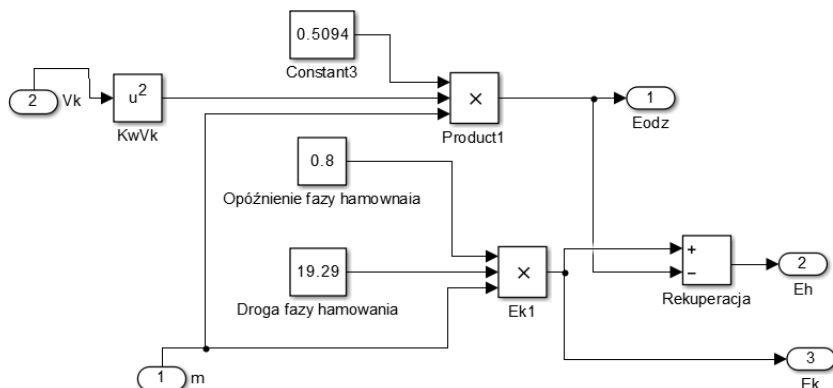
Rys. 2.23. Schemat podsystemu „Podjazd pod górę”

Kolejnym uwzględnianym rodzajem ruchu jest zjazd ze stałą wartością prędkości po drodze o nachyleniu wzdłużnym jezdni. Parametry ww. ruchu wprowadza się używając podsystem „Zjazd z góry” (rys. 2.24.).



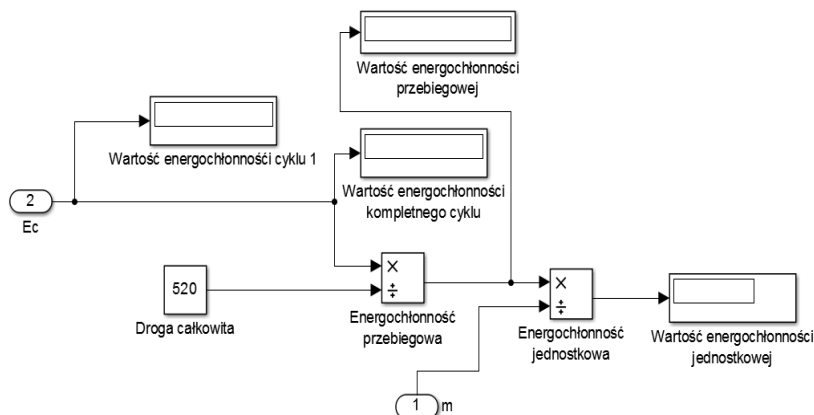
Rys. 2.24. Schemat podsystemu „Zjazd z góry”

Ważnym rodzajem ruchu jest ruch ze stałą wartością opóźnienia po podłożu poziomym. Parametry dla wybranego ruchu wprowadza się używając podsystem „Hamowanie” (rys. 2.25.).



Rys. 2.25. Schemat podsystemu „Hamowanie”

Podsystem „Wyniki – pokonywanie wzniesień” (rys. 2.26.) powstał w celu odczytania obliczonych parametrów ruchu



Rys. 2.26. Schemat podsystemu „Wyniki – pokonywanie wzniesień”

2.8. Model symulacyjny energochłonności trolejbusu dla zmiennego obciążenia

Pierwszą częścią badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelu „symulacja.slx” było wyznaczenie teoretycznej zależności pomiędzy: liczbą przewożonych pasażerów, a wartością energochłonności całkowitej, jednostkowej oraz przebiegowej ruchu dla trolejbusów Trollino 12S oraz Trollino 18M pokonujących test jezdny o parametrach zbliżonych do panujących w miastach średniej

wielkości. Do badań przyjęto średnią masę przewożonego pasażera równą 68 kg. Masa pasażera została określona przez Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 roku. Przy wykorzystaniu modelu „symulacja.slx” uzyskano wyniki teoretycznego wpływu obciążenia trolejbusu na wartość energochłonności i przedstawiono je w tabelach 2.6.–2.8.

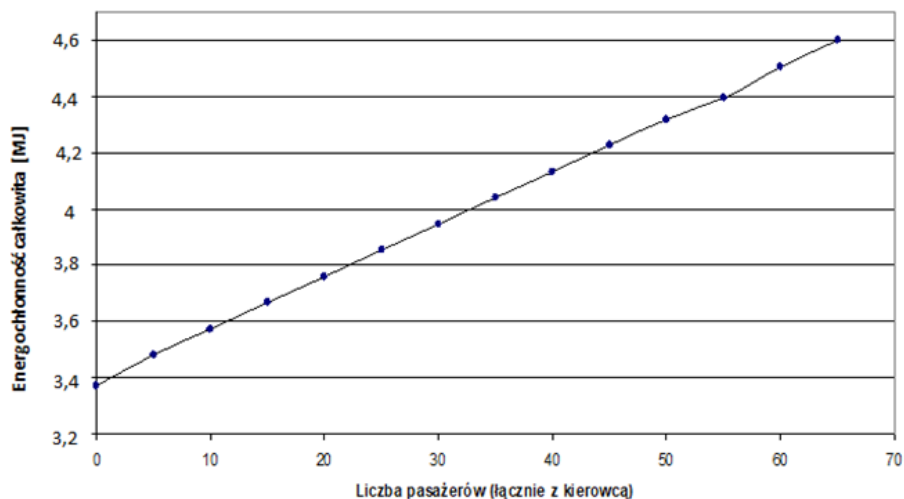
Tab. 2.6. Zestawienie wyników badania teoretycznego wpływu liczby przewożonych pasażerów na wartość energochłonności całkowitej, przebiegowej oraz jednostkowej dla trolejbusu Trollino 12S

Liczba przewożonych pasażerów	Energochłonność całkowita [MJ]	Energochłonność przebiegowa [J/m]	Energochłonność jednostkowa [J/m*kg]
0	3 370 090,901	6 481	0,5587
5	3 481 794,835	6 696	0,5576
10	3 574 881,446	6 875	0,5568
15	3 667 968,057	7 054	0,5559
20	3 761 054,668	7 233	0,5552
25	3 854 141,279	7 412	0,5544
30	3 947 227,89	7 591	0,5538
35	4 040 314,501	7 770	0,5531
40	4 133 401,112	7 949	0,5525
45	4 226 487,723	8 128	0,5519
50	4 319 574,334	8 307	0,5513
55	4 394 043,623	8 450	0,5509
60	4 505 747,556	8 665	0,5502
65	4 598 834,167	8 844	0,5497

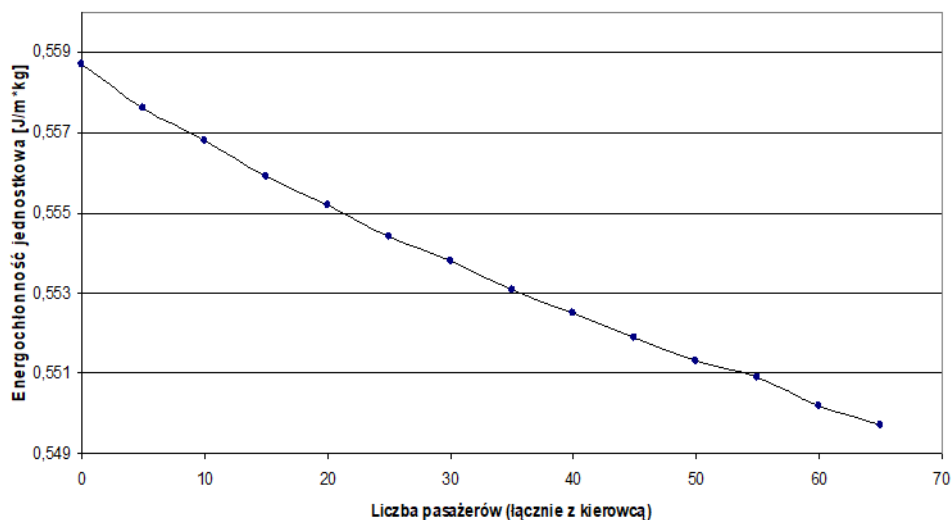
Tab. 2.7. Zestawienie wyników badania teoretycznego wpływu liczby przewożonych pasażerów na wartość energochłonności cyklu pierwszego, drugiego oraz trzeciego dla trolejbusu Trollino 12S

Liczba przewożonych pasażerów	Energochłonność cyklu pierwszego [J]	Energochłonność cyklu drugiego [J]	Energochłonność cyklu trzeciego [J]
0	318 299,2298	971 241,275	2 080 550,396
5	32 932,888	1 004 529,236	2 147 942,710
10	338 509,269	1 032 269,204	2 204 102,972
15	347 695,65	1 060 009,172	2 260 263,234
20	356 882,032	1 087 749,14	2 316 423,496
25	366 068,414	1 115 489,107	2 372 583,758
30	375 254,795	1 143 229,075	2 428 744,019
35	384 441,177	1 170 969,043	2 484 904,281
40	393 627,558	1 198 709,01	2 541 064,543
45	402 813,94	1 226 448,978	2 597 224,805
50	412 000,322	1 254 188,946	2 653 385,067
55	419 349,427	1 276 380,92	2 698 313,276
60	430 373,084	1 309 668,813	2 765 705,59
65	439 559,466	1 337 408,849	2 821 865,852

Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że energochłonność całkowita (rys 2.27.) rośnie wraz ze zwiększeniem się liczby przewożonych pasażerów, a energochłonność jednostkowa maleje (rys. 2.28.).

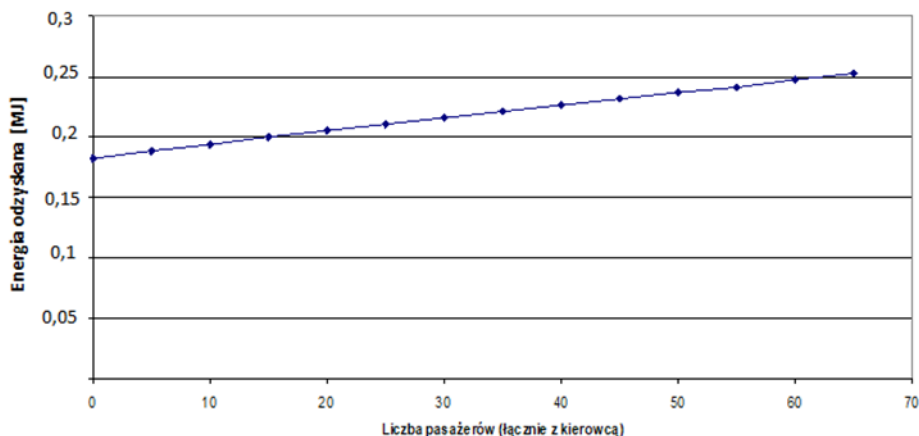


Rys. 2.27. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością energochłonności całkowitej a liczbą przewożonych pasażerów dla trolejbusu typu Trollino 12S

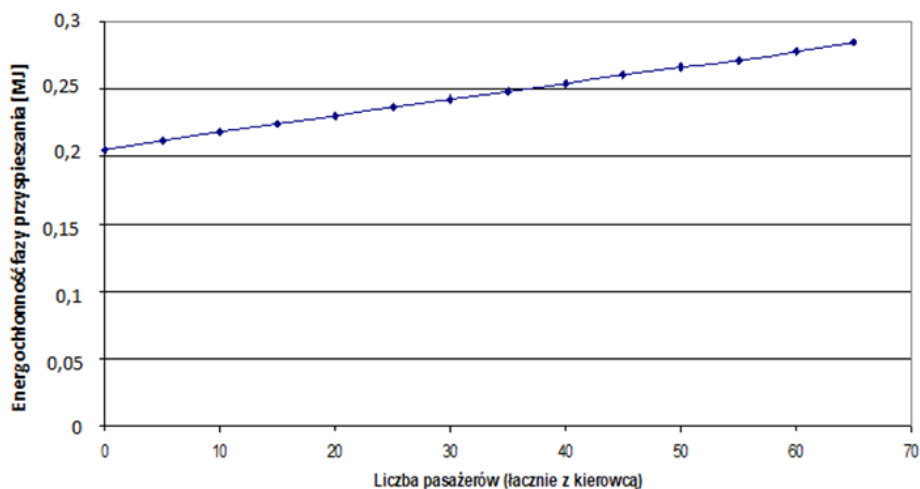


Rys. 2.28. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością energochłonności jednostkowej, a liczbą przewożonych pasażerów dla trolejbusu typu Trollino 12S

Liniowa zależność występuje pomiędzy ilością odzyskanej energii w czasie hamowania odzyskowego (rys. 2.29.), energochłonnością fazy przyspieszania (rys. 2.30.) a liczbą przewożonych pasażerów.



Rys. 2.29. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością odzyskanej energii a liczbą przewożonych pasażerów dla trolejbusu typu Trollino 12S



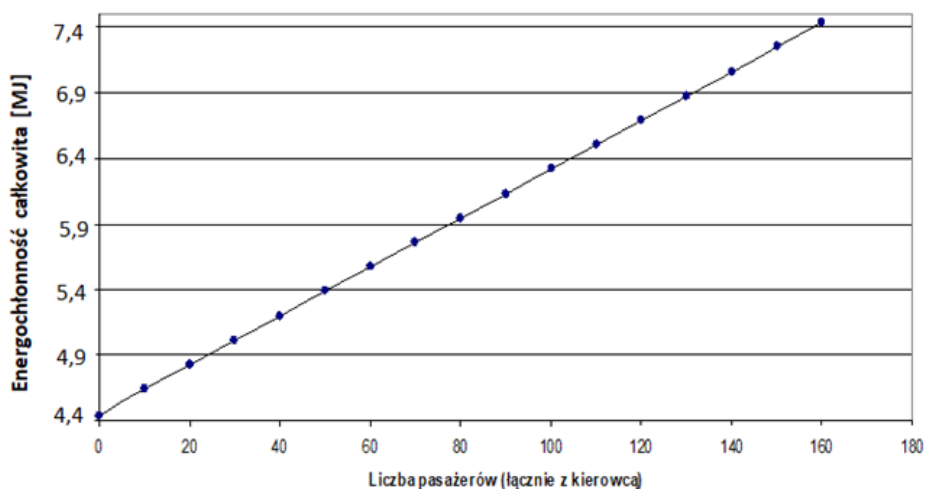
Rys. 2.30. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy energochłonnością fazy przyspieszania a liczbą przewożonych pasażerów dla trolejbusu typu Trollino 12S

W analogiczny sposób przeprowadzono obliczenia symulacyjne dla trolejbusu Trollino 18M. Przy wykorzystaniu modelu „symulacja.slx” uzyskano wyniki teoretycznego wpływu obciążenia trolejbusu na wartość energochłonności, które przedstawiono w tabeli 2.8. (patrz tab. na s. 66)

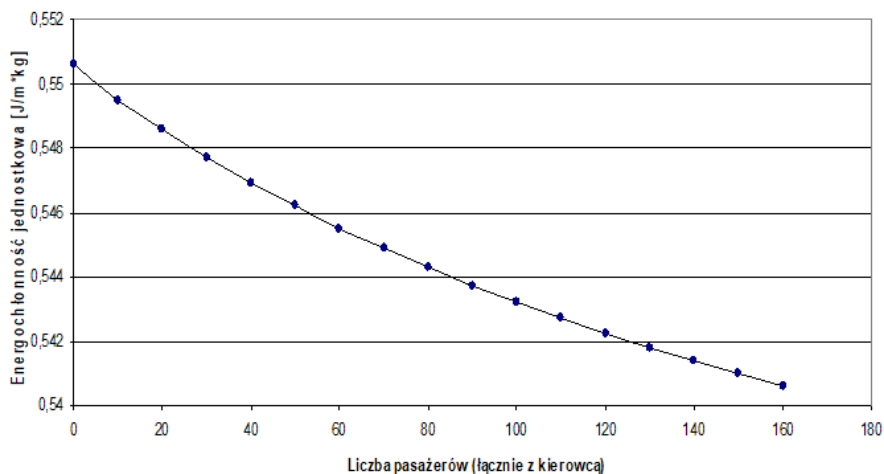
Tab. 2.8. Zestawienie wyników obliczeń wpływu liczby przewożonych pasażerów na wartość energochłonności całkowitej, przebiegowej oraz jednostkowej dla trolejbusu Trollino 18M

Liczba przewożonych pasażerów	Energochłonność całkowita [J]	Energochłonność przebiegowa [J/m]	Energochłonność jednostkowa [J/m*kg]
0	4 437 849,087	8 534	0,5506
10	4 642 639,631	8 928	0,5495
20	4 828 812,854	9 286	0,5486
30	5 014 986,076	9 644	0,5477
40	5 201 159,298	10 000	0,5469
50	5 387 332,52	10 360,25	0,5462
60	5 573 505,742	10 718,28	0,5455
70	5 759 678,364	11 076,306	0,5449
80	5 945 852,186	11 434,331	0,5443
90	6 132 025,408	11 792,356	0,5437
100	6 318 198,63	12 150,382	0,5432
110	6 504 371,853	12 508,407	0,5427
120	6 690 545,075	12 866,432	0,5422
130	6 876 718,297	13 224,458	0,5418
140	7 062 891,519	13 582,483	0,5414
150	7 249 064,741	13 940,509	0,541

Na podstawie analizy otrzymanych wyników można stwierdzić, że energochłonność całkowita rośnie wraz ze zwiększeniem się liczby przewożonych pasażerów (rys. 2.31.), a jednostkowa maleje (rys 2.32., patrz na s.67).



Rys. 2.31. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością energochłonności całkowitej a liczbą przewożonych pasażerów dla trolejbusu typu Trollino 18M



Rys. 2.32. Wykres teoretycznej zależności pomiędzy wartością energochłonności jednostkowej a liczbą przewożonych pasażerów dla trolejbusu typu Trollino 18M

2.9. Wyznaczenie energochłonności dla dwóch trolejbusów realizujących test jezdny według normy PN-EN1986-1:2001

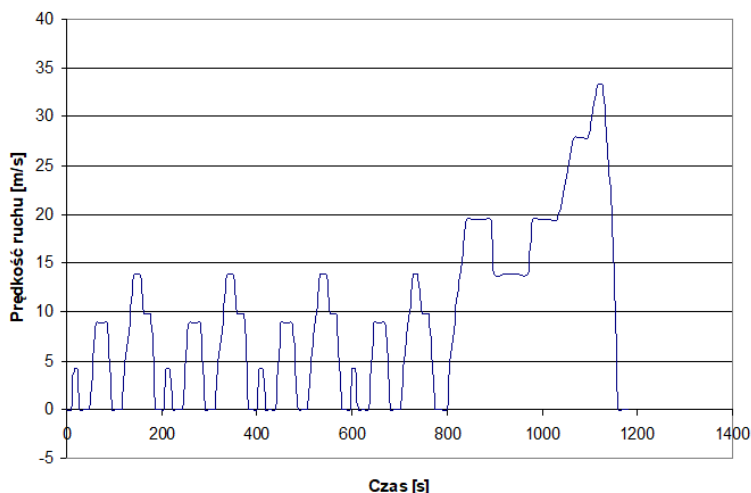
Celem analizy jest wyznaczenie przebiegów zużycia energii elektrycznej dla dwóch pojazdów z napędem elektrycznym realizujących test jezdny zgodnie z normą PN-EN1986-1:2011. Do modelu obliczeniowego „symulacja.slx” wprowadzone zostały podstawowe dane techniczne dwóch trolejbusów: Trollino 12S oraz Trollino 18M. 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. Należy nadmienić, że napęd elektryczny w pojazdach umożliwia proces odzysku energii zwany rekuperacją.

W celu realizacji badań wykonano następujące obliczenia symulacyjne:

- wyznaczenie energochłonności dla trolejbusu Trollino 12S realizującego cykl miejski,
- wyznaczenie energochłonności dla trolejbusu Trollino 12S realizującego cykl pozamiejski,
- wyznaczenie energochłonności dla trolejbusu Trollino 12S realizującego elementarny cykl miejski,
- wyznaczenie energochłonności dla trolejbusu Trollino 18M realizującego cykl miejski,
- wyznaczenie energochłonności dla trolejbusu Trollino 18M realizującego cykl pozamiejski,
- wyznaczenie energochłonności dla trolejbusu Trollino 18M realizującego

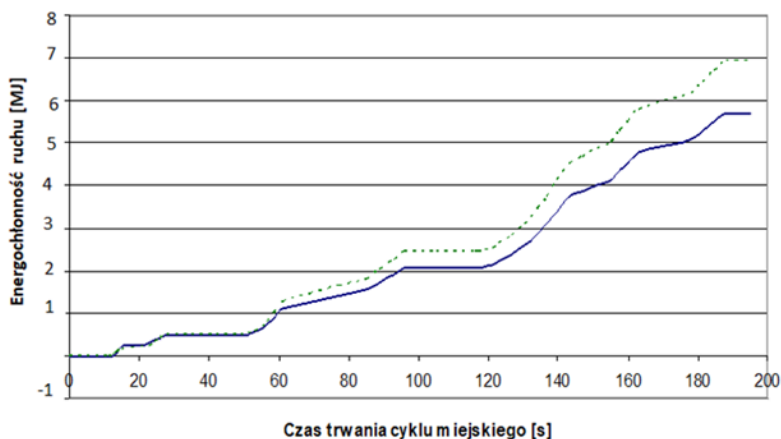
elementarny cykl miejski.

Na podstawie otrzymanych wyników opracowane zostały teoretyczne przebiegi czasowe energochłonności ruchu, energochłonności przebiegowej, energochłonności jednostkowej oraz odzysku energii. Profil prędkości elementarnego cyklu miejskiego złożonego z czterech cykli miejskich oraz jednego pozamiejskiego został przedstawiony na rysunku 3.33.

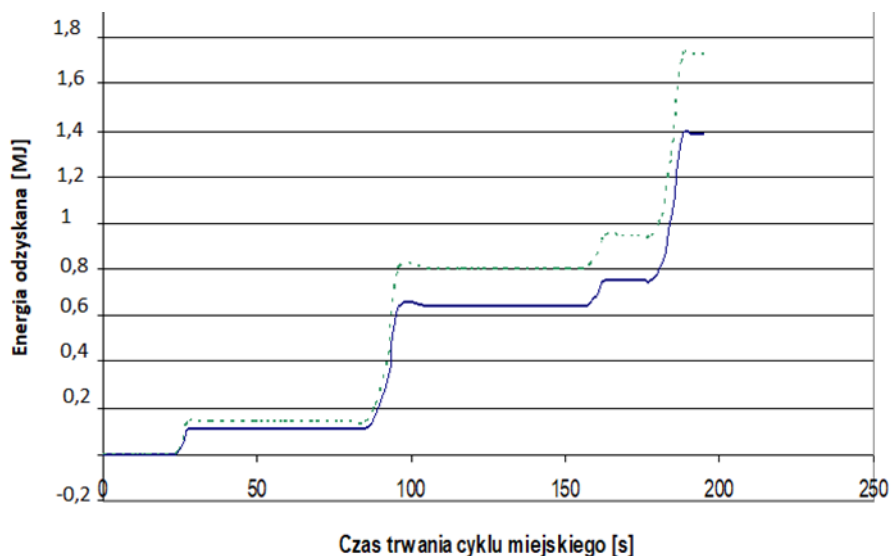


Rys. 2.33. Profil prędkości przyjętego elementarnego cyklu miejskiego

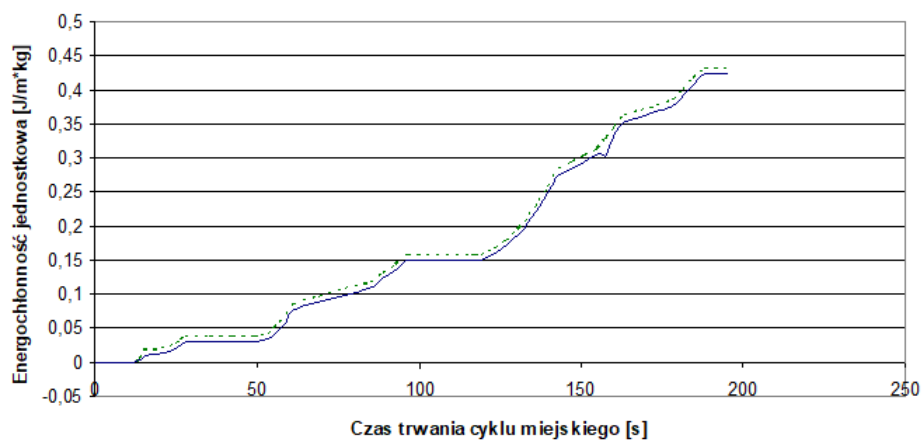
Rysunki 2.34.–2.37. przedstawiają porównanie przebiegów czasowych wyżej wymienionych parametrów dla trolejbusów Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl miejski.



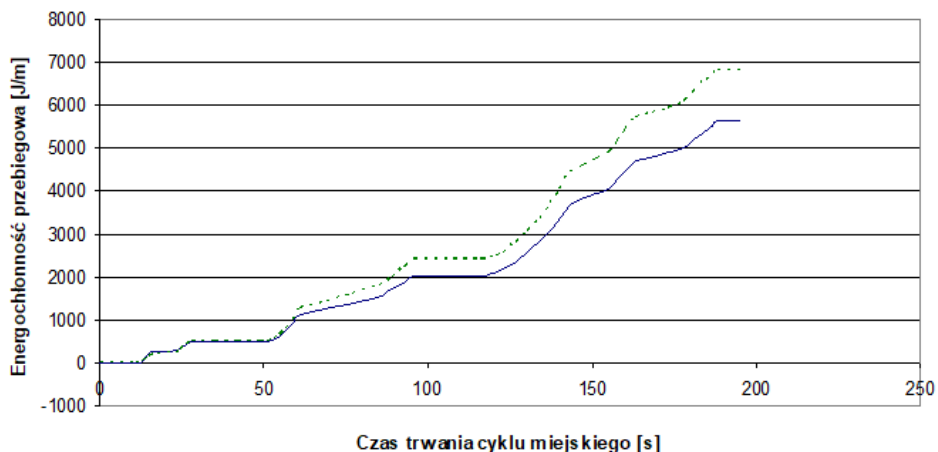
Rys. 2.34. Przebieg czasowy energochłonności ruchu dla trolejbusów typu Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl miejski



Rys. 2.35. Przebieg czasowy odzyskanej energii dla trolejbusów typu Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl miejski

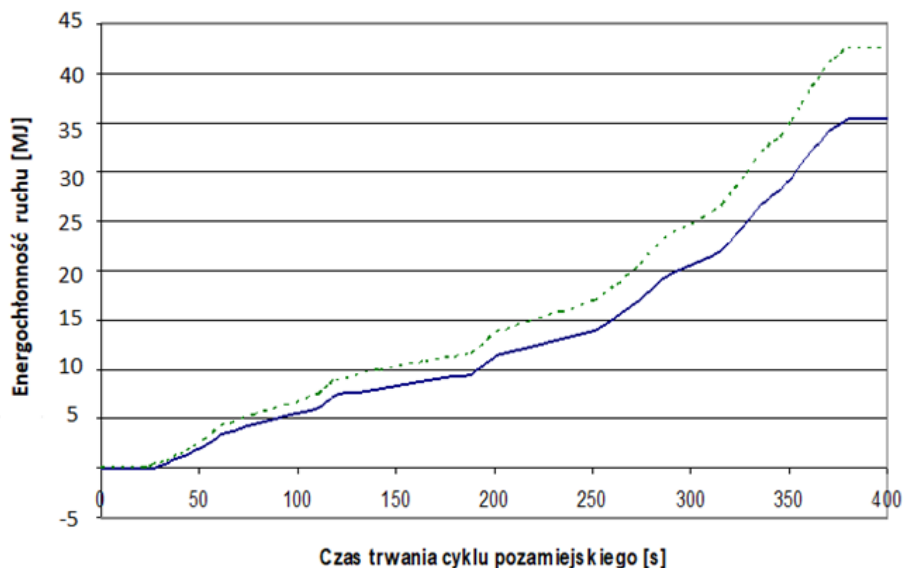


Rys. 2.36. Przebieg czasowy energochłonności jednostkowej dla trolejbusów typu Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl miejski

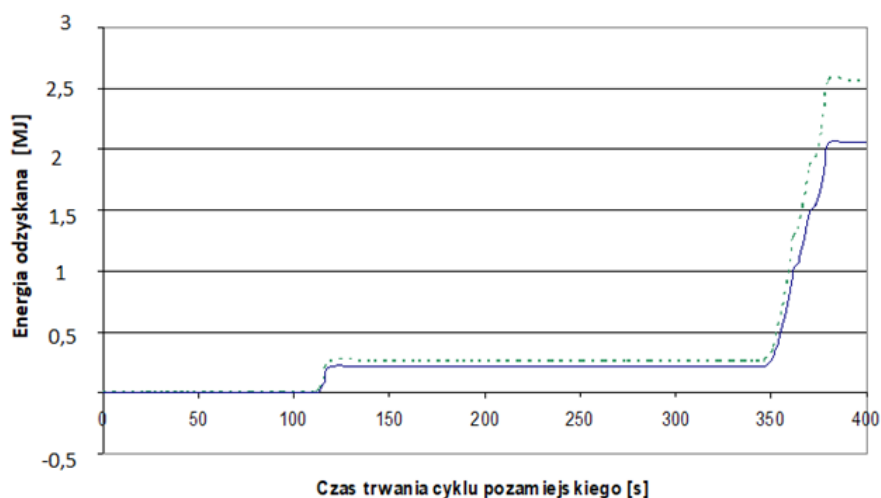


Rys. 2.37. Przebieg czasowy energochłonności przebiegowej dla trolejbusów typu Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl miejski

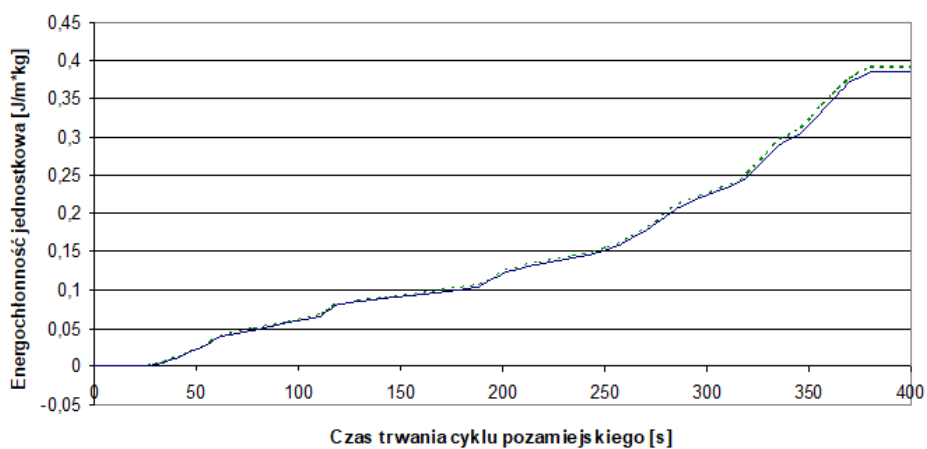
Rysunki 2.38.–2.41. przedstawiają porównanie przebiegów czasowych wcześniej wymienionych parametrów dla trolejbusów Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl pozamiejski.



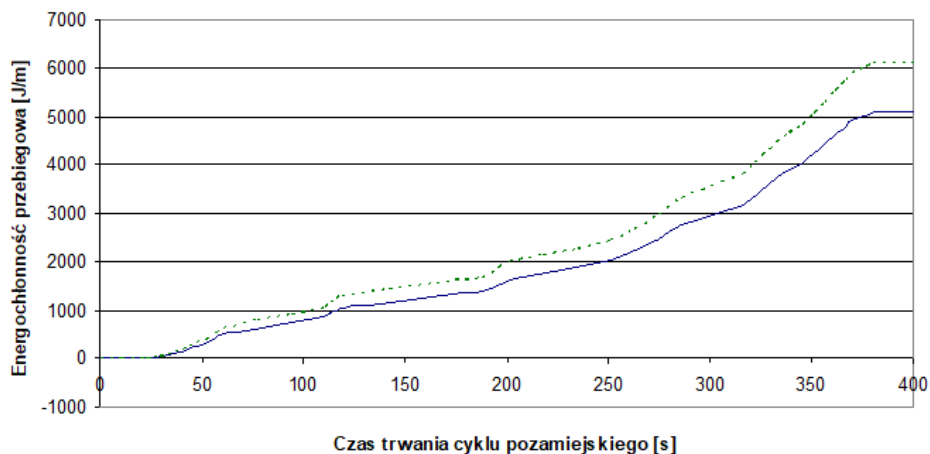
Rys. 2.38. Przebieg czasowy energochłonności ruchu dla trolejbusów typu Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl pozamiejski



Rys. 2.39. Przebieg czasowy odzyskanej energii dla trolejbusów typu Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl pozamiejski

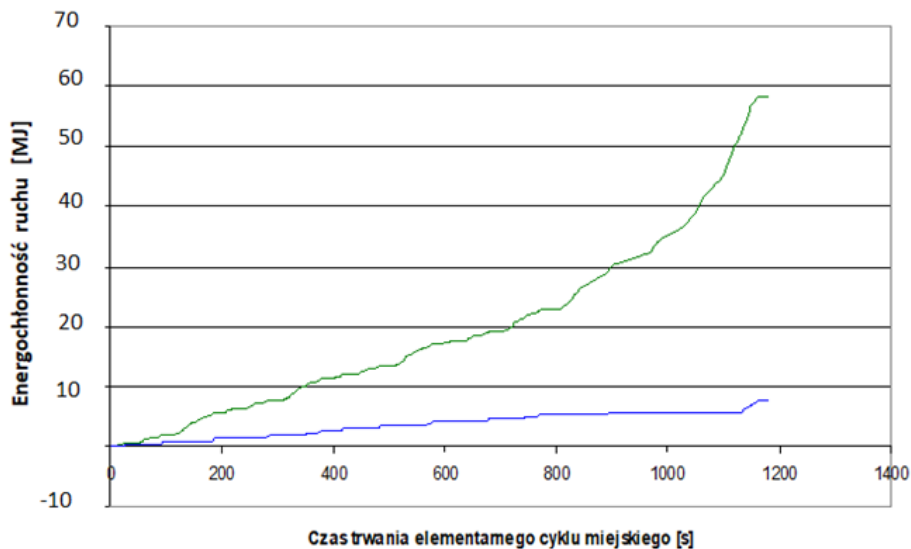


Rys. 2.40. Przebieg czasowy energochłonności jednostkowej dla trolejbusów typu Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl pozamiejski

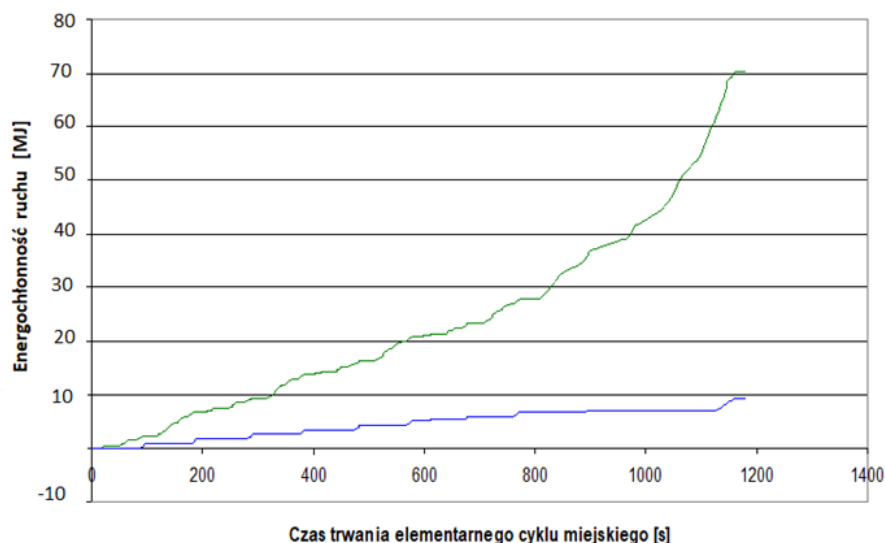


Rys. 2.41. Przebieg czasowy energochłonności przebiegowej dla trolejbusów typu Trollino 12S (linia ciągła) oraz Trollino 18M (linia przerywana) realizujących cykl pozamiejski

Analizując wyniki symulacji można stwierdzić, że otrzymane przebiegi czasowe energochłonności ruchu (kolor zielony) i ilości odzyskanej energii w czasie hamowania odzyskowego (kolor niebieski) dla dwóch trolejbusów Trollino 12S (rys. 2.42.) oraz Trollino 18M (rys. 2.43., patrz na s.73) realizujących elementarny cykl miejski przyjmują podobne wartości.

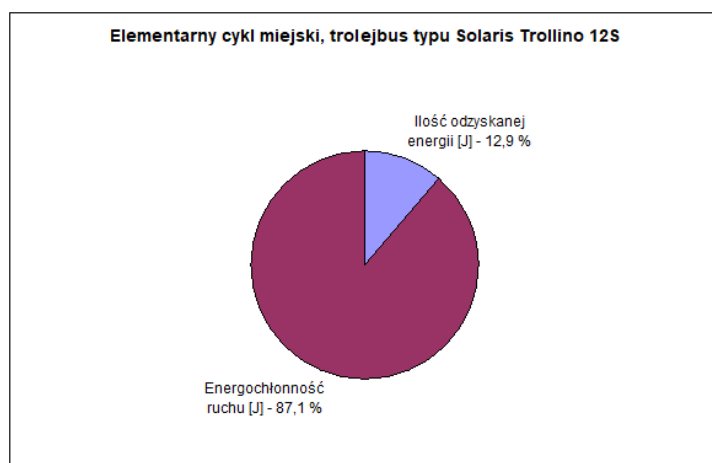


Rys. 2.42. Przebieg czasowy energochłonności ruchu (kolor zielony) oraz odzyskanej energii w czasie hamowania odzyskowego (kolor niebieski) dla trolejbusu Trollino 12S realizującego elementarny cykl miejski

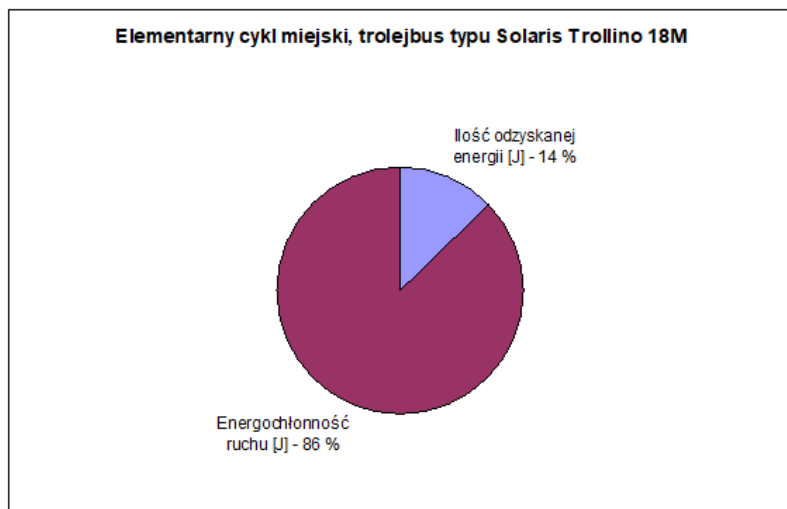


Rys. 2.43. Przebieg czasowy energochłonności ruchu (kolor zielony) oraz odzyskanej energii w czasie hamowania odzyskowego (kolor niebieski) dla trolejbusu Trollino 18M realizującego elementarny cykl miejski

Przy realizacji elementarnego cyklu miejskiego dla trolejbusu Trollino 12S energia odzyskana podczas hamowania rekuperacyjnego wynosiła 12,9% (rys. 2.44), zaś dla trolejbusu typu Trollino 18M energia odzyskana podczas hamowania rekuperacyjnego wynosiła 14% (rys. 2.45., patrz s.74). Otrzymane wykresy przedstawiają niewielki wpływ masy pojazdu na ilość odzyskanej energii podczas hamowania rekuperacyjnego.

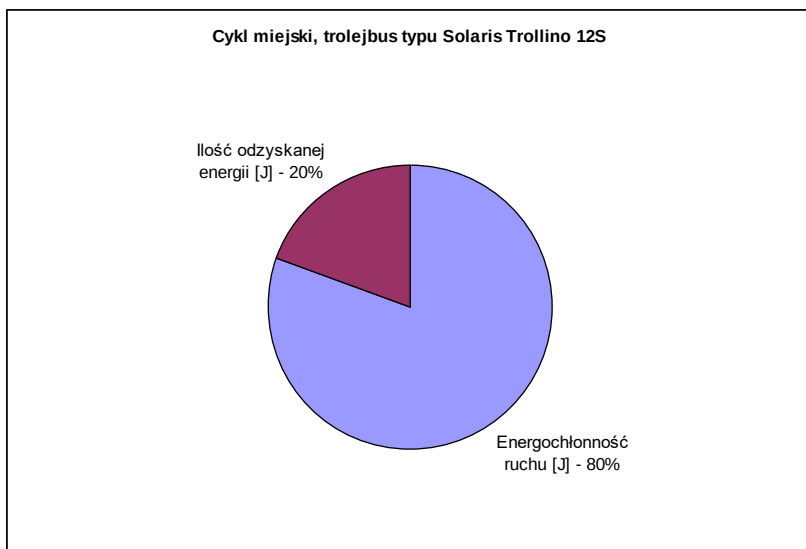


Rys. 2.44. Zestawienie energochłonności ruchu oraz odzyskanej energii podczas hamowania rekuperacyjnego dla trolejbusu Trollino 12S realizującego elementarny cykl miejski

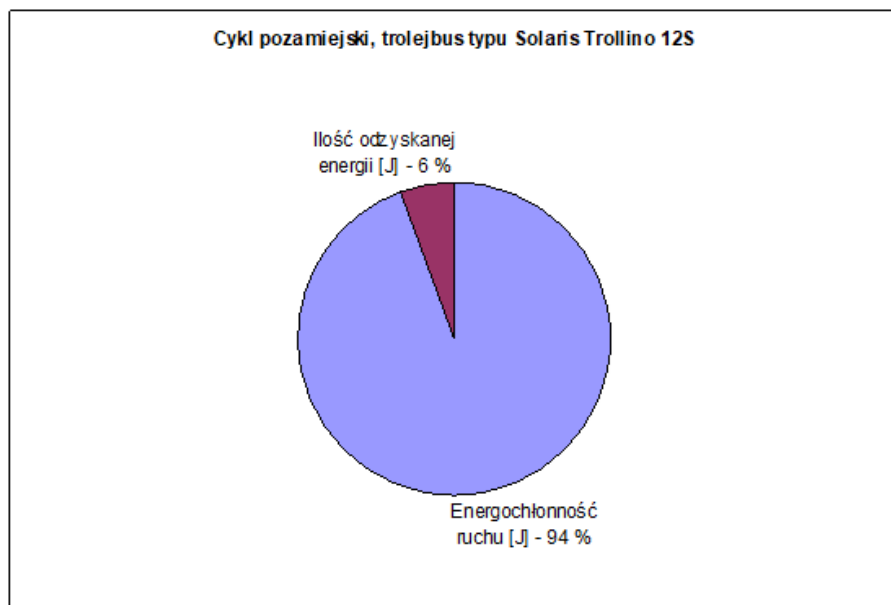


Rys. 2.45. Zestawienie energochłonności ruchu oraz odzyskanej energii podczas hamowania rekuperacyjnego dla trolejbusu Trollino 18M realizującego elementarny cykl miejski

Przy realizacji cyklu miejskiego energia odzyskana podczas hamowania rekuperacyjnego dla trolejbusu Trollino 12S wynosiła 20% (rys. 2.46.), dla cyklu pozamiejskiego w czasie hamowania rekuperacyjnego wynosiła 6% (rys. 2.47., patrz s.75). Z otrzymanych wykresów wynika, że na energochłonność ruchu podczas hamowania rekuperacyjnego wpływ ma liczba procesów zatrzymania pojazdu szczególnie przy realizacji cyklu miejskiego w porównaniu do pozamiejskiego.



Rys. 2.46. Zestawienie energochłonności ruchu oraz odzyskanej energii podczas hamowania rekuperacyjnego dla trolejbusu Trollino 12S realizującego cykl miejski



Rys. 2.47. Zestawienie energochłonności ruchu oraz odzyskanej energii podczas hamowania rekuperacyjnego dla trolejbusu Trollino 12S realizującego cykl pozamiejski

2.10. Określenie wpływu kąta wzdłużnego pochylenia drogi na energochłonność całkowitą, jednostkową oraz przebiegową

Analizę wpływu kąta wzdłużnego pochylenia drogi przeprowadzono dla energochłonności całkowitej, jednostkowej oraz przebiegowej. Do modelu obliczeniowego „symulacja.slx” wprowadzono podstawowe dane techniczne trolejbusu typu Trollino 12S. W celu zasymulowania rzeczywistych warunków eksploatacji w ruchu miejskim podczas badań przyjęto, że analizowany trolejbus obciążony jest masą kierowcy oraz 20 pasażerów. Do analizy przyjęto masę przewożonego pasażera równą 68 kg, która została określona przez Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 roku. Symulacje zostały przeprowadzone dla dwóch prędkości jazdy trolejbusu – 30 km/h oraz 60 km/h. Długość odcinka pomiarowego wynosi 500 metrów. Przy wykorzystaniu modelu obliczeniowego „symulacja.slx” otrzymano wyniki określające wpływ kąta wzdłużnego pochylenia jezdni na wartość energochłonności odcinka o stałej długości (tab. 2.9.–2.10., patrz s.76).

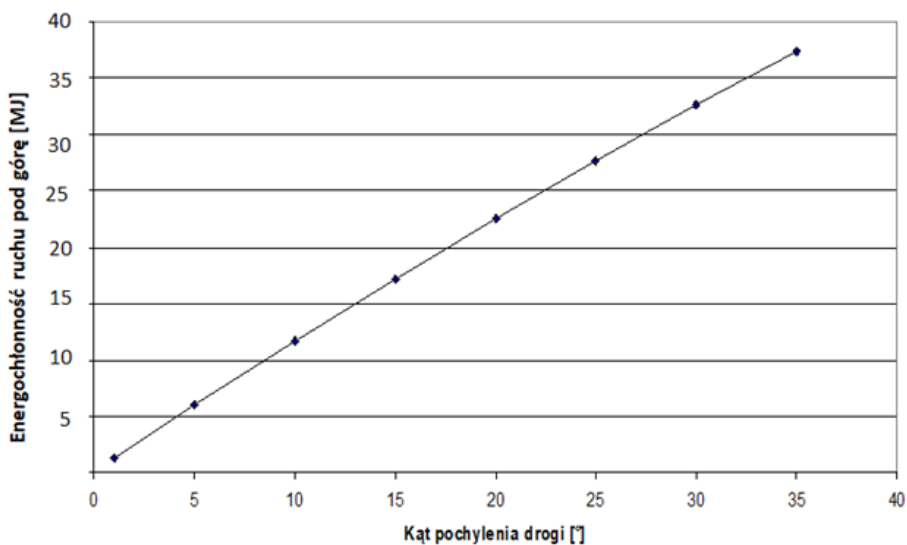
Tab. 2.9. Zestawienie wyników wpływu kąta wzdłużnego pochylenia jezdni na energochłonność całkowitą, przebiegową, jednostkową, energię rozproszoną podczas hamowania oraz siły hamujące dla trolejbusu Trollino 12S pokonującego odcinek drogi z prędkością 30 km/h

Kąt pochylenia wzdłużnego jezdni [°]	Energochłonność ruchu pod górę [J]	Siły hamujące [N]	Energia rozproszona [J]	Energochłonność jednostkowa [J/m*kg]	Energochłonność przebiegowa [J/m]
1	1310047	163,4809	851233,4	0,201112	100,5562
5	6046886	9078,897	5023094	0,928291	464,1454
10	11716739	20154,86	10397319	1,798701	899,3505
15	17224527	31076,3	15781242	2,644232	1322,116
20	22566395	41760,08	21076477	3,464292	1732,146
25	27720179	52124,9	26228378	4,255477	2127,739
30	32654392	62091,87	31191608	5,012955	2506,478
35	37334367	71585,14	35923989	5,731404	2865,702

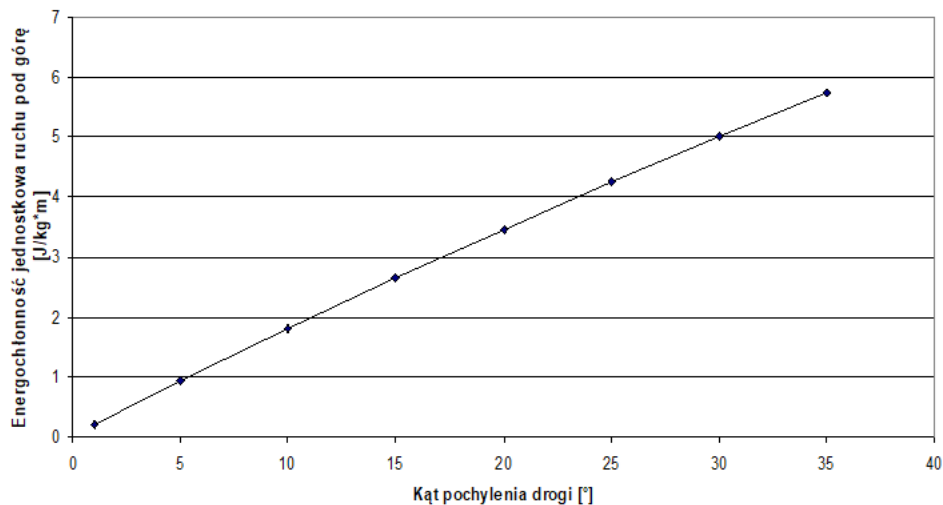
Tab. 2.10. Zestawienie wyników wpływu kąta wzdłużnego pochylenia jezdni na energochłonność całkowitą, przebiegową, jednostkową, energię rozproszoną podczas hamowania oraz siły hamujące dla trolejbusu Trollino 12S pokonującego odcinek drogi z prędkością 60 km/h

Kąt pochylenia wzdłużnego jezdni [°]	Energochłonność ruchu pod górę [J]	Siły hamujące [N]	Energia rozproszona [J]	Energochłonność jednostkowa [J/m*kg]	Energochłonność przebiegowa [J/m]
1	1310115	-287,239	625258,7	0,201123	100,5615
5	6048599	8628,176	4797620	0,928554	464,2769
10	11723532	19704,14	10172022	1,799744	899,872
15	17239622	30625,58	15555898	2,646549	1323,275
20	22592756	41309,36	20851130	3,468338	1734,169
25	27760428	51674,18	26003028	4,261656	2130,828
30	32710732	61641,15	30966248	5,021605	2510,802
35	37408512	71134,42	35698619	5,742787	2871,393

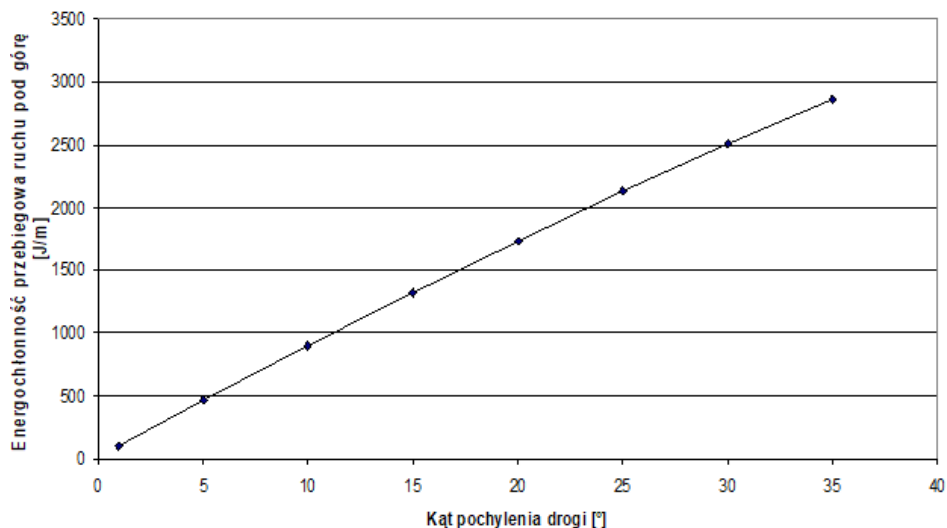
Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że: energochłonność całkowita (rys. 2.48., patrz s. 77), jednostkowa (rys. 2.49., patrz s. 77), przebiegowa (rys. 2.50., patrz s. 78) w przypadku jazdy na odcinku o stałej długości pod górę zwiększa się liniowo wraz ze wzrostem kąta wzdłużnego pochylenia jezdni.



Rys. 2.48. Przebieg energochłonności ruchu pod górę w funkcji kąta wzdłużnego pochylenia jezdni w przypadku ruchu ze stałą prędkością równą 30 km/h na odcinku o stałej długości dla trolejbusu Trollino 12S

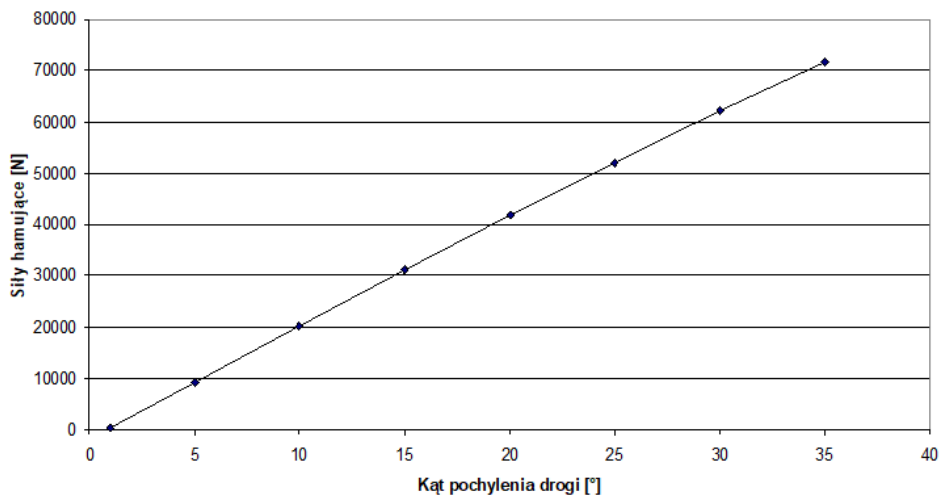


Rys. 2.49. Przebieg energochłonności jednostkowej ruchu pod górę w funkcji kąta wzdłużnego pochylenia jezdni w przypadku ruchu ze stałą prędkością równą 30 km/h na odcinku o stałej długości dla trolejbusu Solaris Trollino 12S

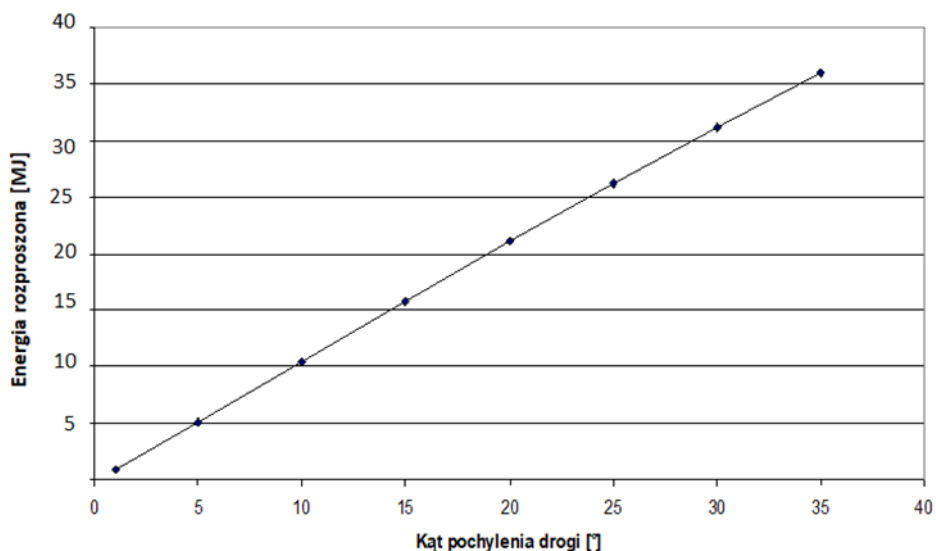


Rys. 2.50. Przebieg energochłonności przebiegowej ruchu pod górę w funkcji kąta wzdłużnego pochylenia jezdni w przypadku ruchu ze stałą prędkością równą 30 km/h na odcinku o stałej długości dla trolejbusu Trollino 12S

Otrzymane wyniki wykazały liniową zależność sił hamujących (rys. 2.51.) przeciwdziałających wzrostowi prędkości trolejbusu podczas zjazdu ze wzniesienia oraz wartości energii rozproszonej podczas hamowania (rys. 2.52., patrz s. 79), a kątem wzdłużnego pochylenia jezdni pozwalającego na utrzymanie stałej prędkości.



Rys. 2.51. Przebieg sił hamujących przeciwdziałających wzrostowi prędkości trolejbusu podczas zjazdu ze wzniesienia, a kątem wzdłużnego pochylenia jezdni w przypadku ruchu ze stałą prędkością równą 30 km/h na odcinku o stałej długości dla trolejbusu Trollino 12S



Rys. 2.52. Przebieg energii rozproszenia podczas hamowania pozwalającego na utrzymanie stałej prędkości podczas zjazdu ze wzniesienia, a kątem wzdłużnego pochylenia jezdni w przypadku ruchu ze stałą prędkością równą 30 km/h na odcinku o stałej długości dla trolejbusu Trollino 12S

2.11. Podsumowanie modelu teoretycznego energochłonności

Podstawowym celem tej części pracy było opracowanie modelu matematycznego energochłonności ruchu uwzględniającego sumaryczne opory ruchu dla pojazdu z napędem elektrycznym.

Zbudowany model obliczeniowy umożliwia symulacje energochłonności testów SORT 1, SORT 2, SORT 3 dla założonych warunków eksploatacji. Model symulacyjny każdego z testów SORT daje możliwość wyznaczenia zasięgu oraz kilometrowej energochłonności cyklu na podstawie wprowadzonych danych: masy całkowitej pojazdu, wysokości i szerokości pojazdu, współczynników oporu aerodynamicznego oraz toczenia, gęstości powietrza, sprawności przekładni, sprawności silnika, sprawności hamowania odzyskowego, energii zgromadzonej w akumulatorze. Główny model systemu „symulacja.slx” umożliwia wprowadzenie parametrów pojazdu: masy pojazdu, przyspieszenia grawitacyjnego, współczynnika oporu toczenia, współczynnika kształtu, gęstości powietrza. Schemat podsystemu „Test jezdny SORT” służy do wprowadzenia parametrów każdej z faz ruchu tj. ruchu jednostajnie przyspieszonego, ruchu ze stałą prędkością oraz ruchu jednostajnie opóźnionego. Podsystem „Wyniki – SORT” umożliwia odczytanie obliczonych parametrów ruchu. Wyniki obliczeń obejmują: wartość energochłonności kompletnego cyklu, energochłonności przebiegowej i jednostkowej. W skład systemu głównego modelu wchodzi podsystemy: „ruch ustalony”, „podjazd pod górę”, „zjazd z góry” oraz „hamowanie”

3. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELU TEORETYCZNEGO ENERGOCHŁONNOŚCI

W celu potwierdzenia słuszności opracowanych modeli energochłonności przeprowadzono badania empiryczne w warunkach rzeczywistych dla testu SORT2. Weryfikację doświadczalną przyjętego modelu w MATLAB Simulink wykonano przez pomiary i rejestrację prądu pobieranego i oddanego do baterii akumulatorów za pomocą przekładnika prądowego LEM IT 1000-S/SP1 na przewodach łączących baterię akumulatorów z obwodami zasilania pojazdu i odpowiadającego mu napięcia, analizatorem mocy YOKOGAWA WT 1800.

Głównym celem badań było zarejestrowanie podstawowych wielkości elektrycznych i mechanicznych dla następujących obiektów: autobusu elektrycznego EkoVolt oraz trolejbusów: Ursus T70116, Trollino 18M, Trollino 12S w celu przeprowadzenia weryfikacji modelu teoretycznego energochłonności. Podczas badania do odczytu poszczególnych wielkości określających stan autobusu trolejbusów wykorzystano elektronikę pokładową pojazdów wyprodukowaną przez firmę ACTIA oraz Skoda, w której skład wchodzi sieć czujników połączonych ze sterownikiem poprzez szeregową magistralę komunikacyjną CAN. Dane ze sterownika odczytywane były przy pomocy systemu diagnostycznego OBD z wykorzystaniem protokołu SAE J1939.

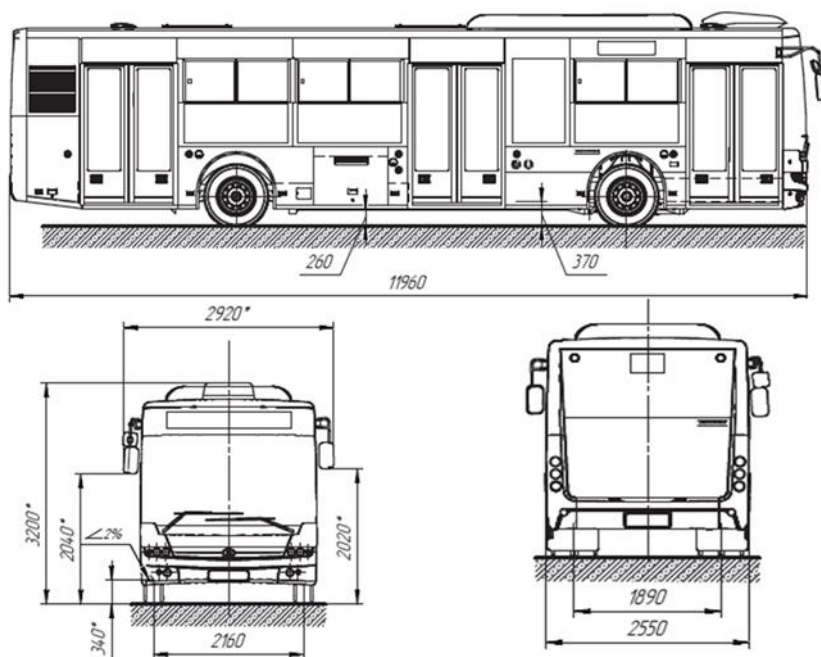
Dla realizacji celu badań przeprowadzono następujące pomiary weryfikacyjne na obiektach rzeczywistych dla przyjętych procedur wyznaczania energochłonności:

- Wyznaczenie charakterystyki średniej prędkości autobusu EkoVolt,
- Metodyka badań trolejbusu URSUS T70116,
- Metodyka badań trolejbusu Trollino 18M,
- Wyznaczenie energochłonności dla zarejestrowanych przebiegów zmian prądu i napięcia w czasie dla trolejbusu Trollino 12S, Trollino 18M oraz autobusu elektrycznego Ursus E70110,
- Metodyka badań SORT.

3.1. Charakterystyka obiektów badań

Obiektem badań były trolejbusy firmy Solaris, firmy Ursus oraz autobus elektryczny wyprodukowany przez fabrykę URSUS S.A.

Wymiary oraz dane techniczne autobusu EkoVolt przedstawia rysunek 3.1 (patrz rys. na s. 81) oraz tabela 3.1. (patrz tab. na s. 81–83)



Rys. 3.1. Wymiary autobusu EkoVolt

Tab. 3.1. Dane techniczne autobusu EkoVolt

Nadwozie	
Szkielet	Oparty na konstrukcji AMZ CS12LF. Przestrzenna konstrukcja połączona z kratownicową ramą nośną nierozłącznie (spawanie), składająca się z podstawowych zespołów (ściana boczna prawa, lewa, przednia i tylna, dach i rama kratownicowa) spawanych z prostokątnych profili zamkniętych, otwartych oraz blach ze stali nierdzewnej.
Długość	12000 mm
Szerokość	2550 mm (z lusterkami 2920 mm, rozstaw kół 2160 mm)
Wysokość	3200 mm
Rozstaw osi	5950 mm
Masa własna	12000 kg
Masa dopuszczalna	18000 kg
Drzwi	Układ 2-2-2, otwierane do wnętrza, wyposażone w rewers w funkcji zamykania i otwierania

Tab. 3.1. Dane techniczne autobusu EkoVolt cd.

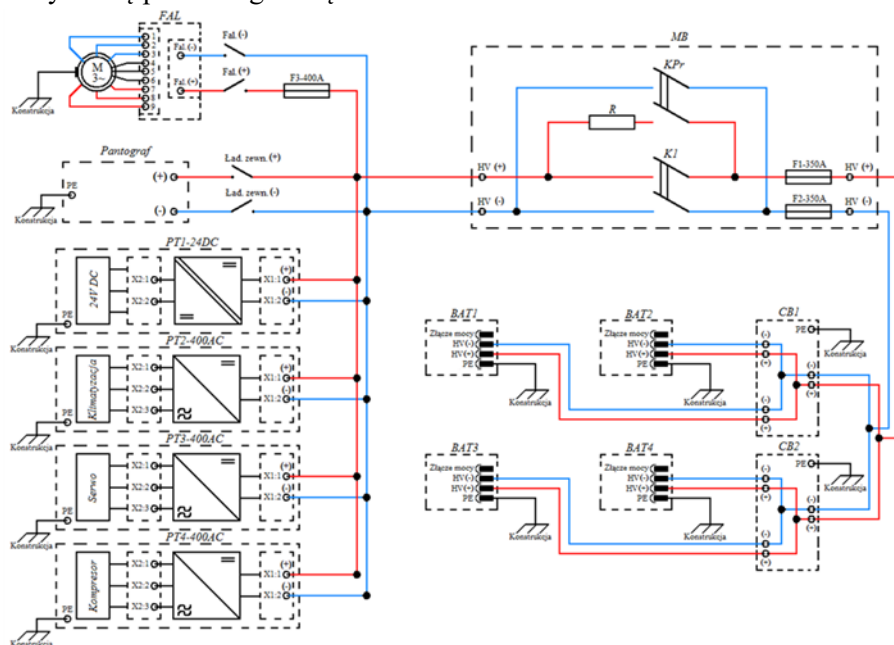
Przestrzeń pasażerska	
Miejsca siedzące	26 + 1 (kierowca)
Miejsca stojące	54
Miejsce dla osób niepełnosprawnych	1 (redukcja miejsc stojących o 5)
Miejsc ogółem	80 + 1 (kierowca)
Układ napędowy	
Umieszczenie silnika	usytuowany po lewej stronie za osią tylną pojazdu w zabudowie wieżowej
 Silnik	TM4 SUMO HD LSM280AHV-3400-A1 (synchroniczny z magnesami trwałymi): ▪ moc ciągła: 170 kW, ▪ moc chwilowa: 250 kW (< 35 sek.), ▪ moment ciągły: 1600 Nm, ▪ moment chwilowy: 3400 Nm (< 35 sek.), ▪ zakres obrotów: 0-2450 RPM, ▪ maks. sprawność: 94,5%, ▪ zakres napięć pracy: 500–750 VDC, ▪ masa: 336 kg, ▪ dopuszczalna temperatura pracy: –40°C –85°C
 Falownik	CO300HV-A1: ▪ masa: 35 kg
Most napędowy	ZF AV-132/80: ▪ przekładnia dwustopniowa, ▪ przełożenie całkowite 6,2, ▪ sprawność przekładni: 95%
Koła	▪ szerokość opon: 275 mm, ▪ wysokość opon: 70% (192,5 mm), ▪ średnica felgi: 22,5" (571,5 mm)
Układ kierowniczy	
Mechanizm	Siemens 400VAC 2,2 kW
Oś przednia	ZF RL-82EC: ▪ zawieszenie niezależne
Pneumatyka	
Sprężarka	BP techem; TA02 3kW Siemens
Układ hamulcowy	Wabco EBS (ABS/ASR): ▪ zintegrowany retarder do rekuperacji energii z hamowania

Tab. 3.1. Dane techniczne autobusu EkoVolt cd.

Zasilanie	
Baterie Ogniwo litowo- jonowe 	A123, Impact AMP20M1HD-A - litowo-żelazowo-fosforowe Li-FePO₄, - wymiary celi: 7.25 x 160 x 227 mm, - waga celi: 0,496 kg, - pojemność celi: 19,6 Ah, - energia celi: 65 Wh, - napięcie: 3,3 V, - gęstość mocy: 2400 Wh/kg, - gęstość energii: 131 Wh/kg, - temperatura pracy: -30°C – 55°C, - całkowita energia: 4 x 30 kWh = 120 kWh, - napięcie całkowite: 500 VDC, - pojemność całkowita: 240 Ah, - żywyotność: ok. 3600 pełnych cykli
Ładowarka 	Enika: - sprawność: > 97%, - współczynnik mocy: $\cos \varphi = 0,95$, - zasilanie z sieci trolejbusowej
Ładowanie wolne 	Złącze plug-in: - moc: 30 kW, - napięcie: 600 V, - prąd: 50 A, - przybliżony czas ładowania 0–100% (240 Ah): 5–6 h
Ładowanie szybkie 	Pantograf lub złącze <i>plug-in</i> - moc: 120 kW, - napięcie 600 V, - prąd: 200 A, - przybliżony czas ładowania 0–100% (240 Ah): 1–1,5 h
Dodatkowe źródła zasilania 	Panele fotowoltaiczne - moc: 1950 Wp, - powierzchnia: ok. 13 m², - sprawność: ok. 14–15%

Baterie zamontowane w obiekcie badań wykonano z ogniw z katodą litowo-żelazowo-fosforanową (LFP) w technologii nanophosphate. Posiadają wbudowany Battery Management System. Ekovolt posiada cztery pakiety, w tym każdy o pojemności 60 Ah, nominalnej energii 30 kWh i napięciu znamionowym 500 V DC.

W autobusie znajduje się przetwornica zasilana z rozdzielnicy elektrycznej 3 x 400 V AC, służąca do ładowania baterii trakcyjnych regulowanym napięciem w zakresie od 390 V DC do 570 V DC. Wejściowe napięcie sieciowe jest przekształcane przez moduły tranzystorów IGBT. Zastosowany jest aktywny układ PFC, zmniejszający straty energii w linii przesyłowej. Sterowanie przetwornicy odbywa się przez magistralę sieci CAN.



Rys. 3.2. Schemat elektryczny autobusu elektrycznego Ekovolt [144]: FAL – falownik silnika elektrycznego, PT1-24DC – przetwornica na 24 V DC dla instalacji elektrycznej pojazdu, PT2/3/4-400AC – przetwornice na 400 V AC dla urządzeń elektrycznych pojazdu, MB – ang. Master Box, główna skrzynia rozdzielcza, KPr – przełącznik przed ładowaniem ang. Precharge, K1 – przełącznik główny, F1/2/3 – bezpieczniki, R – rezystor ograniczający początkowy prąd ładowania, CB1/2 – ang. Connection Box, skrzynka połączeniowa, BAT1/2/3/4 – pakiety baterii

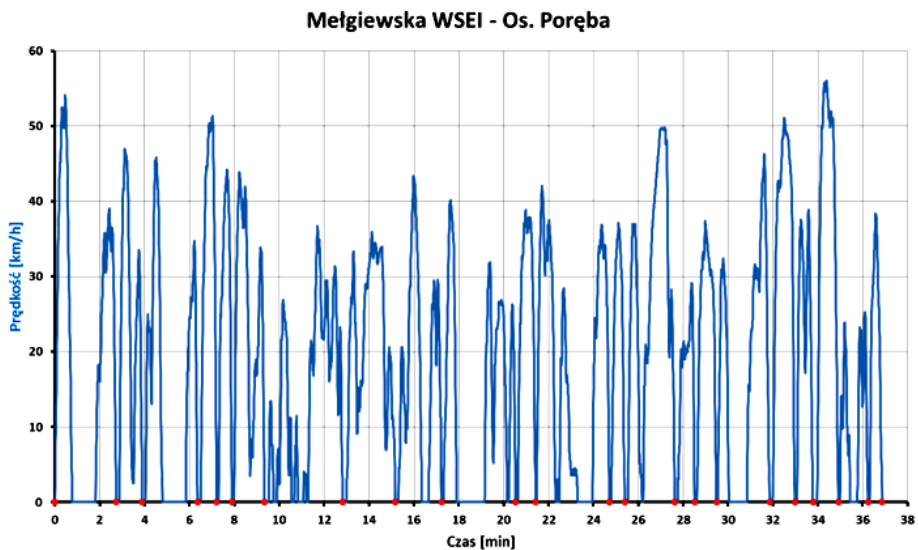
W czasie procesu ładowania, przełączniki „Ład. zewn. (+)”, „Ład. zewn. (-)” są zamknięte, co umożliwia przepływ prądu ładowania dalej do „Master Boxa”, głównej skrzyni rozdzielczej. W nim umieszczone są przełączniki i bezpieczniki, które zabezpieczają baterie przed wystąpieniem nadmiernego natężenia prądu ładowania w obwodzie, wynoszącego ponad 350 A. Przełącznik „KPr” – od precharge (przedładowanie) – jest połączony równolegle z głównym przełącznikiem „K1”. Jego celem jest ograniczenie zbyt dużego początkowego prądu ładowania, kiedy zamyka się główny przełącznik. Dokonuje się to poprzez zamknięcie

Podczas pracy autobusu, prąd z baterii rozdzielany jest na przetwornice (oznaczenie PT1-PT4 na rysunku), które przekształcają go na potrzeby obwodu napięcia stałego 24 V pojazdu i napięcia zmiennego dla kompresora, serwa hamulców oraz klimatyzacji. Oddzielnie prąd płynie do falownika, który przekształca go na trójfazowy prąd zmienny do zasilania silnika elektrycznego Ekvolta. Falownik posiada dziewięć wyjść, w tym sześć z nich to klucze tranzystorowe, a trzy to czujniki położenia (czujniki Halla) dla każdej z trzech faz uzwojenia.

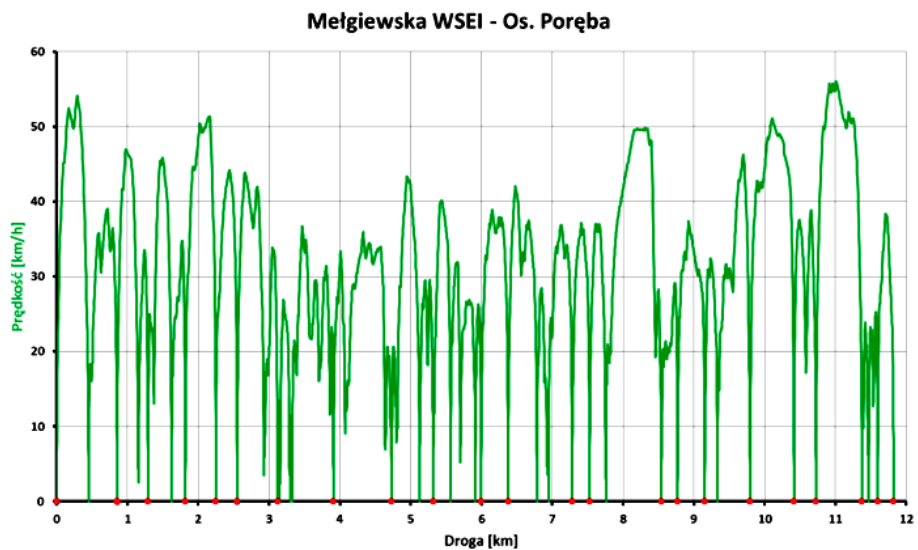
Jako odcinek kontrolny do zarejestrowania rzeczywistych wyników pomiarów wybrano trasę linii 159 lubelskiego MPK (rys. 3.3.), na której kursował prototypowy autobus EkoVolt. Przejazd wykonano 24 marca 2016 roku, a składał się on z dwóch odcinków – start z końcowego przystanku na ulicy Mełgiewskiej do pętli autobusowej na Os. Poręba i następnie w przeciwnym kierunku zgodnie z trasą linii 159, wliczając w to postoje na przystankach, bez otwierania drzwi.



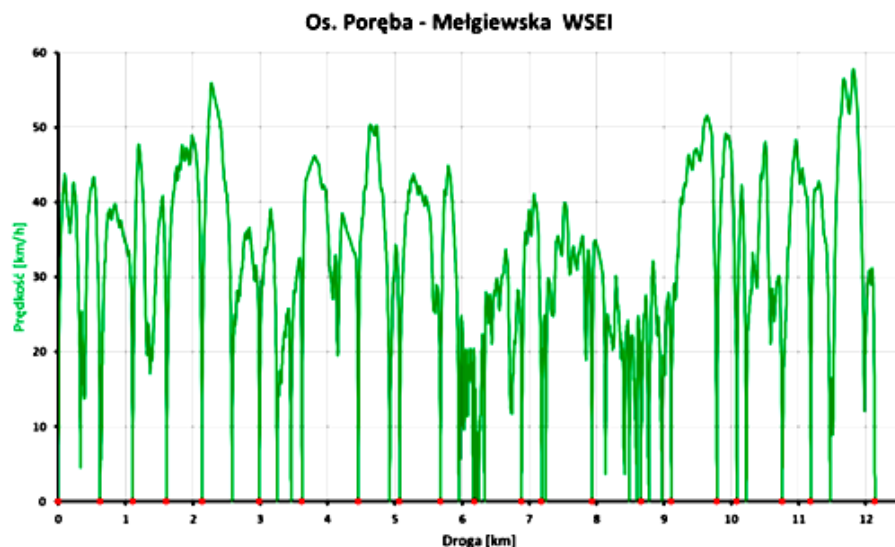
85



Rys. 3.4. Charakterystyka prędkości w funkcji czasu pierwszego odcinka

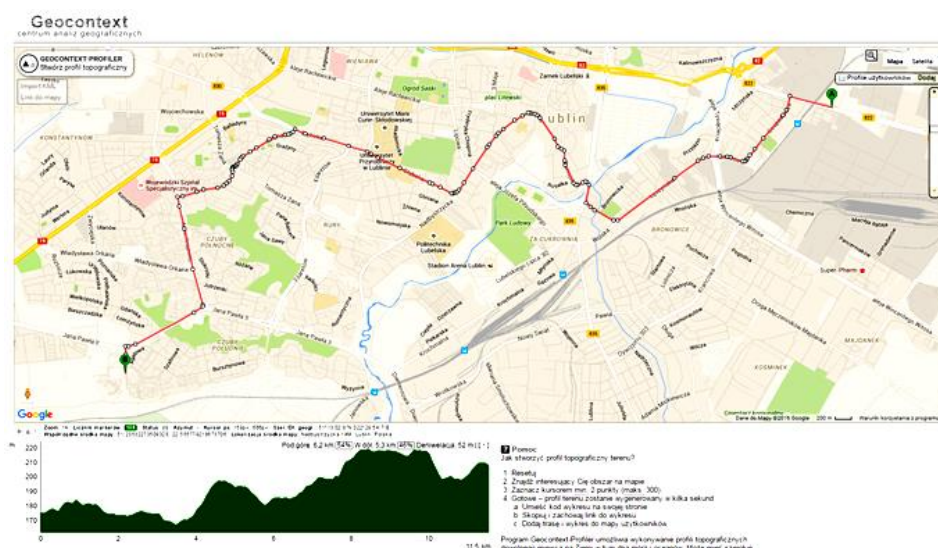


Rys. 3.5. Charakterystyka prędkości w funkcji drogi pierwszego odcinka



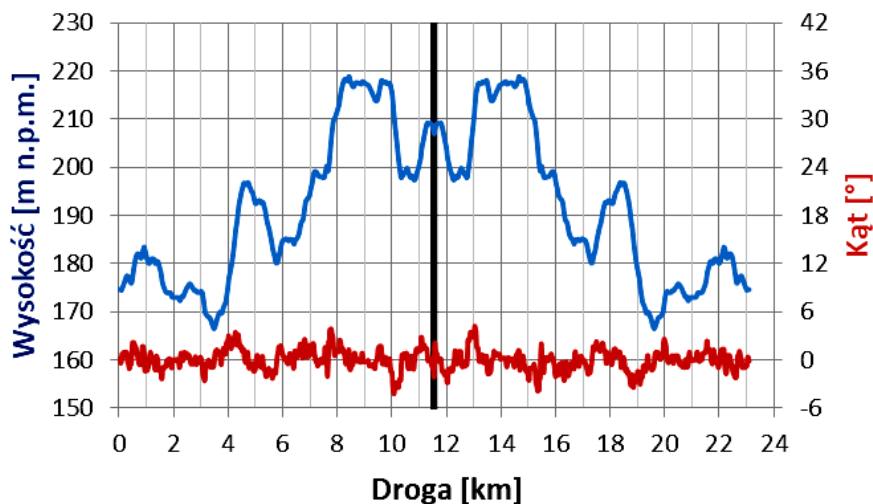
Rys. 3.7. Charakterystyka prędkości w funkcji drogi drugiego odcinka

Do opracowania profilu topograficznego trasy, dla której wykonano pomiary, wykorzystano narzędzie Geocontext (rys. 3.8.). Po wprowadzeniu przebiegu trasy, na podstawie której z bazy danych odczytywana jest wysokość nad poziomem morza dla każdego z punktów narzędzie generuje tabelę w formacie CSV, którą można interpretować i wykorzystać do obliczeń.



Rys. 3.8. Narzędzie topograficzne Geocontext

Na podstawie otrzymanych danych opracowano charakterystykę ukształtowania terenu dla linii 159. Z uwagi na fakt, że przebieg trasy tej linii jest jednakowy w obu kierunkach dla uproszczenia przyjęto lustrzane odbicie charakterystyki nachylenia terenu dla drugiego odcinka względem pierwszego (rys. 3.9.).

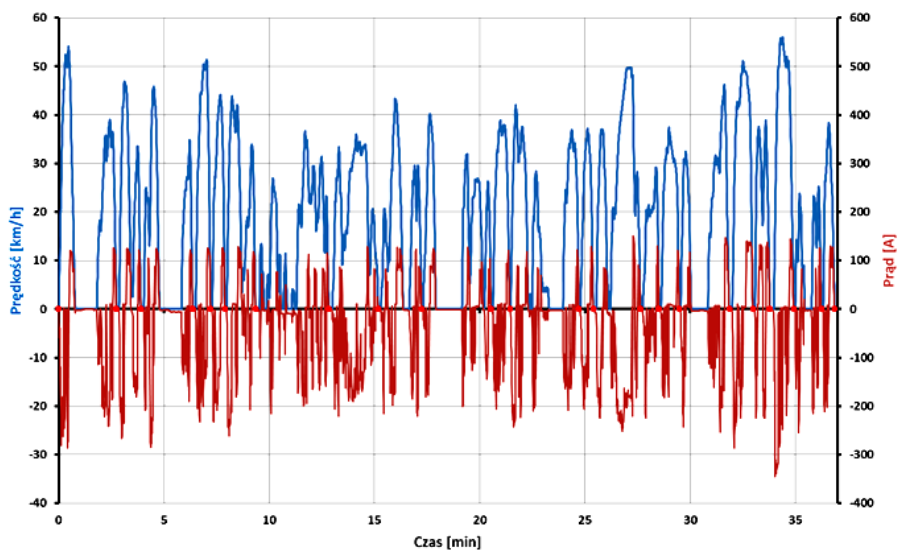


Rys. 3.9. Charakterystyka wysokości oraz nachylenia drogi dla linii 159

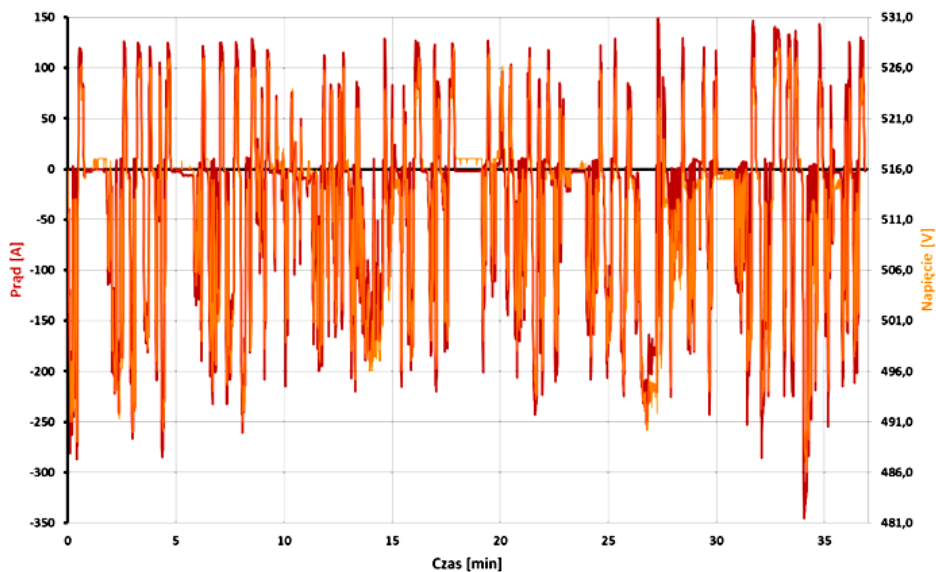
Średnia wysokość dla trasy wynosi 192 m n.p.m. Przez 51,6% jej trwania pojazd porusza się pod górę lub po płaskim. Po skumulowaniu pokonanej wysokości autobus podczas całego przejazdu wjeżdża na teren o wysokości 194 m względem początku, a średni kąt podjazdów wynosi $0,93^\circ$. Udział zjazdów to 48,4%, lecz sumaryczna wartość zjazdów równa jest skumulowanej wartości podjazdów, co wynika z tego, że pokonuje się dwa lustrzane odcinki. Stąd średni kąt zjazdów wynosi $-0,99^\circ$ czyli jazda z góry jest intensywniejsza i mniejszy musi być jej udział, aby w finalnym bilansie rozpocząć i zakończyć przejazd na tej samej wysokości.

Rejestracja poboru (a także odzysku z hamowania) energii z baterii polegała na monitorowaniu poziomu napięcia oraz przepływu prądu na zaciskach akumulatorów. Dane o tych wielkościach zbierane są przez system BMS (*Battery Management System*) i przesyłane do głównego sterownika autobusu.

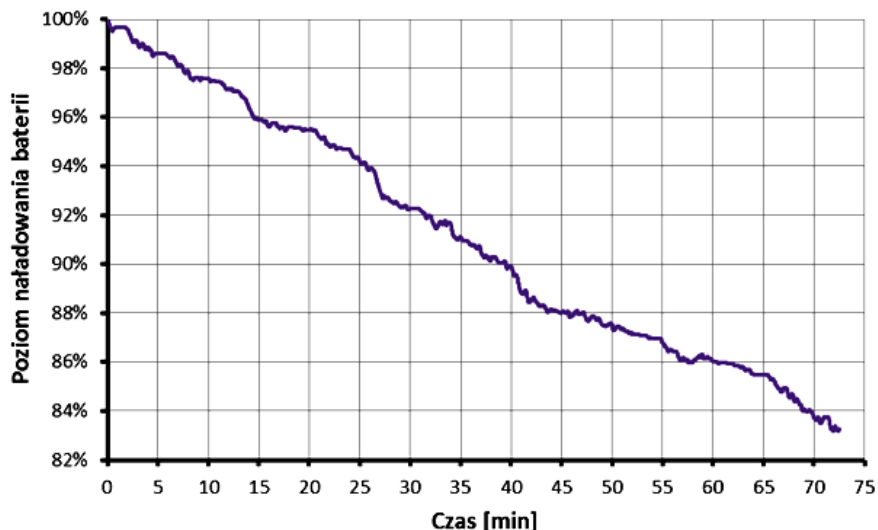
Zależność natężenia prądu od zmiany prędkości jazdy przedstawiono na rys. 3.10. (patrz rys. na s. 89) na przykładzie pierwszego odcinka (jazda z Mełgiewska WSEI w kierunku Os. Poręba). Natomiast na rys. 3.11. (patrz rys. na s. 89) można zaobserwować zależność wartości napięcia od prądu.



Rys. 3.10. Zależność poboru prądu od zmiany prędkości pojazdu dla pierwszego odcinka



Rys. 3.11. Zależność napięcia od natężenia prądu pojazdu dla pierwszego odcinka



Rys. 3.12. Poziom naładowania baterii w perspektywie całego badania

Rysunek 3.12. przedstawia zmianę poziomu naładowania akumulatorów zainstalowanych w autobusie EkoVolt w czasie całego przejazdu. Można z niego odczytać, że po upływie 73 minut i przejechaniu 24 km poziom ten obniżył się ze 100% naładowania do ok. 83%. Przyjmując tym samym maksymalną dopuszczalną granicę rozładowania baterii jako 10%, można oszacować w sposób przybliżony, że zasięg badanego pojazdu wynosi ok. 127 km.

3.3. Metodyka badań trolejbusu URSUS T70116

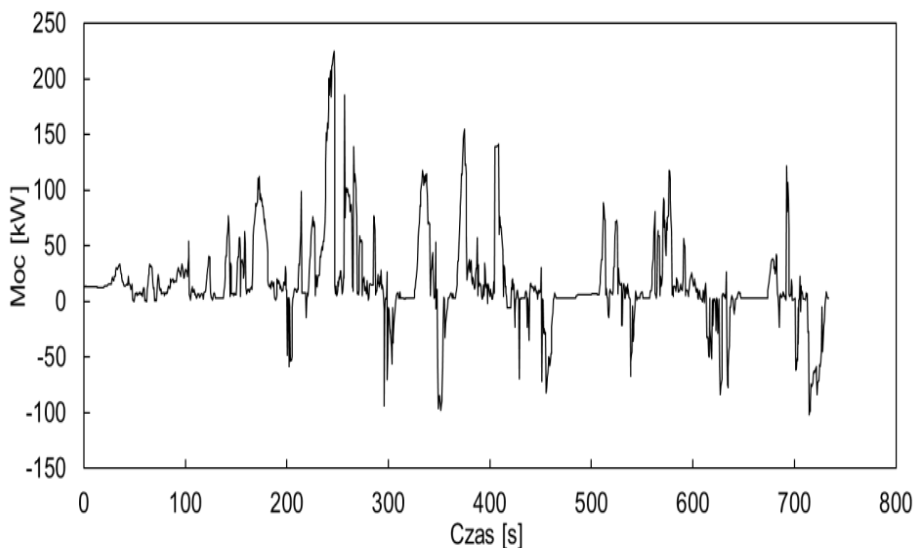
Pomiarów zużycia energii dokonano na jednym egzemplarzu trolejbusu URSUS T70116 udostępnionym przez ZTM. Pojazd był nowy z roku 2013 o przebiegu ok. 170 km. Pojazd został obciążony do wartości znamionowej za pomocą worków z piaskiem. Badania przeprowadzono w godzinach 19:00–23:00. Pomiarów wykonano w dniu 20 listopada 2013 r. Temperatura otoczenia w czasie badań wynosiła ok. 5°C. Pomiarów dokonywano przy włączonym oświetleniu zewnętrznym i wewnętrznym trolejbusu oraz przy wyłączonym ogrzewaniu przedziału pasażerskiego.

Podczas badań rejestrowano wartości natężenia prądu i napięcia na zaciskach akumulatora bądź na zaciskach pantografu, zależnie od rodzaju źródła zasilania. Do pomiarów wykorzystano dwa multimetry, gdzie w przypadku pomiaru prądu zastosowano dodatkową cęgową sondę prądową. Dane rejestrowane były z częstotliwością 2 Hz. Chwilową moc obliczano jako iloczyn natężenia prądu i napięcia. Zużycie energii określano jako wartość skumulowaną iloczynu mocy i okresu próbkowania na odcinku testowym.

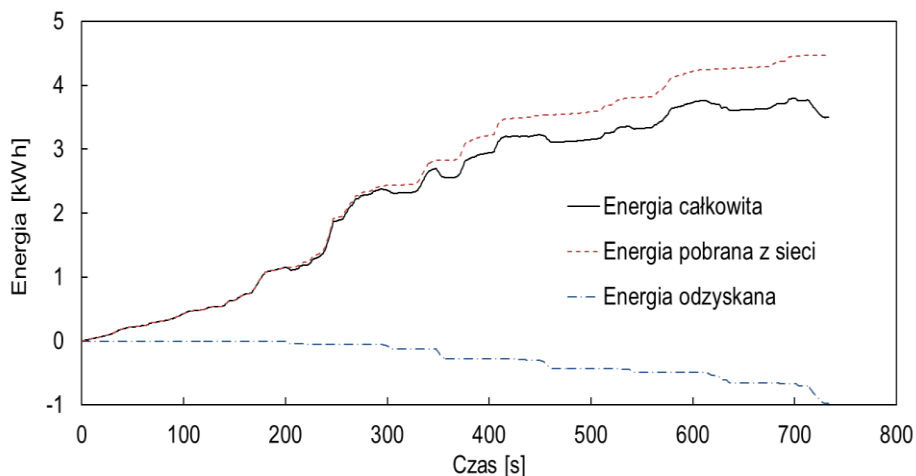
Pomiary zużycia energii z sieci trakcyjnej w warunkach jazdy miejskiej przeprowadzono na odcinku nr 1: zajezdnia trolejbusowa przy al. Kraśnickiej 25 – Al. Raławickie – ul. Lipowa – Al. J. Piłsudskiego (przystanek komunikacji miejskiej przy MPWiK). Długość odcinka testowego wynosiła 3,2 km. Przed przystąpieniem do pomiarów akumulator trakcyjny został całkowicie naładowany.

Pomiary zużycia energii przy zasilaniu akumulatorowym przeprowadzono na odcinku nr 2: Al. J. Piłsudskiego (przystanek komunikacji miejskiej przy MPWiK) – Al. Zygmunta – Al. Unii Lubelskiej – Al. Tysiąclecia – Al. Solidarności – ul. Dolna 3 Maja – ul. 3 Maja – Krakowskie Przedmieście – Al. Raławickie (przystanek komunikacji miejskiej Ogród Saski 03). Długość odcinka testowego wynosiła 5.4 km. Podczas badań wyznaczoną trasę pokonywano trzykrotnie, a akumulator trakcyjny przed każdym przejazdem ładowano z sieci trakcyjnej do stanu całkowitego naładowania.

Na poniższych rysunkach przedstawiono przebiegi chwilowej mocy na zaciskach pantografu (rys. 3.13.) oraz skumulowane wartości energii (rys. 3.14., patrz s. 92). Ujemne wartości mocy oznaczają odzysk energii podczas hamowania pojazdu. Na rys. 3.14. dodatkowo przedstawiono skumulowane wartości energii pobranej z sieci trakcyjnej oraz energii odzyskanej i oddanej do sieci. W tabeli 3.2. (patrz tab. na s. 92) przedstawiono zbiorcze wyniki uzyskane w teście.



Rys. 3.13. Przebieg mocy chwilowej na zaciskach pantografu



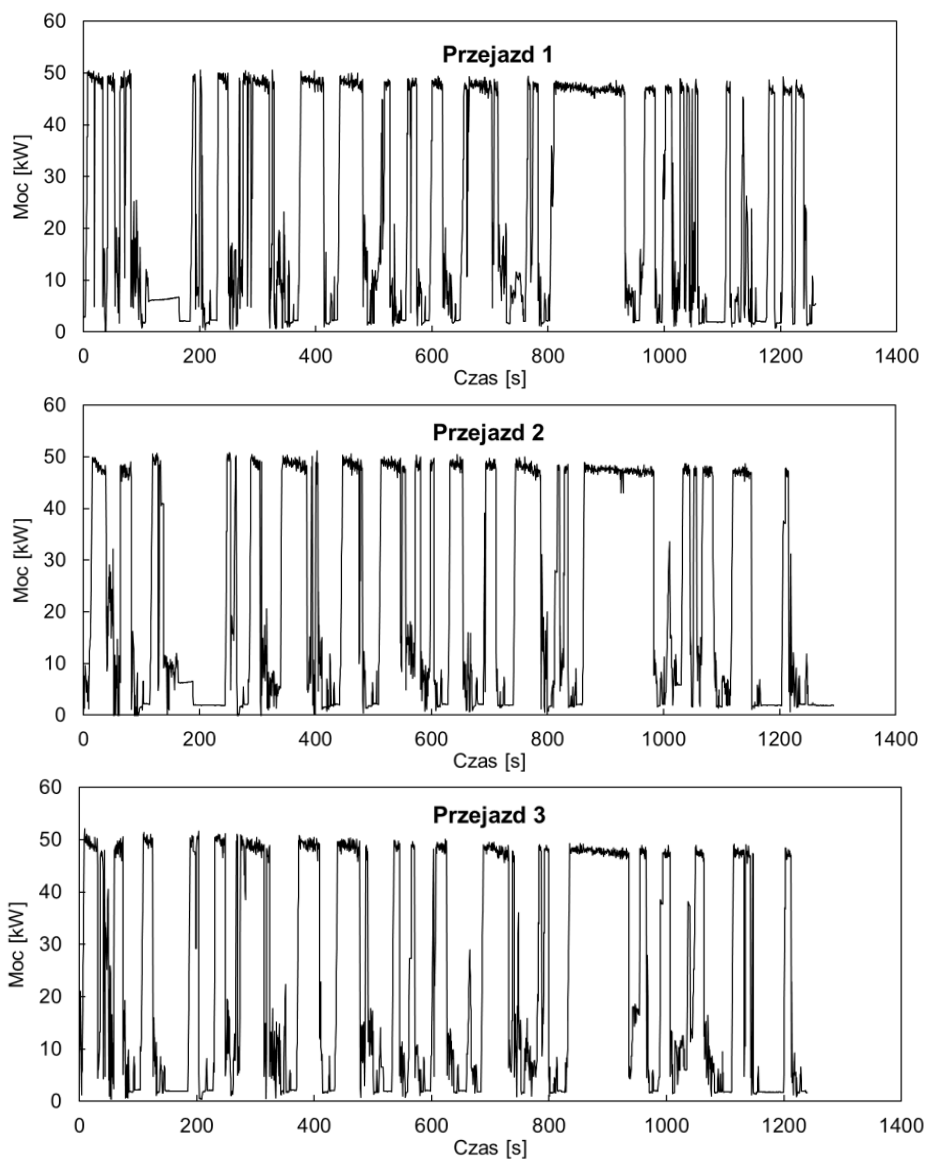
Rys. 3.14. Skumulowana wartość energii pobranej z sieci i odzyskanej do sieci trakcyjnej

Tab. 3.2. Zestawienie wyników badań przy zasilaniu trolejbusu z sieci trakcyjnej

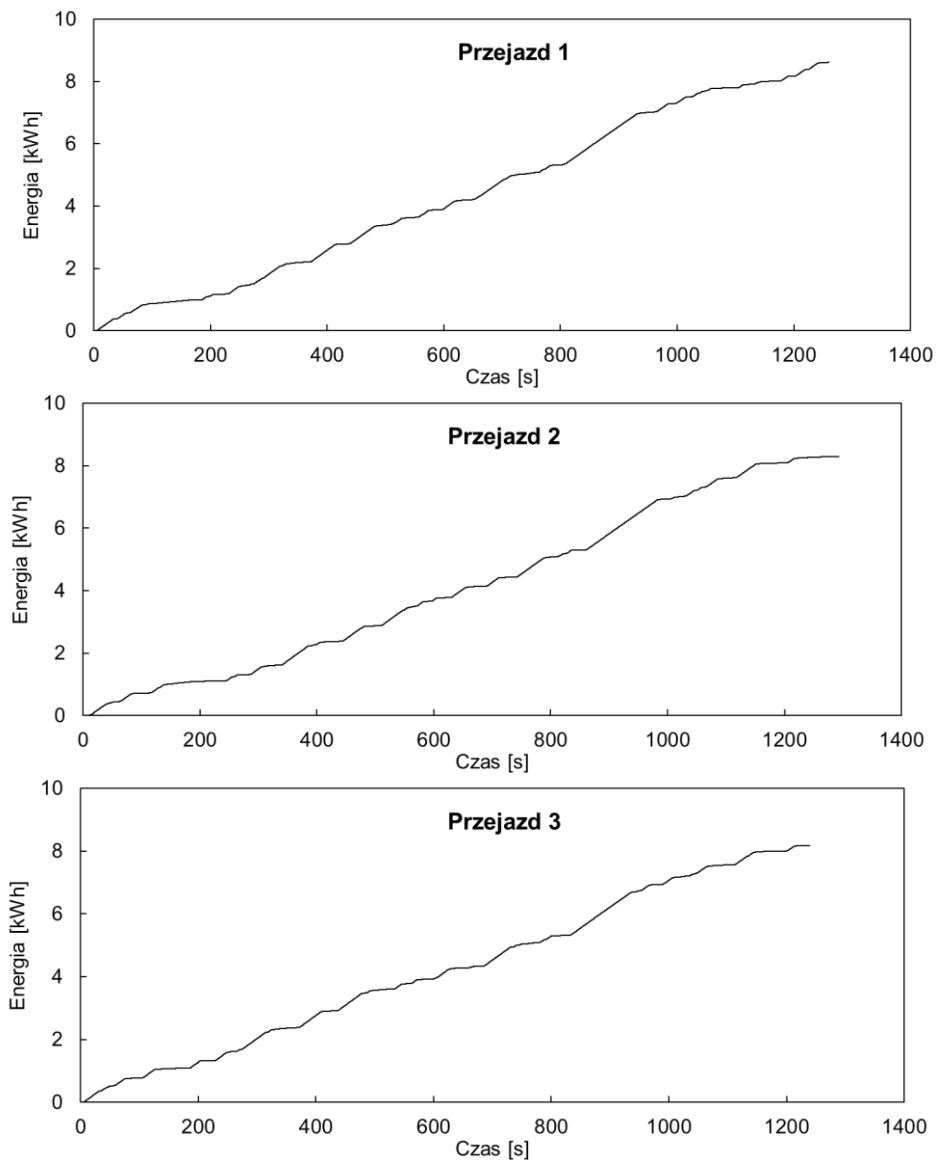
Wielkość	Jednostka	Wartość
Długość odcinka pomiarowego	km	3,2
Czas przejazdu	s	733
Średnia prędkość	km/h	15,7
Średnie zużycie energii	kWh/km	1,093
Energia pobrana z sieci	kWh/km	1,398
Energia odzyskana podczas hamowania	kWh/km	0,305
Maksymalny pobór mocy z sieci	kW	247
Maksymalny pobór prądu z sieci	A	310
Maksymalna moc oddawana do sieci	kW	98
Maksymalny prąd oddawany do sieci	A	138

Wyniki badań przy akumulatorowym zasilaniu trolejbusu

Na rysunkach 3.15. i 3.16. (patrz s. 93, 94) przedstawiono przebiegi chwilowej mocy na zaciskach akumulatora oraz skumulowane wartości energii dla 3 kolejnych przejazdów na odcinku testowym. Maksymalna moc podczas zasilania akumulatora wynosiła ok. 50 kW i wynikała z działania ogranicznika maksymalnego prądu pobieranego z akumulatora do wartości 75 A. W tabeli 3.3. (patrz tab. na s. 94) przedstawiono zestawienie uzyskanych wyników.



Rys. 3.15. Przebiegi chwilowych wartości mocy na zaciskach akumulatora



Rys. 3.16. Skumulowane wartości energii pobranej z akumulatora trakcyjnego

Tab. 3.3. Zestawienie wyników badań przy akumulatorowym zasilaniu trolejbusu

Wielkość	Jednostka	Wartość		
		Przej. 1	Przej. 2	Przej. 3
Długość odcinka pomiarowego	km	5,4	5,4	5,4
Czas przejazdu	s	1259	1293	1237
Średnia prędkość	km/h	15,4	15,0	15,7
Zużycie energii w teście	kWh	8,62	8,30	8,18
Kilometrowe zużycie energii	kWh/km	1,596	1,537	1,515

3.4. Metodyka badań trolejbusu SOLARIS Trollino 18M

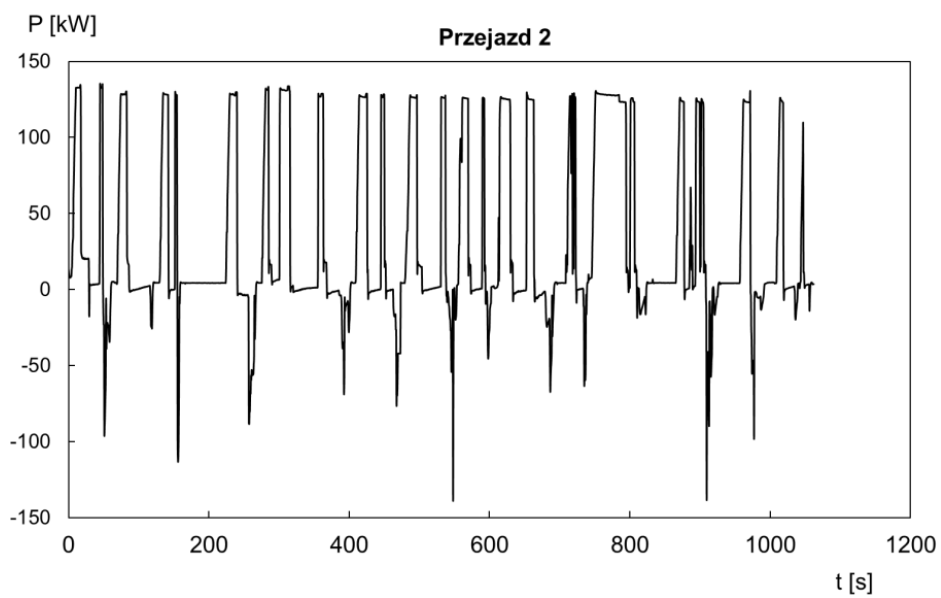
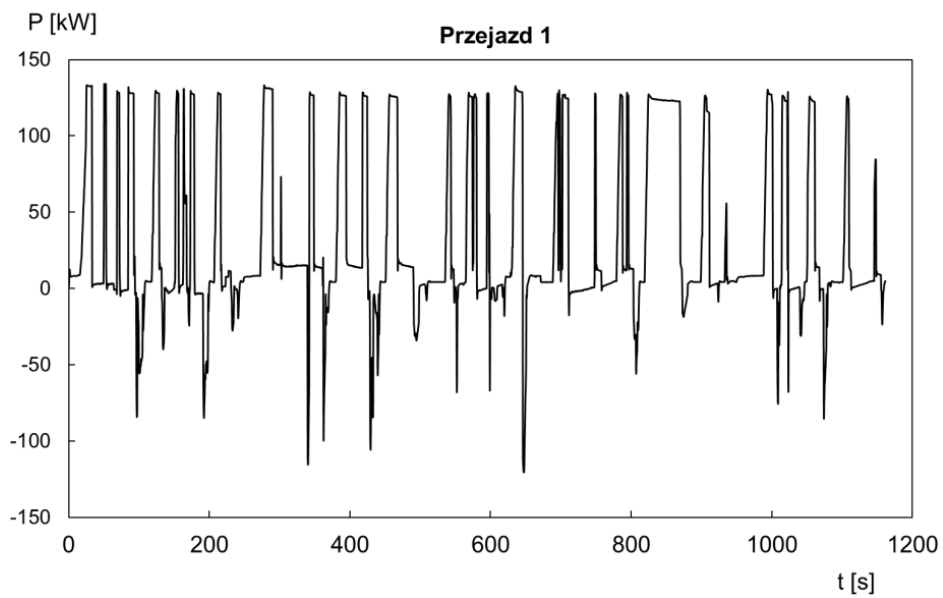
Pomiary zużycia energii przeprowadzono na jednym egzemplarzu trolejbusu SOLARIS Trollino 18M udostępnionym przez ZTM. Pojazd był nowy z roku 2014 o przebiegu ok. 46 km. Pojazd wyposażony był w akumulator trakcyjny o nominalnej energii 38 kWh przy stopniu naładowania wynoszącym 91%. Pojazd został obciążony do wartości znamionowej za pomocą worków z piaskiem. Badania przeprowadzono w dniu 22 maja 2014 w godzinach 19:00–23:00. Temperatura otoczenia podczas badań wynosiła ok. 20°C. Pomiary przeprowadzono przy włączonym oświetleniu zewnętrznym i wewnętrznym trolejbusu oraz przy wyłączonym układzie klimatyzacji.

Podczas badań rejestrowano wartości natężenia prądu i napięcia na zaciskach baterii akumulatorów. Do pomiarów wykorzystano dwa multimetry z komputerową rejestracją sygnałów, a w przypadku pomiaru prądu zastosowano dodatkową cęgową sondę prądową. Dane rejestrowane były z częstotliwością 2 Hz. Chwilową moc obliczano jako iloczyn natężenia prądu i napięcia. Dokładność określania mocy wynosiła +/- 3% przy zakresie pomiarowym 200 kW. Zużycie energii określano jako wartość skumulowaną iloczynu mocy i czasu na odcinku testowym.

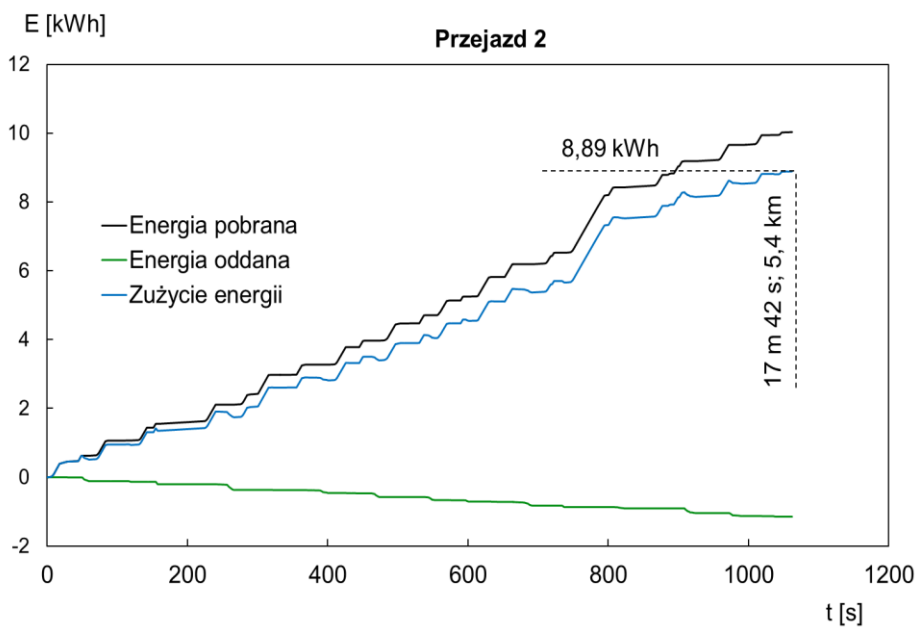
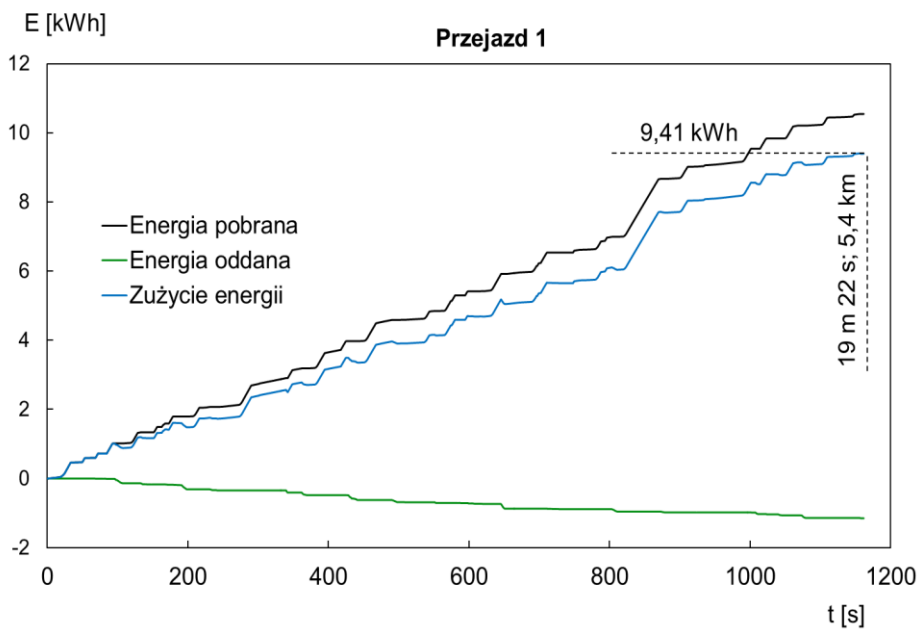
Wyniki badań zużycia energii przy akumulatorowym zasilaniu trolejbusu

Pomiary zużycia energii przy zasilaniu akumulatorowym przeprowadzono na odcinku: Al. J. Piłsudskiego (przystanek komunikacji miejskiej przy MPWiK) – Al. Zygmuntowskie – Al. Unii Lubelskiej – Al. Tysiąclecia – Al. Solidarności – ul. Dolna 3 Maja – ul. 3 Maja – Krakowskie Przedmieście – Al. Racławickie (przystanek komunikacji miejskiej Ogród Saski 03). Długość odcinka testowego wynosiła 5.4 km. Podczas badań wyznaczoną trasę pokonywano dwukrotnie, a akumulator trakcyjny przed każdym przejazdem ładowano z sieci trakcyjnej do chwili wyłączenia urządzenia ładującego (stopień naładowania 91%).

Na rysunkach 3.17. (patrz s. 96) przedstawiono przebiegi chwilowej mocy na zaciskach akumulatora oraz skumulowane wartości energii (rys. 3.18., patrz s. 97) dla dwóch kolejnych przejazdów na odcinku testowym. Maksymalna moc przy zasilaniu akumulatorowym wynosiła ok. 130 kW i wynikała z działania ogranicznika maksymalnego prądu pobieranego z akumulatora do wartości 200 A. W tabeli 3.4. (patrz tab. na s. 98) przedstawiono zestawienie uzyskanych wyników. Maksymalne zużycie energii w teście wyniosło 9,41 kWh, co stanowi 24,8% ilości energii gromadzonej w akumulatorach przy 91%-owym stopniu naładowania.



Rys. 3.17. Przebiegi chwilowych wartości mocy na zaciskach baterii akumulatorów



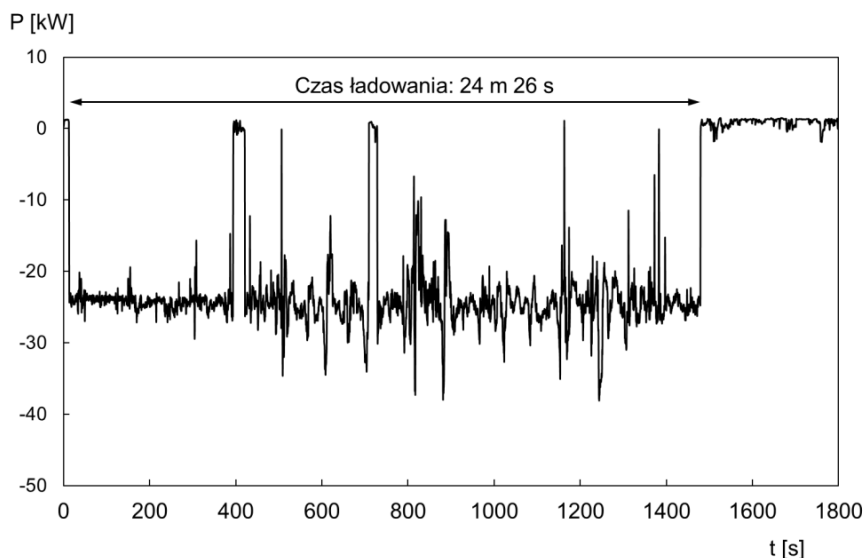
Rys. 3.18. Skumulowane wartości energii pobranej oraz oddanej do akumulatorów trakcyjnych

Tab. 3.4. Zestawienie wyników badań przy akumulatorowym zasilaniu trolejbusu

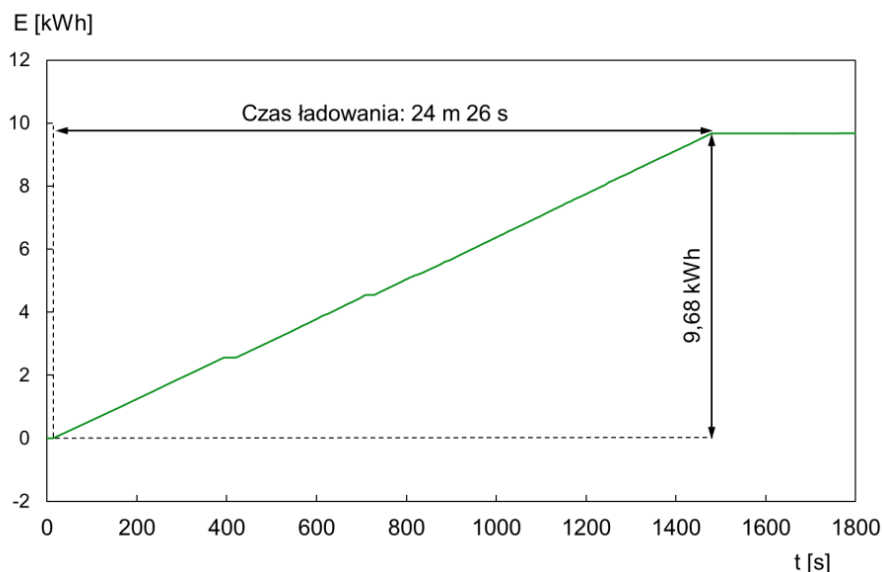
Wielkość	Jednostka	Wartość	
		Przejazd 1	Przejazd 2
Długość odcinka pomiarowego	km	5,4	5,4
Czas przejazdu	s	1162	1062
Średnia prędkość	km/h	16,73	18,31
Zużycie energii w teście	kWh	9,41	8,89
Kilometrowe zużycie energii	kWh/km	1,74	1,65

Na podstawie charakterystyki stopnia naładowania dostarczonej przez producenta baterii akumulatorów określono stopień rozładowania jako zmianę stopnia naładowania od 91% do wartości jaka zostanie uzyskana po pobraniu ilości energii zmierzonej podczas badań. Wartość początkowa 91% odpowiada stopniowi naładowania, przy którym samoczynnie wyłącza się urządzenie ładujące. Dla próby o większej energochłonności (przejazd nr 1) stopień naładowania baterii akumulatorów zmniejszył się z 91% do 72%.

Próba ładowania odbyła się podczas jazdy przy zasilaniu z sieci trakcyjnej. Na rysunku 3.19. przedstawiono pobór mocy podczas ładowania baterii akumulatorów, a na rysunku 3.20. (patrz s. 99) skumulowaną energię. Czas ładowania akumulatorów trakcyjnych wyniósł 24 min 26 s. Ilość energii pobrana przez baterię akumulatorów podczas ładowania wyniosła 9,68 kWh.



Rys. 3.19. Przebieg mocy chwilowej na zaciskach baterii akumulatorów podczas ładowania



Rys. 3.20. Skumulowane wartości energii pobranej podczas ładowania akumulatorów trakcyjnych

3.5. Wyznaczenie energochłonności dla trolejbusów Solaris Trollino 12S, 18M oraz autobusu elektrycznego E70110

Celem badań jest analiza oraz opracowanie wykresów zmian energochłonności dla zarejestrowanych w warunkach rzeczywistej eksploatacji przebiegów zmian wartości natężenia oraz napięcia w czasie dla trzech pojazdów eksploatowanych przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Lublinie:

- trolejbusu typu Solaris Trollino 12S,
- trolejbusu typu Solaris Trollino 18M wyposażonego w baterie trakcyjne,
- autobusu elektrycznego typu Ursus E70110.

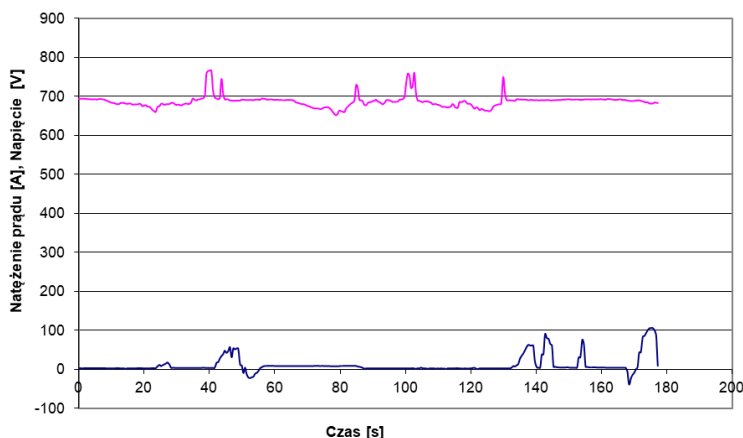
Pierwszym badanym pojazdem jest 12-metrowy trolejbus klasy MAXI typu Solaris Trollino 12S (rys. 3.21.). Trolejbusy Solaris Trollino 12S są wyposażone w układ sterowania typu Škoda BlueDrive oraz 4-polowy silnik asynchroniczny typu Škoda 4ML3444K/4. Pojazdy te nie są wyposażone w dodatkowy autonomiczny układ zasilania umożliwiający jazdę bez użycia sieci trakcyjnej. Dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S zarejestrowane zostały trzy przebiegi zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z sieci trakcyjnej w czasie dla trzech różnych tras w ruchu miejskim. Obejmują one fazy przyspieszania, jazdy ustalonej, hamowania oraz postoju trolejbusu. W zależności od parametrów poszczególnych faz ruchu wartość energochłonności, jak również natężenia prądu ulega zmianie.

Pierwszy z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z sieci trakcyjnej w czasie dla trolejbusu typu Trollino

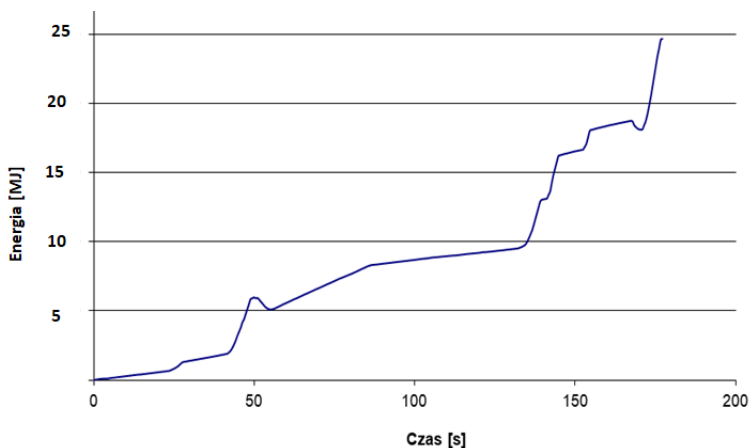
12S przedstawia rys. 3.22. (patrz rys. na s. 101) Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,3 sek. Badanie trwało 177,2 sek. Energochłonność ruchu (rys. 3.23., patrz s. 101) wzrastała do 25 sek. ruchu, kiedy pojazd ruszył. Kolejny etap ruchu obejmował jazdę z prędkością ustaloną do 40 sek. ruchu, kiedy pojazd rozpoczął proces intensywnego przyspieszania zwiększając swoją prędkość. Około 51 sek. trolejbus rozpoczął fazę hamowania. Badany pojazd jest wyposażony w układ sterowania, który umożliwia rekuperację energii elektrycznej podczas hamowania. Wartość natężenia pobieranego prądu obniżyła się poniżej zera. Skutkiem tego było zmniejszenie wartości energochłonności trolejbusu. Trolejbus kolejny etap odcinka pokonał zwiększając prędkość do czasu 135 sek. i rozpoczął trwający cykl jezdny zbliżony do miejskiego, obejmujący częste przyspieszanie oraz hamowanie.



Rys. 3.21. Trolejbus typu Solaris Trollino 12S

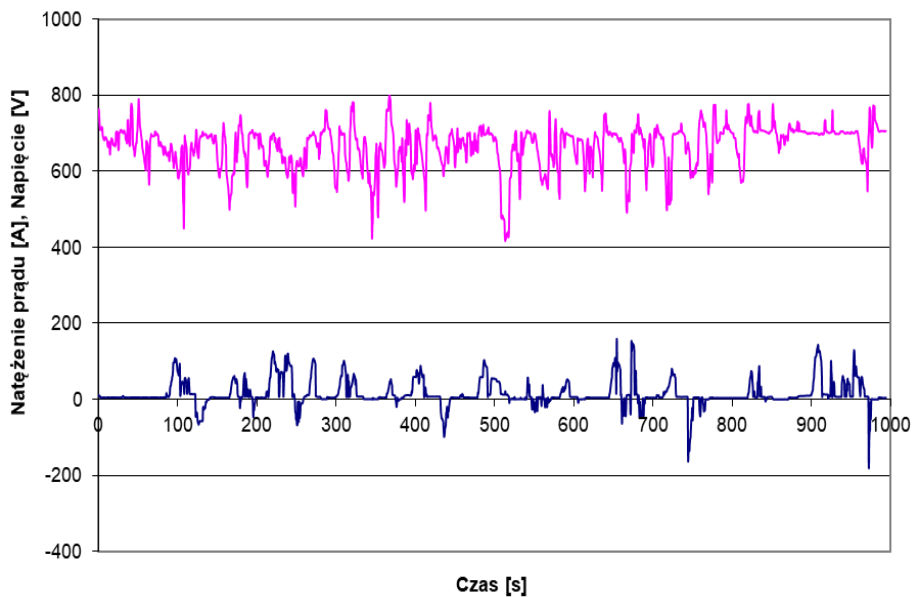


Rys. 3.22. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu przez trolejbus typu Solaris Trollino 12S w trakcie pierwszego badania

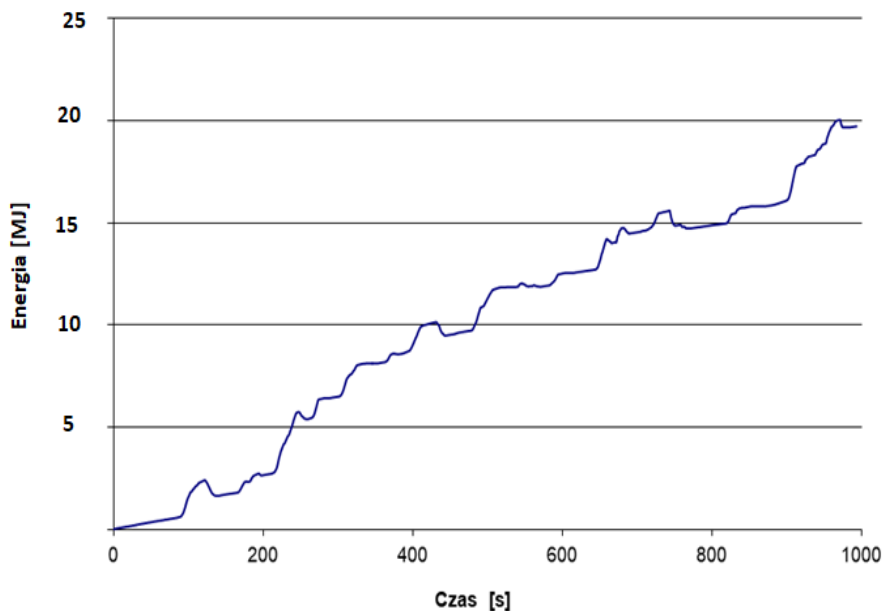


Rys. 3.23. Skumulowana wartość energii pobranej z sieci trakcyjnej w trakcie pierwszego badania dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S

Drugi z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z sieci trakcyjnej w czasie dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S przedstawia rys. 3.24. (patrz rys. na s. 102) Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,3 sek. Badanie trwało 993,9 sek. Energochłonność (rys. 3.25., patrz s. 102) wzrastała w sposób uzależniony od intensywności danych faz ruchu. Podczas przyspieszania energochłonność ruchu znacznie zwiększała swoją wartość w sposób uzależniony od przebiegu fazy. Podczas fazy ruchu ustalonego energochłonność nieznacznie zwiększała swoją wartość w sposób liniowy, a podczas fazy hamowania znacznie zmniejszała swoją wartość poprzez rekuperację energii elektrycznej do sieci trakcyjnej.

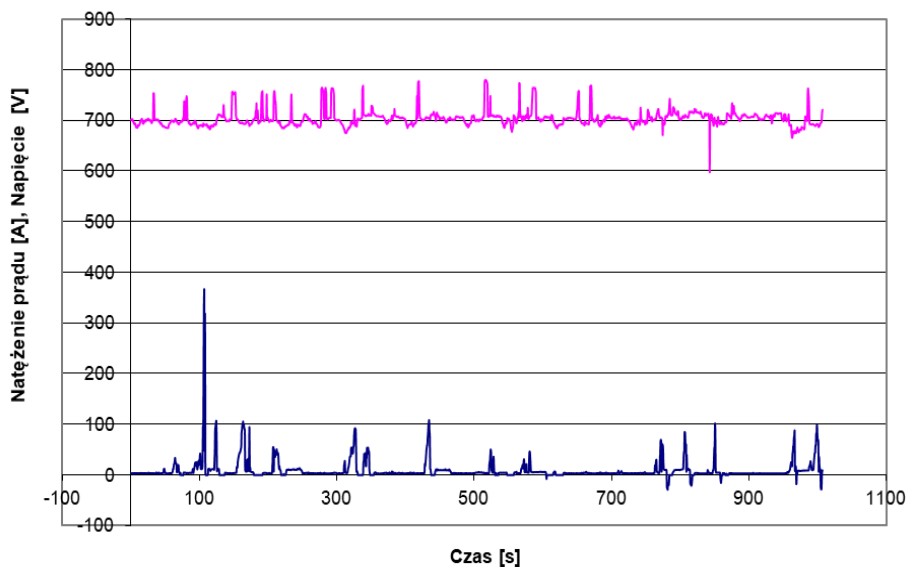


Rys. 3.24. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu przez trolejbus typu Solaris Trollino 12S w trakcie drugiego badania

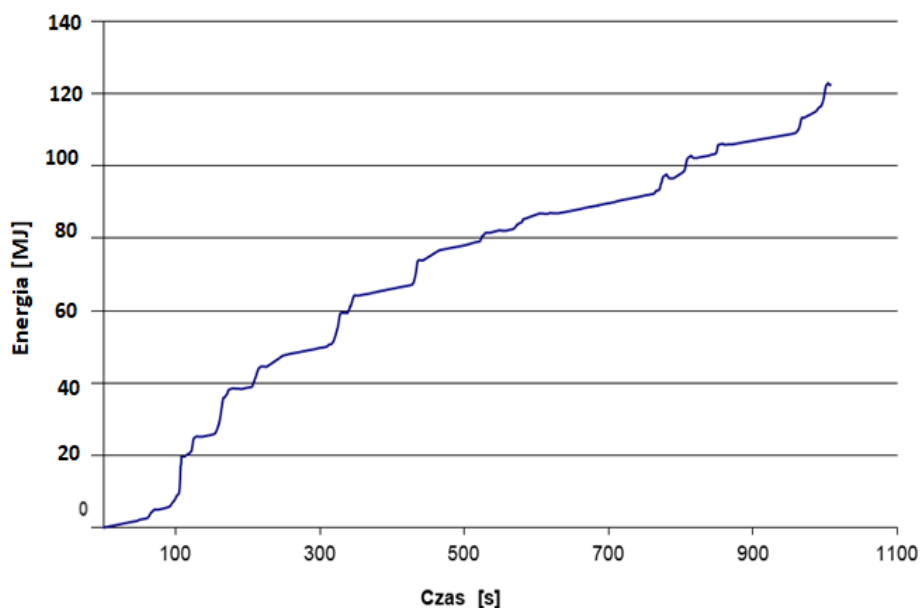


Rys. 3.25. Skumulowana wartość energii pobranej z sieci trakcyjnej w trakcie drugiego badania dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S

Trzeci z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z sieci trakcyjnej w czasie dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S przedstawia rys. 3.26. Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,3 sek. Badanie trwało 1007,3 sek. i realizowało jazdę charakterystyczną dla cyklu miejskiego, obejmującą częste fazy przyspieszania oraz hamowania. Energochłonność (rys. 3.27., patrz s. 104), podobnie jak w przypadku poprzednich przebiegów wzrastała w sposób uzależniony od intensywności danych faz ruchu. Wartość napięcia sieci trakcyjnej oscylowała między 400 V a 800 V między innymi w zależności od aktualnego zapotrzebowania dla odcinka sieci trakcyjnej przez inne trolejbusy.



Rys. 3.26. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu przez trolejbus typu Solaris Trollino 12S w trakcie trzeciego badania.



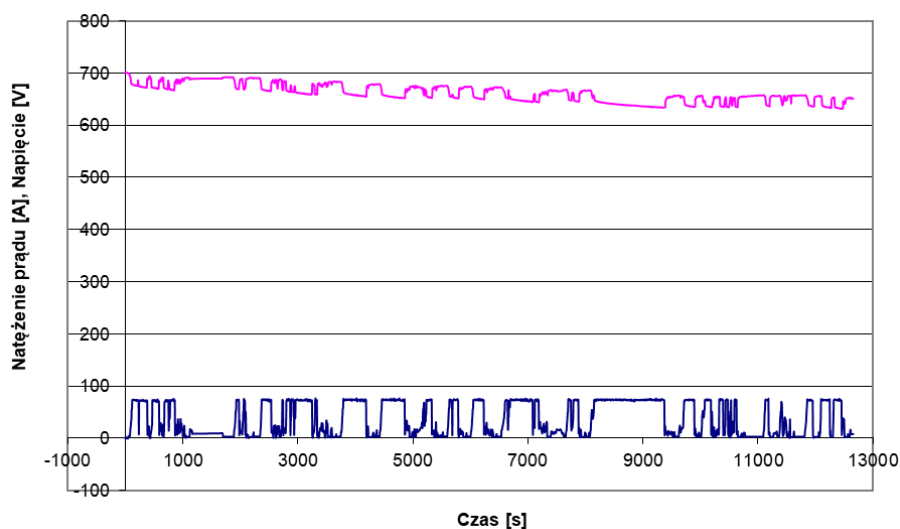
Rys. 3.27. Skumulowana wartość energii pobranej z sieci trakcyjnej w trakcie trzeciego badania dla trolejbusu typu Solaris Trollino 12S

Drugim badanym pojazdem jest 18-metrowy trolejbus klasy MEGA typu Solaris Trollino 18M (rys. 3.28., patrz s. 105). Pojazdy tego typu eksploatowane są od roku 2014 przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Lublinie. Trolejbusy Solaris Trollino 18M są wyposażone w układ sterowania polskiej produkcji typu MEDCOM ANT 240-600 oraz 6-półowy silnik asynchroniczny. Pojazdy te są wyposażone w dodatkowy autonomiczny układ zasilania umożliwiający jazdę bez użycia sieci trakcyjnej w postaci baterii trakcyjnych Li-on. Badanie dla trolejbusu typu Solaris Trollino 18M obejmowało dwie fazy jazdy z użyciem baterii trakcyjnych oraz dwie fazy jazdy z użyciem sieci trakcyjnej podczas których ładowano baterie trakcyjne. Dla każdej z fazy zarejestrowane zostały przebiegi zmian wartości napięcia i natężenia pobieranego prądu z sieci trakcyjnej w czasie dla różnych tras w ruchu miejskim. Obejmują one fazy przyspieszania, jazdy ustalonej, hamowania oraz postoju trolejbusu. W zależności od parametrów faz ruchu wartość energochłonności, jak również natężenia prądu ulega zmianie.

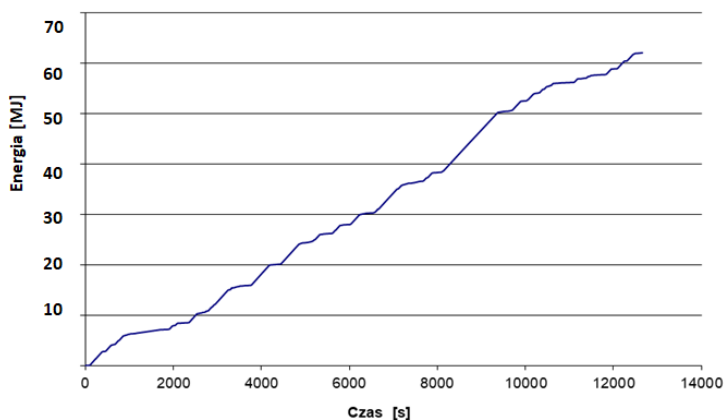


Rys. 3.28. Trolejbus typu Solaris Trollino 18M

Pierwszy z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych w czasie dla trolejbusu typu Solaris Trollino 18M przedstawia rys. 3.29. Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,5 sek. Badanie trwało 12655 sek.. Energochłonność (rys. 3.30., patrz s. 106) wzrastała wraz z przejechanym odcinkiem drogi w sposób charakterystyczny dla cyklu miejskiego. Podczas badania trolejbus korzystał z alternatywnego autonomicznego źródła energii, jakim są baterie trakcyjne, stąd też z upływem czasu wartość napięcia malała.

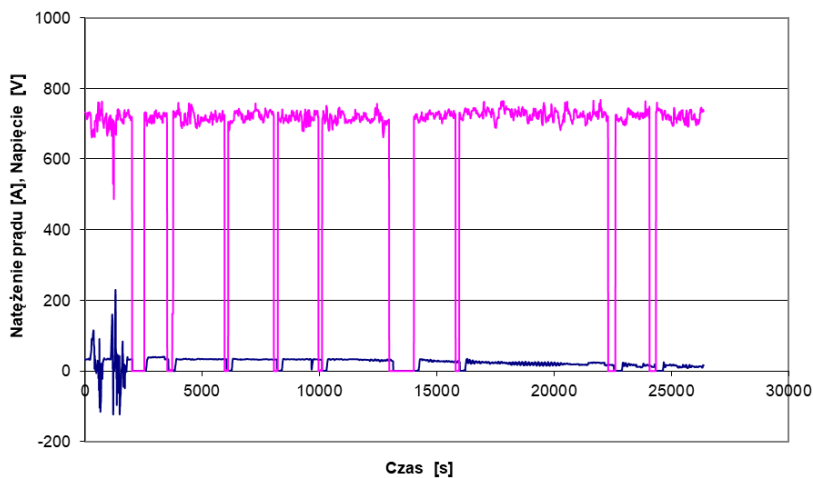


Rys. 3.29. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych przez trolejbus typu Solaris Trollino 18M w trakcie pierwszego badania obejmującego jazdę z wykorzystaniem napędu alternatywnego

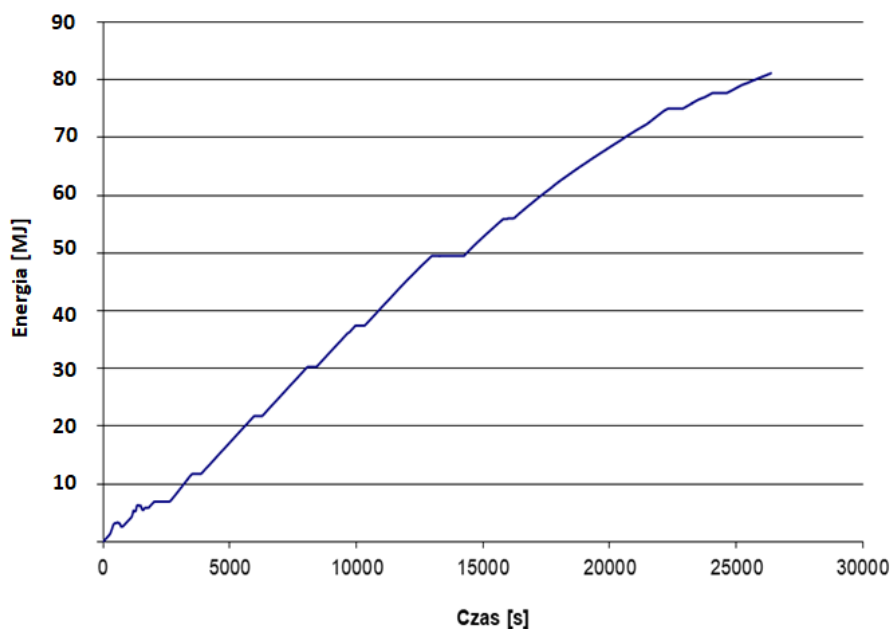


Rys. 3.30. Skumulowana wartość energii pobranej z akumulatora trakcyjnego w trakcie pierwszego badania dla trolejbusu typu Solaris Trollino 18M obejmującego jazdę z wykorzystaniem napędu alternatywnego

Drugi z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z sieci trakcyjnej w czasie dla trolejbusu typu Solaris Trollino 18M przedstawia rys. 3.31. Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,5 sek. Badanie trwało 26370 sek. Energochłonność (rys. 3.32., patrz s. 107) rosła wraz z przejechanym dystansem w sposób charakterystyczny dla cyklu miejskiego. Podczas badania trolejbus korzystał z sieci trakcyjnej, dzięki czemu możliwe było ładowanie baterii trakcyjnych.

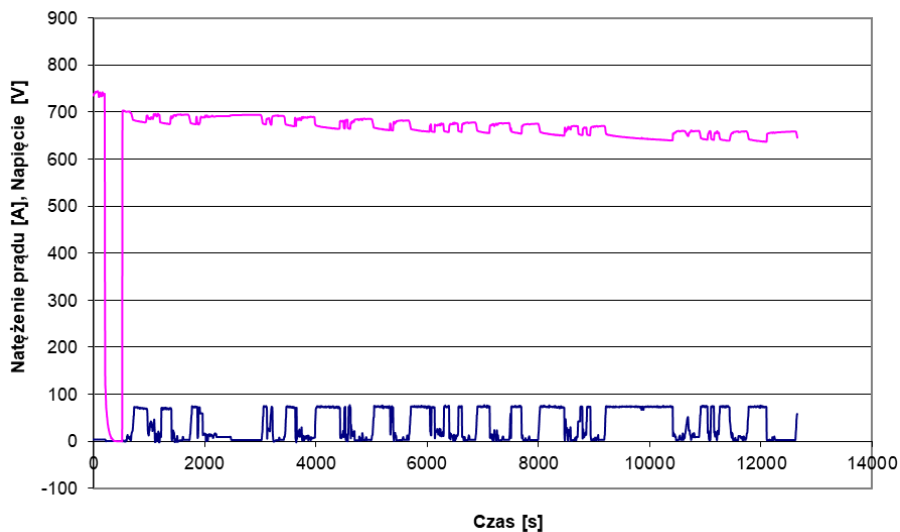


Rys. 3.31. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu przez trolejbus typu Solaris Trollino 18M w trakcie drugiego badania obejmującego proces ładowania baterii trakcyjnych

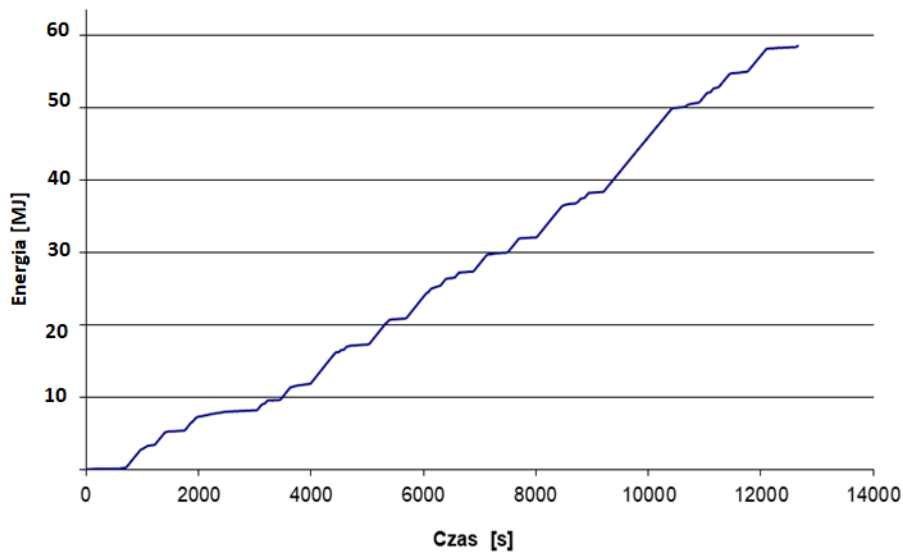


Rys. 3.32. Skumulowana wartość energii pobranej z sieci trakcyjnej w trakcie trzeciego badania dla trolejbusu typu Solaris Trollino 18M obejmującego jazdę z wykorzystaniem napędu alternatywnego

Trzeci z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych w czasie dla trolejbusu typu Trollino 18M przedstawia rys. 3.33. (patrz rys. na s. 108) Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,5 sek. Badanie trwało 15390 sek. Energochłonność (rys. 3.34., patrz s. 108) wzrastała wraz z przejechanym dystansem w sposób charakterystyczny dla cyklu miejskiego. Podczas fazy hamowania wartość energochłonności zmieniała się w związku z rekuperacją energii. W trakcie badania trolejbus korzystał z alternatywnego autonomicznego źródła energii, jakim są baterie trakcyjne, stąd też z upływem czasu wartość napięcia pobieranego prądu malała.

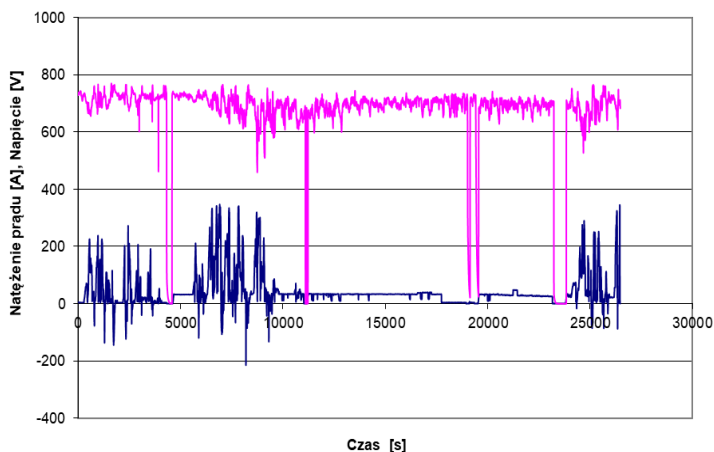


Rys. 3.33. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych przez trolejbus typu Solaris Trollino 18M w trakcie trzeciego badania obejmującego jazdę z wykorzystaniem napędu alternatywnego

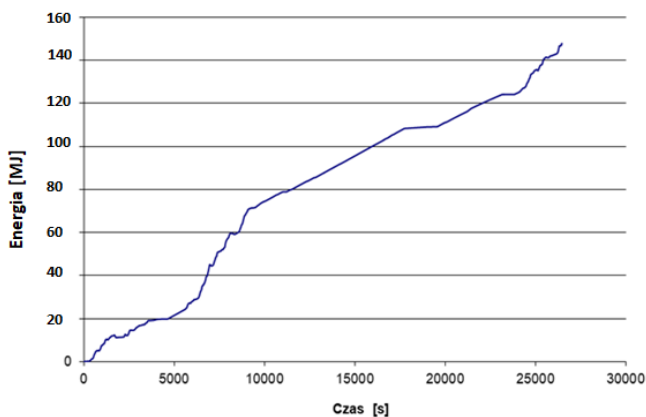


Rys. 3.34. Skumulowana wartość energii pobranej z akumulatora trakcyjnego w trakcie trzeciego badania dla trolejbusu typu Solaris Trollino 18M obejmującego jazdę z wykorzystaniem napędu alternatywnego

Czwarty z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych w czasie dla trolejbusu typu Solaris Trollino 18M przedstawia rys. 3.35. Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,5 sek. Badanie trwało 35010 sek. Energochłonność ruchu (rys. 3.36.) wzrastała wraz z przejechanym odcinkiem drogi w sposób charakterystyczny dla cyklu miejskiego. Podczas badania trolejbus korzystał z sieci trakcyjnej, dzięki czemu możliwy był proces ładowania baterii trakcyjnych.



Rys. 3.35. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu przez trolejbus typu Solaris Trollino 18M w trakcie czwartego badania obejmującego proces ładowania baterii trakcyjnych



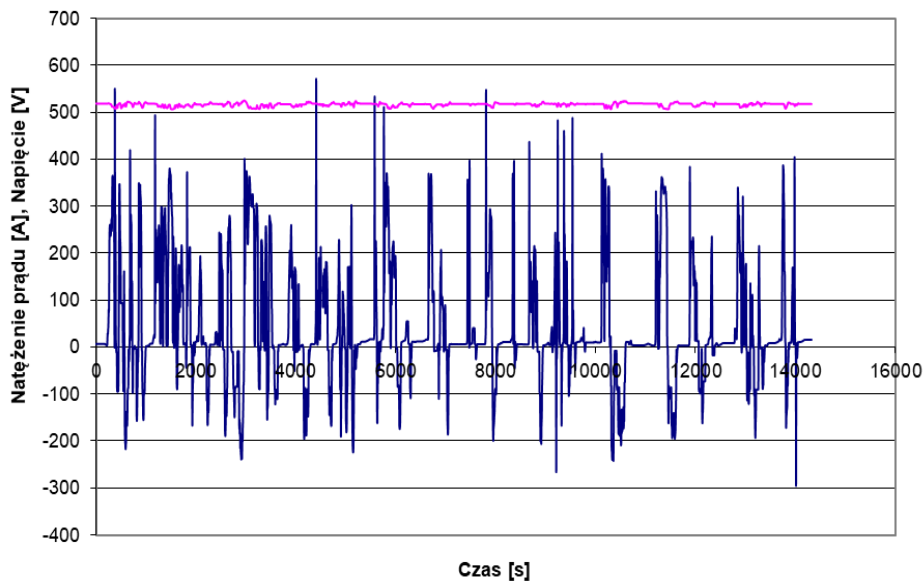
Rys. 3.36. Skumulowana wartość energii pobranej z sieci trakcyjnej w trakcie czwartego badania dla trolejbusu typu Solaris Trollino 18M obejmującego proces ładowania baterii trakcyjnych

Trzecim badanym pojazdem jest 12-metrowy autobus elektryczny klasy MAXI typu Ursus E70110 (rys. 3.37.). Pojazd ten eksploatowany jest od roku 2015 przez Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne w Lublinie. Wyposażony jest w baterie litowo-fosforowe o pojemności 120kWh. Zasięg pojazdu wynosi około 110 km. Badanie dla autobusu elektrycznego typu Ursus E70110 obejmowało trzy fazy jazdy w ruchu miejskim obejmujące fazy przyspieszania, jazdy ustalonej, hamowania oraz postoju. W zależności od realizacji poszczególnych faz ruchu wartość natężenia prądu pobieranego z baterii ulega zmianie.

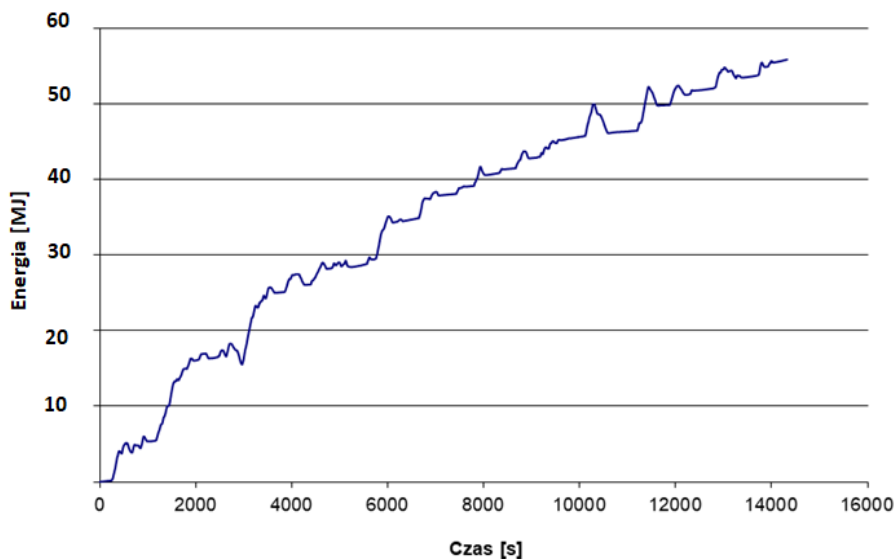
Pierwszy z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych w czasie dla autobusu elektrycznego typu Ursus E70110 przedstawia rys. 3.38. Napięcie (patrz rys. na s. 111) zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,5 sek. Badanie trwało 23338 sek. Energochłonność (rys. 3.39., patrz rys. na s. 111) wzrastała w sposób charakterystyczny dla cyklu miejskiego, w zależności od intensywności faz przyspieszania, jazdy ustalonej oraz hamowania. W trakcie hamowania natężenie prądu przybierało wartość ujemną, w związku z procesem hamowania odzyskowego z rekuperacją energii. Autobus elektryczny zasilany jest z baterii trakcyjnych, dla których obniża się wartość napięcia w trakcie pobieranego prądu.



Rys. 3.37. Autobus elektryczny typu Ursus E70110

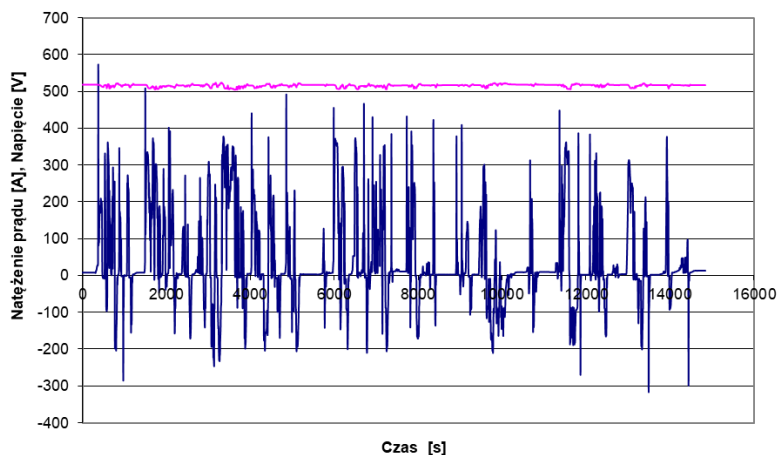


Rys. 3.38. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych przez autobus elektryczny typu Ursus E70110 w trakcie pierwszego badania

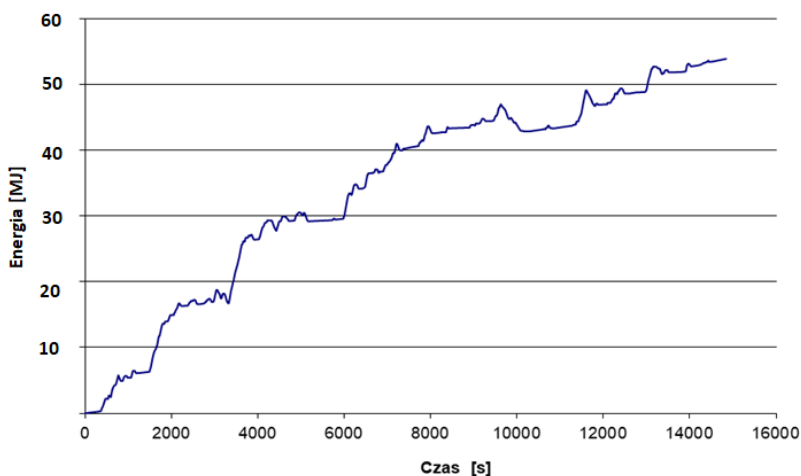


Rys. 3.39. Skumulowana wartość energii pobranej z akumulatora trakcyjnego w trakcie pierwszego badania dla autobusu elektrycznego typu Ursus E70110

Drugi z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych w czasie dla autobusu elektrycznego typu Ursus E70110 przedstawia rys. 3.40. Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,5 sek. Badanie trwało 14843 sek. Energochłonność (rys. 3.41.) wzrastała w sposób charakterystyczny dla cyklu miejskiego, w zależności od intensywności faz przyspieszania, jazdy ustalonej oraz hamowania.

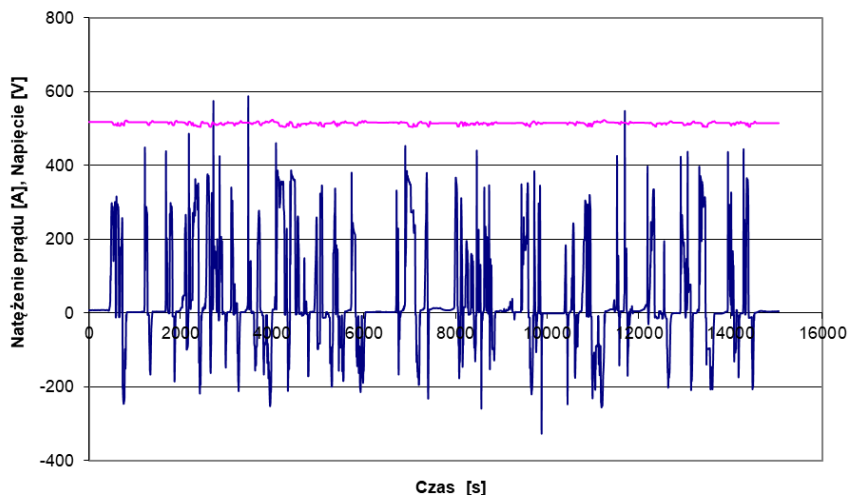


Rys. 3.40. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych przez autobus elektryczny typu Ursus E70110 w trakcie drugiego badania

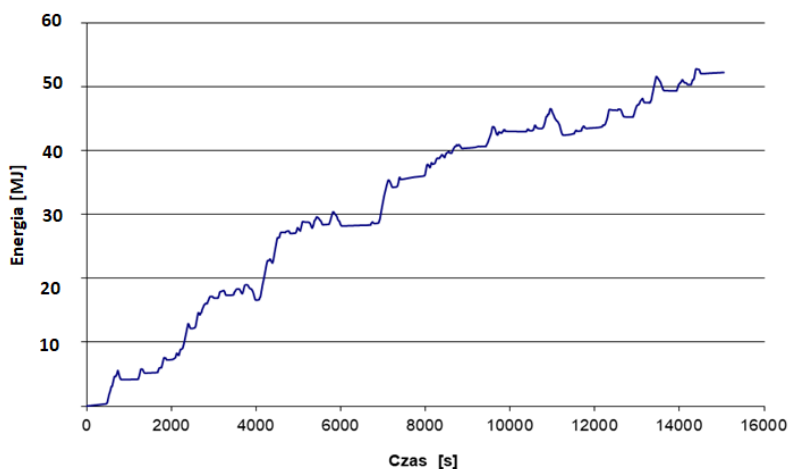


Rys. 3.41. Skumulowana wartość energii pobranej z akumulatora trakcyjnego w trakcie drugiego badania dla autobusu elektrycznego typu Ursus E70110

Trzeci z zarejestrowanych przebiegów zmian wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych w czasie dla autobusu elektrycznego typu Ursus E70110 przedstawia rys. 3.42. Napięcie zaznaczono kolorem różowym, a natężenie prądu kolorem niebieskim. Podczas przejazdu rejestrowano aktualne wartości napięcia oraz natężenia pobieranego prądu co 0,5 sek. Badanie trwało 15048 sek. Obliczona energochłonność (rys. 3.43.) wzrastała w sposób charakterystyczny dla cyklu miejskiego, w zależności od intensywności faz przyspieszania, jazdy ustalonej oraz hamowania.



Rys. 3.42. Zarejestrowany przebieg zmian napięcia oraz natężenia pobieranego prądu z baterii trakcyjnych przez autobus elektryczny typu Ursus E70110 w trakcie trzeciego badania



Rys. 3.43. Skumulowana wartość energii pobranej z akumulatora trakcyjnego w trakcie trzeciego badania dla autobusu elektrycznego typu Ursus E70110

3.6. Metodyka badań SORT

Pomiar zużycia energii przeprowadzono oddzielnie dla każdego cyklu SORT2, zgodnie z wymaganiami. Każdy z cykli bazowych jest złożeniem trzech profili prędkości przedstawionych na rysunku 1.12. (patrz na s. 32) i w tabeli 1.3. (patrz tab. na s. 32) W każdym z profili wyodrębniono trzy fazy: przyspieszania, jazdy z prędkością stałą i hamowania. Każdy z profili jest oddzielony od następnego określonym odstępem czasu.

Wykonanie pomiaru według metody SORT 2 wymagało spełnienia odpowiednich kryteriów odnośnie: odcinka pomiarowego, warunków otoczenia, przygotowania i ustawień badanego pojazdu i wykorzystanej aparatury pomiarowej.

A. Odcinek pomiarowy:

- prostoliniowy i płaski – maksymalne dopuszczalne nachylenie 1,5%,
- nawierzchnia sucha i o dobrej jakości,
- długość umożliwiająca wykonanie pełnego cyklu,
- odcinek pomiarowy został wyznaczony na ul. E. Plewińskiego w Lublinie,

B. Warunki otoczenia w czasie realizacji pomiaru.

- temperatura: 0–30°C,
 - wilgotność względna: poniżej 95%,
 - prędkość wiatru: poniżej 3 m/s, dopuszczalna w porywach do 8 m/s.
 - zakres zmian temperatury powietrza w czasie pomiarów: 19,7–20,8°C,
- wilgotność względna 53,4–51,7%, prędkość wiatru <1,8 m/s, ciśnienie atmosferyczne 984,9–984,7 hPa.

C. Przygotowanie badanego pojazdu:

- obciążenie zgodnie z wytycznymi dokumentu SORT,
- sprawdzenie stanu technicznego pojazdu,
- sprawdzenie/uzupełnienie do poziomów nominalnych płynów eksploatacyjnych,
- sprawdzenie/uzupełnienie do wartości nominalnej ciśnienia w ogumieniu,
- obciążenie dodatkowe pojazdu w czasie badań wynosiło 2200 kg.

D. Ustawienia pojazdu w trakcie pomiaru (ważniejsze):

- układ sterowania napędem: w pozycji D (*drive*),
- klimatyzacja i ogrzewanie: wyłączone,
- oświetlenie zewnętrzne: włączone światła do jazdy dziennej,
- oświetlenie wewnętrzne i elementy wyposażenia elektrycznego wyłączone,
- otwieranie drzwi: przy ostatnim postoju.

E. Aparatura badawcza (dokładność) (tab. 3.5., patrz s. 115):

- pomiar zużycia energii $\pm 2\%$,
- pomiar prędkości $\pm 0,5\%$,
- pomiar odległości $\pm 0,2\%$ (dla pomiaru długości odcinków pomiarowych).

Tab. 3.5. Parametry techniczne podstawowych czujników i rejestratora

Nazwa urządzenia	Typ	Dokładność pomiaru/ klasa przyrządu pomiarowego
Termohigrobarometr	LAB-EL LB 701	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}/\pm 0,6\%/ \pm 0,1\text{hPa}$
Wiatromierz	Mors YA45	+0,3–0,5 m/s
Manometr do pomiaru ciśnienia w oponach	KFM RPT 9822	Klasa dokładności: 2,5
Waga nieautomatyczna elektroniczna	Dini Arggeo WWSFTF	Dokładność: 2,5kg
Urządzenie do pomiarów parametrów ruchu pojazdów	Corrsys-Datron μ EEP11/S400	Prędkość $\pm 0,3\%$ Droga $\pm 0,2\%$
Analizator mocy Przekładnik prądowy	YOKOGAWA WT1800 LEM IT 1000-S/SP1	U,I: $\pm 0,05\%$ odczytu +0,1% P: $\pm 0,05\%$ odczytu +0,1% zakresu (600 V i 500 A)

Zgodnie z wymaganiami pomiary wykonano w obu kierunkach na tym samym odcinku, co pozwoliło zminimalizować wpływ wybranych czynników na wynik pomiarów (np. wiatru, nachylenia drogi). Pomiary przeprowadzono bezpośrednio po sobie, co pozwoliło na utrzymanie jednakowego stanu cieplnego układu napędowego i jezdnego. Przerwy pomiędzy kolejnymi przejazdami pomiarowymi trwały poniżej 5 min. Przebieg cyklu jezdnego był realizowany przez kierowcę na podstawie obserwacji na monitorze komputera diagramu z przebiegiem aktualnej prędkości pojazdu wynikającej z realizacji cyklu.

Pomiar zużycia energii zrealizowano poprzez rejestrację prądu pobieranego/oddawanego do baterii akumulatorów za pomocą przekładnika prądowego LEM IT 1000-S/SP1 (zamontowanego na przewodach łączących baterię akumulatorów z obwodami zasilania pojazdu) i odpowiadającego mu napięcia, analizatorem mocy YOKOGAWA WT 1800 (rys. 3.44., patrz na s. 116).



Rys. 3.44. Analizator mocy YOKOGAWA

Pomiar prędkości i drogi wykonano metodą bezstykową, za pomocą głowicy optycznej Correvit (rys. 3.45.).



Rys. 3.45. Głowica optyczna Correvit

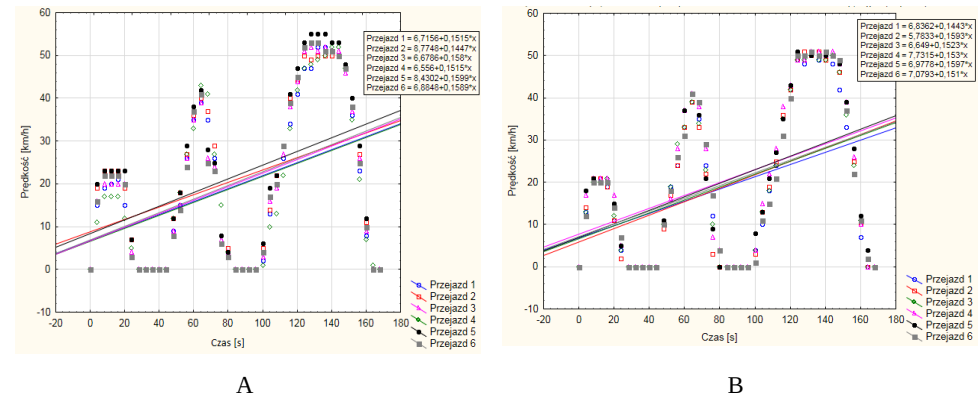
Wyniki pomiarów SORT

Wybrane wyniki pomiarów zużycia energii w cyklu SORT 2 przedstawiono w tabeli 3.6.

Tab. 3.6. Wyniki pomiarów zużycia energii w cyklu SORT 2

	Nr	Prędkość średnia	Energia pobrana z akumulatorów	Energia oddana do akumulatorów	Całkowite zużycie energii przez pojazd	Względna Różnica skrajnych pomiarów zużycia energii w danym kierunku
		V_{sr} [km/h]	E_p [kWh/100km]	E_o [kWh/100km]	E [kWh/100km]	δ [%]
Kierunek I	1	18,5	170,4	170,4	126	1,2
	2	18,8	170	170,0	126,6	
	3	19,1	168,7	168,7	125,1	
Kierunek II	1	18,9	121,6	121,0	68,7	1,3
	2	18,7	120,9	120,9	69,1	
	3	19,1	121,6	121,6	69,6	

Dla otrzymanych wyników przeprowadzono analizę rozrzutu prędkości dla 6 przejazdów autobusu realizującego cykl jazdy SORT 2 (rys. 3.46.)



Rys. 3.46. Wykresy rozrzutu prędkości dla 12 przejazdów autobusu elektrycznego realizującego cykl jazdy SORT 2 (a- przejazdy 1–6, B– przejazdy 7–12)

Przedstawione na rysunku 3.46. wykresy rozrzutu prędkości dla 12 przejazdów spełniają wymagane warunki SORT, zachowują zalecaną tolerancję jazdy ± 1 km/h. Obliczenie względnych różnic dla każdej kolejnej grupy trzech pomiarów przedstawia zależność:

$$\delta_i = \frac{x_{i+2} - x_i}{x_i} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Wyniki obliczeń względnej różnicy δ dla grupy trzech kolejnych pomiarów dla danego kierunku powinny wynosić $2 < \delta$.

3.7. Podsumowanie

W efekcie wykonanych prac badawczych potwierdzono prawidłowość opracowanego modelu energochłonności uwzględniającego realizację testu SORT 2 na obiekcie rzeczywistym autobusie z napędem elektrycznym URSUS. Zidentyfikowany model zawiera podsystem „pokonywanie wzniesień” umożliwiający uwzględnienie w bilansie wyznaczania energochłonności wpływu ukształtowania terenu, czego nie przewidziano w normie.

Na podstawie otrzymanych wyników podczas realizacji testu SORT 2 stwierdzono występującą różnicę w wartościach energochłonności, co związane było ze zmianą ukształtowania terenu. Dla wybranego odcinka wraz ze wzrostem kąta pochylenia drogi całkowite zużycie energii przez pojazd wzrosło dwukrotnie.

Do realizacji obliczeń energochłonności niezbędne jest wyznaczenie charakterystyki prędkości w funkcji czasu dla danego odcinka. Przeprowadzone pomiary dla trasy linii 159 lubelskiego MPK pozwoliły wyznaczyć średnią prędkość, która została uwzględniona przy rejestracji poboru prądu. Wprowadzona charakterystyka wysokości i nachylenia drogi linii 159 została uwzględniona w obliczeniach kilometrowego zużycia energii oraz całkowitego zasięgu dla przyjętych założeń. Dane wprowadzone do modelu symulacji energochłonności autobusu oraz dane pochodzące z rejestracji umożliwiają wyznaczenie wpływu liczby pasażerów na zasięg autobusu.

Przeprowadzone pomiary zużycia energii dla trolejbusu URSUS T7016 przy znamionowym obciążeniu i zasilaniu akumulatorowym potwierdziły możliwość realizacji jazdy próbnej na odcinku 5 km. Na podstawie otrzymanych wartości z badań przy zasilaniu trolejbusu z sieci trakcyjnej energia pobrana z sieci wyniosła 1,398 kWh/km natomiast energia odzyskana podczas hamowania wyniosła 0,305 kWh/km.

Badania dla trolejbusu Solaris Trollino 18M wyposażonego w akumulator trakcyjny przy stopniu naładowania 91% potwierdziły możliwość przejechania odcinka pomiarowego o długości 5,4 km przy zużyciu energii 8,89 kWh w czasie 1062 s. Badania zostały przeprowadzone zgodnie z wytycznymi, przy obciążeniu znamionowym, z włączonymi odbiornikami sterowania oraz z postojami na każdym przystanku.

Wyznaczona energochłonność dla zarejestrowanych przebiegów zmian prądu i napięcia w czasie dla trolejbusu Solaris Trollino 12S, Solaris Trollino 18M oraz autobusu elektrycznego Ursus E70110 zawierała ujemne wartości prądu potwierdzające proces rekuperacji energii.

4. OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

Analizę otrzymanych wyników z symulacji oraz badań empirycznych przeprowadzono przy użyciu programu Statistica. Stosując wygładzanie najmniejszych kwadratów ważonych otrzymano wykresy powierzchniowe dla następujących wielkości:

1. Energochłonności ruchu w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test SORT 2 (rys. 4.1, patrz s. 120).

2. Energii odzyskanej w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test SORT 2 (rys. 4.2, patrz s. 120).

3. Energochłonności ruchu w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 15 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test SORT 2 (rys. 4.3, patrz s. 120).

4. Energii odzyskanej w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 15 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test SORT 2 (rys. 4.4, patrz s. 120).

5. Energochłonności ruchu w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 15 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test miejski (rys. 4.5, patrz s. 121).

6. Energii odzyskanej w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 15 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test miejski (rys. 4.6, patrz s. 121).

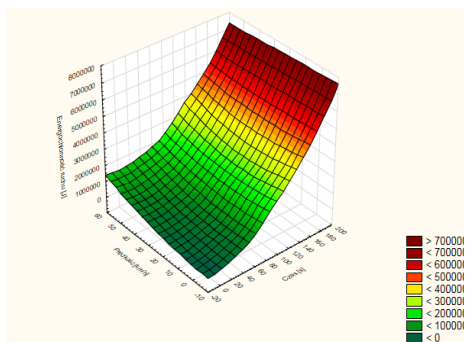
7. Energochłonności ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 dla przejazdu 1 (rys. 4.7, patrz s. 121).

8. Energochłonności ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 dla przejazdu 2 (rys. 4.8, patrz s. 121).

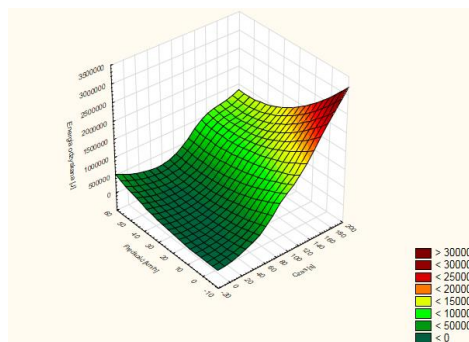
9. Energochłonności ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 dla przejazdu 3 (rys. 4.9, patrz s. 122).

10. Energochłonności ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 dla przejazdu 4 (rys. 4.10, patrz s. 122).

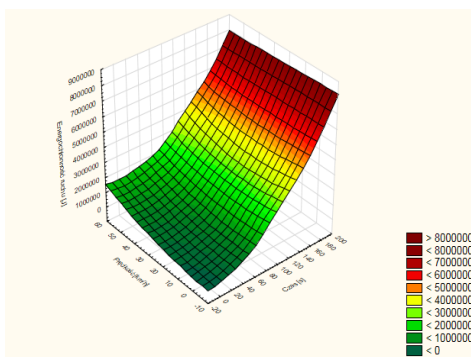
11. Zużycia energii w funkcji prędkości oraz czasu dla autobusu elektrycznego realizującego SORT 2 (rys. 4.11, patrz s. 122).



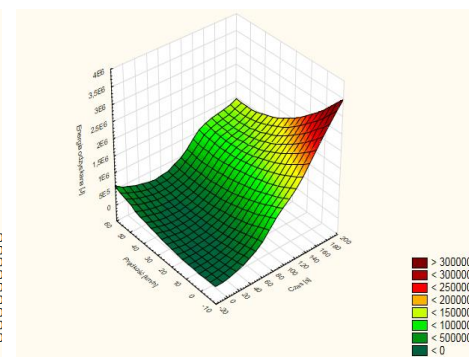
Rys. 4.1. Energochłonność ruchu w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 12S obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test SORT 2



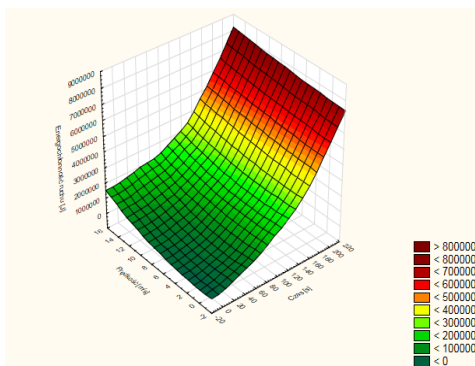
Rys. 4.2. Energia odzyskana w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 12S obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test SORT 2



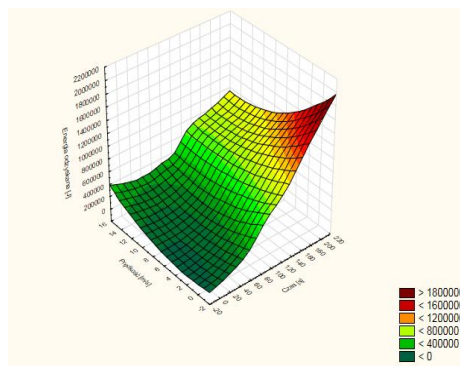
Rys. 4.3. Energochłonność ruchu w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 15 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test SORT 2



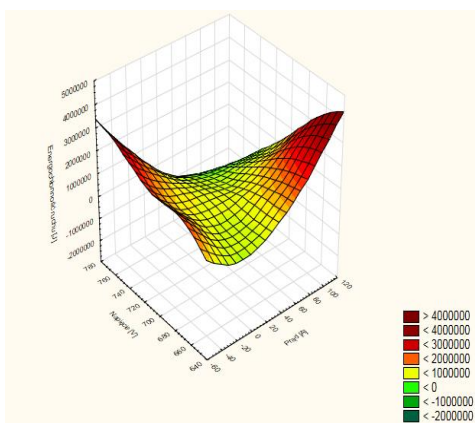
Rys. 4.4. Energia odzyskana w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 15 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test SORT 2



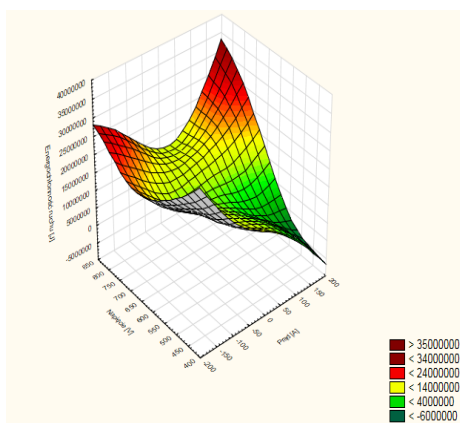
Rys. 4.5. Energochłonność ruchu w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 15 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego cykl miejski



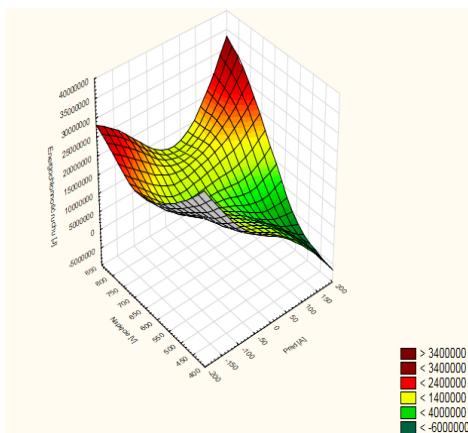
Rys. 4.6. Energia odzyskana w funkcji prędkości oraz czasu dla trolejbusu Solaris Trollino 15 obciążonego masą 20 pasażerów plus kierowca realizującego test miejski



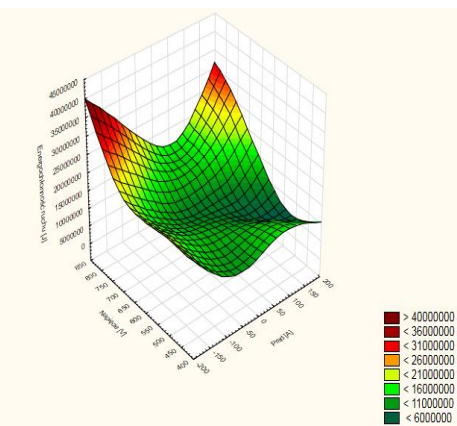
Rys. 4.7. Energochłonność ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 dla przejazdu 1



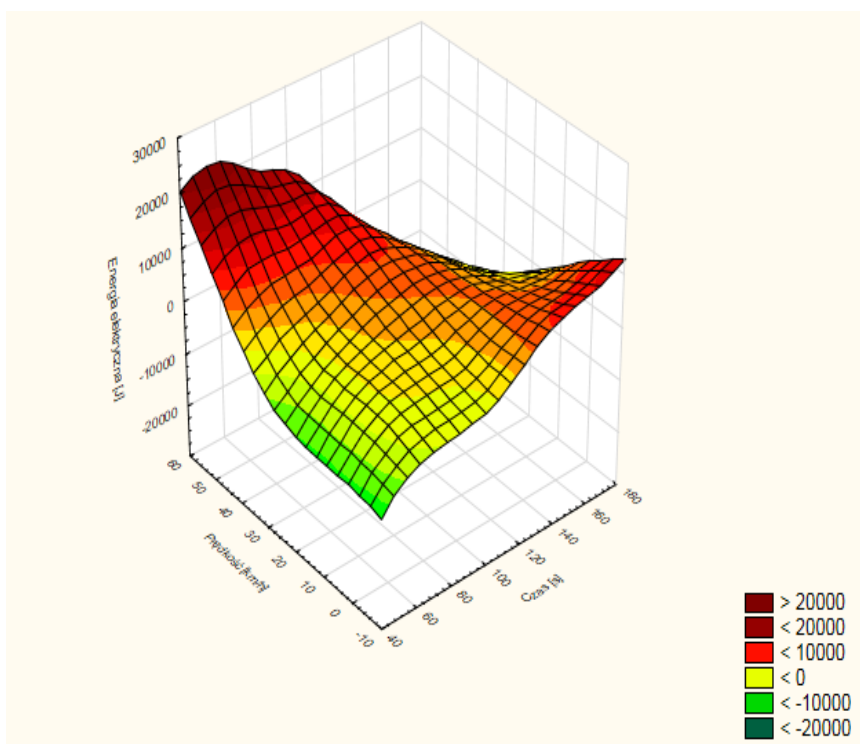
Rys. 4.8. Energochłonność ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 dla przejazdu 2



Rys. 4.9. Energochłonność ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 dla przejazdu 3



Rys. 4.10. Energochłonność ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 dla przejazdu 4



Rys. 4.11. Zużycie energii w funkcji prędkości oraz czasu dla autobusu elektrycznego realizującego SORT 2

Porównując zależności energochłonności w funkcji prędkości oraz czasu na podstawie symulacji dla trolejbusu Solaris Trollino 12S oraz Solaris Trollino 15 występuje podobieństwo maksymalnych wartości energochłonności, co jest wynikiem niewielkiej różnicy masy pojazdów. Analizując wartości energii odzyskanej można zauważyć zbliżone wartości dla trolejbusu Solaris Trollino 12S oraz Solaris Trollino 15.

Porównując cztery przebiegi energochłonności ruchu w funkcji napięcia oraz prądu dla trolejbusu Solaris Trollino 12 zauważono, że trzy z rejestrowanych przebiegów wartości prądów przyjmują wartości ujemne oraz dodatnie.

Zużycie energii w funkcji prędkości i czasu dla autobusu elektrycznego realizującego SORT 2 charakteryzuje się zmianą wypukłości przy wzroście prędkości.

Porównując wyniki symulacji zasięgu 93,63 km obliczonego metodą analityczną z wynikami rzeczywistego przejazdu testowego odcinka równego 127 km wyznaczonego z procentowego rozładowania akumulatora (rys. 3.12.) otrzymano błąd nieodpowiadający wartościom rzeczywistym. Wynika to z faktu, że podczas przejazdu testowego ograniczony do minimum został udział dodatkowych urządzeń elektrycznych, tj. wyłączono klimatyzację oraz ogrzewanie, kasowniki, biletomat i tablicę informacyjną, których wpływ został uwzględniony w modelu teoretycznym. Analizując dane otrzymane podczas przejazdu testowego określono średnią wartość prądu oraz napięcia zmierzonych przy prędkości pojazdu równej 0. Na tej podstawie wyznaczono wartość prądu wynoszącą 4,1 A oraz wartość napięcia równego 515 V i otrzymano moc równą 2104,5 W. Do obliczonej w modelu mocy pobranej z akumulatora, potrzebną do poruszania autobusu dodano moc pobieraną przez urządzenia dodatkowe. Wyznaczony w ten sposób zasięg wyniósł 125,63 km, a otrzymany błąd względny wynosi:

$$\delta = \frac{|127-125,63|}{127} \cdot 100\% = 1,08\% \quad (4.1)$$

Otrzymany wynik potwierdza, że uwzględnienie dodatkowych odbiorników w modelu matematycznym odzwierciedla warunki rzeczywiste.

Analizując zależność mocy pobieranej przez silnik z akumulatora oraz zależność kilometrowej energochłonności potwierdzono liniowy ich wzrost w funkcji liczby przewożonych pasażerów. Na podstawie otrzymanych wyników wpływu obciążenia na zasięg można zaobserwować, że zapotrzebowanie na moc urządzeń dodatkowych zmniejsza zasięg o 45 km.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie dokonanej analizy literatury, związanej z zagadnieniami dotyczącymi energochłonności pojazdów z napędem elektrycznym, stwierdzono, że problem ten jest istotny z punktu widzenia naukowego oraz wykorzystania uzyskanych wyników badań w praktyce przemysłowej producentów pojazdów oraz przedsiębiorstw komunikacyjnych. Analiza literatury potwierdza, że problematyka podjęta w pracy nie jest w dostatecznym stopniu poznana oraz rozwiązana w zakresie uwzględnienia w ocenie energochłonności wpływu kąta nachylenia drogi oraz rzeczywistych danych rejestrowanych podczas eksploatacji pojazdów elektrycznych w stosowanych dotychczas standardach SORT. W opracowanym modelu symulacyjnym umożliwiono dla każdego z testów SORT wyznaczenie zasięgu oraz kilometrowej energochłonności cyklu na podstawie wprowadzonych danych: masy całkowitej pojazdu, wysokości i szerokości pojazdu, współczynników oporu aerodynamicznego oraz toczenia, gęstości powietrza, sprawności przekładni, sprawności silnika, sprawności hamowania odzyskowego, energii zgromadzonej w akumulatorze.

Poza wnioskami szczegółowymi, prezentowanymi w poszczególnych rozdziałach pracy, można sformułować następujące wnioski końcowe:

1. Opracowany model energochłonności pozwala na wyznaczenie energochłonności przebiegowej, jednostkowej oraz maksymalnego zasięgu pojazdu z napędem elektrycznym dla wybranych profili jazdy SORT 2 z uwzględnieniem kąta nachylenia odcinka drogi.

2. Opracowany teoretyczny model obliczeniowy energochłonności umożliwia przeprowadzenie symulacji energochłonności pojazdów z napędem elektrycznym dla testów SORT 1, SORT2, SORT 3 przy założonych warunkach eksploatacji.

3. Opracowany model symulacyjny z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB dla testów SORT daje możliwość wyznaczenia zasięgu i kilometrowej energochłonności cyklu na podstawie wprowadzonych danych: masy całkowitej pojazdu, wysokości oraz szerokości pojazdu, współczynników oporu aerodynamicznego, toczenia, gęstości powietrza, sprawności przekładni, sprawności silnika, sprawności hamowania odzyskowego, energii zgromadzonej w akumulatorze.

4. Wyniki symulacji energochłonności autobusu elektrycznego dla testów SORT pozwalają prognozować jego zasięg w zależności od wybranego testu.

Dla autobusu elektrycznego otrzymano następujące wartości:

- dla SORT 1 kilometrowa energochłonność wynosi 0,81 kWh/km, a zasięg 133,5 km,
- dla SORT 2 kilometrowa energochłonność wynosi 0,82 kWh/km, a zasięg 131,4 km ,
- dla SORT 3 kilometrowa energochłonność wynosi 0,91 kWh/km, a zasięg 119,3 km.

5. W efekcie wykonanych prac badawczych potwierdzono prawidłowość opracowanego modelu energochłonności uwzględniającego realizację testu SORT 2 na obiekcie rzeczywistym - autobusie elektrycznym. Na podstawie otrzymanych wyników podczas realizacji testu SORT 2 w warunkach rzeczywistych stwierdzono istotny wpływ ukształtowania terenu na otrzymane wartości energochłonności. Dla wybranego odcinka wraz ze wzrostem kąta pochylenia drogi całkowite zużycie energii przez pojazd wzrosło dwukrotnie.

6. Określono teoretyczny wpływ obciążenia pojazdu na wartość energochłonności całkowitej, przebiegowej dla wybranych obiektów badań. Analiza zależności mocy pobieranej przez silnik pojazdu z akumulatora oraz kilometrowej energochłonności potwierdziła liniowy wzrost tych wielkości w funkcji liczby przewożonych pasażerów.

7. Na podstawie opracowanej metody energochłonności ruchu można porównywać wyniki symulacji energochłonności dla pojazdów z napędem elektrycznym oraz wyznaczać wartości: energii odzyskanej podczas hamowania odzyskowego, energochłonności całkowitej, przebiegowej oraz jednostkowej ruchu.

8. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów drogowych oraz badań oraz analiz procesu ładowania pojazdów z napędem elektrycznym stwierdzono, że zarejestrowane rzeczywiste przebiegi czasowe zużycia energii elektrycznej oraz parametry ruchu stanowią istotne dane służące do oceny energochłonności ruchu dla wybranych profili jazdy. Zarejestrowane dane podczas eksploatacji pojazdu z napędem elektrycznym oraz ich uwzględnienie w modelu symulacyjnym umożliwiają prognozowanie zasięgu jazdy.

BIBLIOGRAFIA

1. Adamiec M., Dziubiński M., Drozd A., Siemionek E., Wspomaganie dopływu tlenu do katody niskociśnieniowego ogniwa paliwowego typu PEM, *Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 9/2017, s. 239–242.
2. Adamiec M., Dziubiński M., Siemionek E., Drozd A., Comparative analysis of automotive starting batteries in the aspect of diagnostics research, *The archives of automotive engineering – archiwum motoryzacji*, 3/2017, vol. 77, s. 5–16.
3. Adamiec M., Dziubiński M., Siemionek E., Metody diagnostyczne w ocenie stanu samochodowego akumulatora rozruchowego, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 12/2017, s. 677–681.
4. Arczyński S., *Mechanika ruchu*, WNT, Warszawa 1994.
5. Ayaz R. Durusu A. Akca H., A Comparison of Metrobus System and Trolleybus System Considering Energy Costs and CO2 Emission: A Case Study for Istanbul, 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Istanbul 2011, s. 1–8.
6. Baran J., *Poradnik inżyniera elektryka*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2009.
7. Bartłomiejczyk M., Hołyszko P., Filipek P., Measurement and analysis of transmission losses in the supply system of electrified transport, *Journal of Ecological Engineering* – 5/2016, vol. 17, s. 64–71.
8. Bartłomiejczyk M. Połom M., Napięcie sieci trakcyjnej jako wyznacznik możliwości zwiększenia odzysku energii, *Technika Transportu Szynowego* 4/2013, s. 42–46.
9. Bartłomiejczyk M. Połom M., Perspektywa wykorzystania napędu alternatywnego w lubelskiej komunikacji trolejbusowej (2), *Technika Transportu Szynowego* 10/2013, s. 26–32.
10. Bartłomiejczyk M., Połom M., Przestrzenne aspekty efektywności hamowania odzyskowego w komunikacji trolejbusowej, *Logistyka* 6/2013, s. 1726–1734.
11. Bartłomiejczyk M. Połom M., Trolejbusy z bateryjnym źródłem zasilania – doświadczenia eksploatacyjne i koncepcja liniowego zastosowania w Gdyni, *Technika Transportu Szynowego* 5–6/2011, s. 76–80.
12. Bartłomiejczyk M., Połom M., Wpływ przestrzennego zróżnicowania systemu zasilania sieci trakcyjnej na energochłonność komunikacji trolejbusowej. Aspekty planistyczno-ekonomiczne, *Logistyka* 6/2013, s. 1735–1744.
13. Bartłomiejczyk M., Połom M., Napięcie sieci trakcyjnej jako wyznacznik możliwości zwiększenia odzysku energii, *Technika Transportu Szynowego* 4/2013, s. 42–46.
14. Bartłomiejczyk M., Połom M., Perspektywa wykorzystania napędu alternatywnego w lubelskiej komunikacji trolejbusowej (1), *Technika Transportu Szynowego* 9/2013.
15. Bartłomiejczyk M., *Trolejbus z autonomicznym źródłem zasilania*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 27/2010.
16. Berg H., *Batteries for Electric Vehicles*. Cambridge University Press, 2015.

17. Biały M., Wendeker M., Kamiński Z., Jakliński P., Malec A., Samochody zasilane wodorem, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* – 10/2011, s. 71–76.
18. Bielaczyc P., Światowe trendy w ograniczaniu emisji samochodowej i ich wpływ na rozwój napędów pojazdów, paliw, olejów silnikowych i metod badawczych – znaczenie globalne nowych regulacji ograniczania emisji WLTP i RDE – podsumowanie „6th International Exhaust Emissions Symposium (IEES)”, *Przegląd Techniczny* 21–22/2018, s. 24–30.
19. Biral F., Galvani M., Zucchelli M., Giacomelli G., Objective Performance Evaluation on Mountain Routes of Diesel-Electric Hybrid Busses, University of Trento, IEEE, 2013, s. 394–399.
20. Boujelben M., Trigui R., Badin F., Ardizzone S., Escudie D., Modeling and Optimization of a Plug-in Hybrid Urban Microbus, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008, Harbin, China, s. 1–6.
21. Brunton L., The trolleybus story, *IEE Review*, Vol. 38, Is. 2, 1992, s. 57–61.
22. Burmeister F., Schnieder L., Kurczveil T., Simulation Based Studies on the Integration of Battery-Electric Vehicles in Regional Bus Services, 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, s. 1333–1338.
23. Chłopek Z., Badania zużycia energii przez samochód elektryczny w warunkach symulujących jazdę w mieście, *Eksploatacja i Niezawodność* 15/2013, s. 75–82.
24. Chłopek Z., Badanie zużycia energii przez samochód elektryczny, *Archiwum Motoryzacji* 3/2012, s. 105–117.
25. Chłopek Z., Ocena drogowego zużycia energii przez samochód elektryczny, *Transport Samochodowy* 2/2013, s. 75–87.
26. Chłopek Z., Ocena zużycia energii przez autobusy komunikacji miejskiej, *Journal of KONES* Vol. 13, 1/2006.
27. Ciancetta F., Ometto A., Rotondale A., Rotondale N., D’Ovidio G., Masciovecchio C., Analysis of flywheel-fuel cell system for mini electrical bus during an urban route, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2016, IEEE, s. 1093–1098.
28. Desai C., Berthold F., Williamson S.S., Plug-in Hybrid Electric Transit Bus Using Multi-Objective Genetic Algorithm, *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, Canada, 2010.
29. Destraz B., Barrade P., Rufer A., Klohr M., Study and Simulation of the Energy Balance of an Urban Transportation Network, EPFL, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland, 2007, s. 1–10.
30. Devie A., Vent P., Pelissier S., Trigui R., Battery duty profile of a heavy-duty trolleybus, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2012, Seoul, Korea, s. 431–435.
31. Dębicki M., Teoria samochodu. Teoria napędu., WNT Warszawa 1976.
32. Duda S., Modelowanie i symulacja numeryczna zjawisk dynamicznych w elektrycznych pojazdach szynowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.

33. Dunia T., Analiza czynników wpływających na energochłonność autobusu elektrycznego, na przykładzie pojazdu EkoVolt firmy URSUS, Politechnika Lubelska, praca magisterska, 2016, Politechnika Lubelska.
34. Durzyński Z., Podstawy metody wyznaczania parametrów energooszczędnej jazdy pojazdów trakcyjnych na obszarach aglomeracyjnych, *Pojazdy Szynowe* 3/2013, s. 1–12.
35. Dziubińska A., Gontarz A., Siemionek E., Węgrowski P., Nowa technologia kształtowania radiatorów, Ewaluacja wybranych procesów, technologii i systemów inżynierskich, [Red:] Drozd K., Szala M. – Lublin: Politechnika Lubelska, 2014, s. 6–20.
36. Dziubiński M., Siemionek E., Adamiec M., Drozd A., Mazurkiewicz Ł., Koncepcja systemu sterowania instalacji fotowoltaicznej, *Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 12/2017, s. 853–856.
37. Dziubiński M., Drozd A., Adamiec M., Siemionek E., Electromagnetic interference in electrical systems of motor vehicles, *Iop Conference Series: Materials science and engineering*, 1/2016, vol. 148, s. 1–11.
38. Dziubiński M., Drozd A., Adamiec M., Siemionek E., Energy balance in motor vehicles, *Iop Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1/2016, vol. 148, s. 1–9.
39. Dziubiński M., Drozd A., Adamiec M., Siemionek E., Energy intensity of the electric vehicle, *Advances In Science And Technology Research Journal*, 4/2017, vol. 11, s. 27–34.
40. Dziubiński M., Drozd A., Adamiec M., Siemionek E., Simulation tests of the starting system, *Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* – 88/2016, s. 89–100.
41. Dziubiński M., Drozd A., Siemionek E., Adamiec M., Toborek K., Symulacja uszkodzeń rozrusznika samochodowego, *Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* – 92/2017, s. 83–93.
42. Dziubiński M., Drozd A., Siemionek E., Plich M., Experimental comparative studies of injection systems, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 112/2016, s. 79–88.
43. Dziubiński M., Plich M., Siemionek E., Investigations of alternators, starters and ignition systems reliability, *Robotics and manufacturing systems*, [Red:] Koukolová Lucia, Świć Antoni - Lublin: Politechnika Lubelska, 2014, s. 203–216.
44. Dziubiński M., Siemionek E., Adamiec M., Drozd A., Kołodziej S., Energy consumption of the trolleybuses, *Electromagnetic devices and processes in environment protection with seminar applications of superconductors*, 2017, [B.m.]: IEEE, 2017.
45. Dziubiński M., Siemionek E., Czajkowski P., Plich M., Experimental studies of wheel-chair energy consumption, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 112/2016, s. 89–99.
46. Dziubiński M., Siemionek E., Drozd A., Kołodziej S., Jarzyna W., Analysis of energy consumption of public transport in Lublin, *Environmental engineering V [WOS]*, [Red:] Pawłowska M., Pawłowski L. – Boca Raton: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2017, s. 293–298.

47. Dziubiński M., Siemionek E., Drozd A., Toborek K., Plich M., Symulacja uszkodzeń rozrusznika samochodowego, *Niezawodność systemów technicznych : materiały XLV Zimowej Szkoły Niezawodności* – 2017.
48. Dziubiński M., Siemionek E., Plich M., Drozd A., Toborek K., Simulation of automotive starter faults, *Journal of Konbin*, 1/2017, vol. 42, s. 399–408.
49. Empecha S., Pattaraprakorn W., Chutiprapat V., Bhasaputra P., The Study on the Effect of Electric Bus (non-Fixed Route) to Energy Consumption in Thailand, *Thammasat University Pathumthani, Thailand, IEEE*, 2016, s. 1–5.
50. Feng-chun S., Liu B., Zhen-po W., Analysis of Energy Consumption Characteristics of Dual-source Trolleybus, *ITEC Asia-Pacific*, 2014, s.1–5.
51. Filipek P., Ostrowski M., Optimal energy source for an environmentally-friendly go-kart , *Journal Of Ecological Engineering* – 5/2016, vol. 17, s. 90–95.
52. Flynn M.M., Hearn C.S., Lewis M.C., Thompson R.C., Longoria R.G., Prime Mover and Energy Storage Considerations for a Hydrogen-Powered Series Hybrid Shuttle Bus, *University of Texas*, 2007, *IEEE*, s. 821–828.
53. Gęca M., Wendeker M., Grabowski Ł., Badania eksploatacyjne struktur fotowoltaicznych zamocowanych na pokładzie autobusu miejskiego z silnikiem diesla, *Combustion Engines/Silniki Spalinowe* – 3/2015, vol. 162, s. 498–503.
54. Gis, W., Kruczyński, S., Taubert, S., Wierzejski, A. Studies of energy use by electric buses in SORT tests. *Combustion Engines*. 170(3)/2017.
55. Giziński Z., Gąsiewski M., Maścibrodzki I., Zych M., Zymmer K., Żuławnik M., Hybrid – type system of power supply for a trolleybus with an asynchronous motor, *Power Electronics and Motion Control Conference, Poznań 2008*.
56. Grabowski Ł., Wendeker M., Barański G., Gęca M., Badania Eksperymentalne Sprawności Generowania Energii Elektrycznej W Autobusie Miejskim, *COMBUSTION ENGINES, SILNIKI SPALINOWE* – 3/2015, vol. 162, s. 411–416.
57. Hamacek S., Bartłomiejczyk M., Hrbá R., Misák S., Styskala. V., Energy recovery effectiveness in trolleybus transport, *Electric Power Systems Research* 07/2014, vol. 112, s. 1–12.
58. Hayes J.G., Davis K., Simplified Electric Vehicle Powertrain Model for Range and Energy Consumption based on EPA Coast – down Parameters and Test Validation by Argonne National Lab Data on the Nissan Leaf, *University College Cork, Ireland*, 2014 *IEEE*, s. 1–6.
59. He H., Zhang C., Yu X., Power Distribution Control for a Fuel Cell Hybrid Electric Bus, *Beijing Institute of Technology, China, IEEE*, 2007.
60. Hodkinson R., Fenton J., Light weight electric/ hybrid vehicle design, *Butterworth Heinemann, Oxford OX28DP*, 2001.
61. Hołyszko P., Filipek P., Estimation of the running costs of autonomous energy sources in trolleybuses, *Journal Of Ecological Engineering* – 5/2016, vol. 17, s. 101–106.
62. Horrein L., Bouscayrol A., Lhomme W., Depature C., Impact of heating system on the range of an electric vehicle, *Transaction of Vehicular Technology, IEEE*, 2016, s. 1–9.

63. Hruska M., Jara M., High Efficiency and High Power Density Boost/ Buck Converter with SiC JFET Modules for Advanced Auxiliary Power Supplies in Trolleybuses, PCIM Europe, Nuremberg, Germany, 2016.
64. Husain I., Electric and hybrid vehicles, Design Fundamentals, CRC Press LLC, 2003, Jackowski J., Łęgiewicz J., Wieczorek M., Samochody osobowe i pochodne., Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 2011.
65. Jakubiec B., Sposoby poprawy efektywności energetycznej i ekologii miejskiego transportu zbiorowego, Logistyka 3/2015, s. 1897–1906.
66. Jarzyna W., Zieliński D., Aftyka M., Fatyga K., Cold storage-supported air conditioning system in urban transport vehicles, Journal Of Ecological Engineering – 5/2016, vol. 17, s. 120–127.
67. Jarzyna W., Zieliński D., Hołyszko P., Battery-supported trolleybus traction network-a component of the municipal smart grid, W: Environmental engineering V [WOS]; [Red:] Pawłowska M., Pawłowski L. – Boca Raton: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2017, s. 287–292.
68. Jędrzycka M., Miszewski M., Analiza porównawcza zużycia energii przez napęd tramwajowy prądu stałego z rozruchem rezystancyjnym i impulsowym. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 78/2007.
69. Jinrui N., Fengchun S., Qinglian R., A study of Energy Management System of Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing, China, IEEE, 2006.
70. Juda Z., Brzeżański M., Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne [tł. z jęz. niemieckiego], Robert Bosch GmbH. 2010.
71. Kacprzak J., Kozierkiewicz M., Układy napędowe i układy sterowania trolejbusów., Monografie Politechniki Radomskiej, Radom 1997.
72. Kobos W., Ciągła M., Chudzik P., Trolejbusowy napęd trakcyjny z zasobnikiem superkondensatorowym, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, 95/2012, s. 39–44.
73. Kobos W., Trakcyjny napęd asynchroniczny o podwyższonej sprawności energetycznej z wykorzystaniem pojemnościowego zasobnika energii, Pojazdy Szynowe 4/2009, s. 30–34.
74. Kolano K., Filipek P., Zieliński D., High-performance and power-efficient motor control for vehicle // W: 8th International Conference “New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation” NEET, Zakopane, 2013.
75. Kołodziej S., Analiza energochłonności komunikacji miejskiej w Lublinie, Politechnika Lubelska, praca inżynierska, 2016, Politechnika Lubelska
76. Koszałka G., Szczotka A., Suchecki A., Comparison of fuel consumption and exhaust emissions in WLTP and NEDC procedures, Combustion Engines 179/ 2019, s. 186–191.
77. Kretschmer A., Aba A., Baroncelli C., Esztergar-Kiss D., A concept of an Energy optimal public transportation network, Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, Hungary 2015, s. 294–299.
78. Kropiwnicki J., Ocena eksploatacyjnego zużycia paliwa samochodów, Silniki Spalinowe 3/2010, s. 48–58.

79. Kyncl J., Hariram A., Matyska P., Najman R., Czech Technical University, Prague, 2013, IEEE, s. 1–7.
80. Larminie J., Lowry J., “Electric Vehicle Technology Explained” Second Edition, United Kingdom, 2012.
81. Leitman S., Brant B., Build Your Own Electric Vehicle Second Edition, United States of America, 2009.
82. Łusiak T., Rząsa M., Hunicz J., Szwedziak K., Stachyra E., Badania eksperymentalne zjawisk dynamicznych w czasie ruchu pojazdów, *Mechanik* – 11/2016, s. 1692–1693.
83. Machowski J., Elektryczne napędy trakcyjne, Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica w Krakowie 1980.
84. MacKay D., Sustainable Energy – without the hot air. UIT Cambridge 2008.
85. Małek A., Taccani R., Kasperek D., Hunicz J., Optimization of Energy Management in a City Bus Powered by the Hydrogen Fuel Cells, *Communications, scientific letters of the University of Žilina*, 4/2021, Vol. 23., s.56–67.
86. Melo G.A., Goncalves F.A.S., Oliveira R.N., Muno J.M., Santos M., Canesin C.A., Trolleybus Power System for Operation with AC or DC Distribution Networks, *SPEEDAM 2010, IEEE, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, s. 1368–1373.
87. Merksiz J., Bajerlein M., Daszkiewicz P., Nowoczesne rozwiązania techniczne akumulatorów stosowanych w miejskich autobusach elektrycznych jako forma zwiększenia zasięgu. *Czasopismo Techniczne 4-M/2012*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012.
88. Merksiz J., Bajerlein M., Siedlecki M., Rymaniak Ł., Ziółkowski A., Cykle jezdne symulujące rzeczywiste warunki ruchu drogowego przeznaczone do pomiarów zużycia paliwa autobusów miejskich., *Logistyka 6/2014*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2014.
89. Merksiz J., Molik P., Nowak M., Ziółkowski A., Cykle jezdne pojazdów komunikacji miejskiej na przykładzie aglomeracji poznańskiej, *Logistyka 3/2012*.
90. Merksiz J., Pielecha I., Alternatywne napędy pojazdów. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
91. Merksiz J., Pielecha I., Układy elektryczne pojazdów hybrydowych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015.
92. Michałowski K., Ocioszyński J., Pojazdy samochodowe o napędzie elektrycznym i hybrydowym, WKŁ, Warszawa 2000.
93. Mwambeleko J.J., Kulworawanichpong T., Greyson K.A., Tram and Trolleybus Net Traction Energy Consumption Comparison, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, IEEE, 2015,
94. Ostaszewicz J., Energochłonność transportu miejskiego, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1984.

95. Petrou A.K., Efstathiou D.S., Tsourveloudies N.C., Modeling and Control of the Energy Consumption of a Prototype Urban Vehicle, 19th Mediterranean Conference on Control and Automation, Corfu, Greece, 2011, IEEE, s. 44–48.
96. Połom M., Bartłomiejczyk M., Alternatywne źródła zasilania w trolejbusach – przegląd rozwiązań stosowanych w miastach Europejskich, Technika Transportu Szynowego 3/2011.
97. Popa I.S., Popescu M.O., Popescu C., Energetic Macroscopic Representation Applied to an Electrical Urban Transport System, The Annals of „Dunarea De Jos” University of Galati Fascicle III, ISSN 1221-454X, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics, 2002 s. 34–39.
98. Prochowski L., Żuchowski A., Samochody ciężarowe i autobusy, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2016.
99. Pudło J., Trolejbusy w Polsce, Księży Młyn Dom Wydawniczy i Przemysł Dominas, Łódź 2011.
100. Rawicki S., Nowoczesny system sterowania pojazdu tramwajowego przy minimum zużycia energii. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 73/2005, Bobrme Komel, s. 131–136.
101. Rawicki S., Zagadnienia strat mocy trakcyjnych silników prądu stałego przy obliczeniach energooszczędnych jazd pojazdów tramwajowych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, BOBRME – KOMEL, Katowice, 75/2006, s. 89–94.
102. Rudnicki T., Koszty eksploatacji pojazdu elektrycznego, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 97/2012, s. 49–52.
103. Rudnicki T., Pojazdy z silnikami elektrycznymi, Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne Nr 80/2008, Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice 2008, s. 245–250.
104. Sawicki J., Samochody elektryczne na Auto Ausstellung Berlin. Auto-Technika Motoryzacyjna, Warszawa 12/1994.
105. Scrosati B., Garche J., Tillmetz W., Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles. Woodhead Publishing, Cambridge 2015.
106. Sebastiani M.T., Luders R., Fonseca K.V.O., Evaluating Electric Bus Operation for a Real-World BRT Public Transportation Using Simulation Optimization, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.17, s. 2777–2786.
107. Siedlecki M., Galant M., Fuć P., Lijewski P.: Porównanie parametrów użytkowych akumulatorów w technologii litowo-jonowej stosowanych w układach napędowych pojazdów elektrycznych, Logistyka 3/2015, Instytut Silników i Transportu, Poznań 2015.
108. Siemionek E., Metoda oceny energochłonności ruchu trolejbusów w rzeczywistych warunkach eksploatacji, Wpływ Młodych Naukowców na Osiągnięcia Polskiej Nauki – VII Edycja, 2014, s. 334–334.
109. Siemionek E., Analysis of trolleybus energy consumption, Advances in science and technology research journal, 18/2013, vol. 7, s. 81–84.

110. Siemionek E., Badania eksploatacyjne pojazdu jednośladowego z napędem elektrycznym, Wybrane zagadnienia z budowy i eksploatacji maszyn [Red:] Gardyński L., Szala M. - Lublin: Politechnika Lubelska, 2013, s. 61–75.
111. Siemionek E., Dziubiński M., Adamiec M., Kołodziej S., Analiza i symulacja zużycia energii przez trolejbus, Autobusy – Technika, eksploatacja, systemy transportowe, 12/2017, s. 1315–1318.
112. 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, 26/2015, vol. 9, s. 152–153.
113. Siemionek E., Analiza energochłonności ruchu trolejbusów, Advances In Science And Technology Research Journal – 18/2013, vol. 7.
114. Siemionek E., Analiza energochłonności ruchu trolejbusów. Katedra Pojazdów Samochodowych, Lublin 2013.
115. Siłka W., Analiza wpływu parametrów cyklu jezdnego na energochłonność ruchu samochodu, Zeszyt 14 Monografia 2 PAN oddział Kraków 1998.
116. Siłka W., Analiza energochłonności ruchu samochodu ze zmienną prędkością, Opole 1995.
117. Siłka W., Energochłonność ruchu samochodu, WNT, Warszawa 1997.
118. Siłka W., Teoria ruchu samochodu. Energochłonność ruchu i zużycie paliwa. Część II”, Skrypt uczelniany, Opole 165/1994.
119. Siłka W., Energochłonność ruchu samochodu, WNT, Warszawa 1997.
120. Siłka W., Teoria ruchu samochodu, WNT, Warszawa 2002.
121. Siłka W., Teoria ruchu samochodu. Kurs inżynierski. Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, Opole 1996.
122. Sovran G., Bohn. M., Formulae for the Tractive-Energy Requirements of Vehicles Driving the EPA Schedules. SAE Paper nr 810184, 1981.
123. Sun F., Bin L., Wang Z., Analysis of Energy Consumption Characteristics of Dual-source Trolleybus, Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), IEEE Conference and Expo Beijing, 2014.
124. Szumanowski A., Akumulacja energii w pojazdach, Warszawa, 1984.
125. Tan Z., Wilhelm T., Okuda H., Levedahl B., Suzuki T., Computation of Energy-Optimal Velocity Profile for Electric Vehicle Considering Slope of Route, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Meijo University, Nagoya, Japan, 2015, s. 472–478.
126. Tarkowski P., Siemionek E., Badania parametrów ruchu wybranych wózków widłowych, Postępy nauki i techniki/ Advances in science and technology , 15/2012, s. 145–152.
127. Tarkowski P., Siemionek E., Energy consumption in the motion of the vehicle with electric propulsion, Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa PAN, 11/2011, s. 320–326.

128. Wendeker M., Barański G., Gęca M., Analiza ekonomiczna zastosowania technologii autobusowych struktur fotowoltaicznych w warunkach miejskich, *Logistyka* – 3/2014, s. 6652–6659.
129. Wendeker M., Grabowski Ł., Gęca M., Technologia autobusowych struktur fotowoltaicznych zmniejszających zużycie paliwa i emisję składników toksycznych, *Logistyka* – 3/2014, s. 6666–6673.
130. Wilhelem T., Okuda H., Levedahl B., Suzuki T., Energy Consumption Evaluation Based on a Personalized Driver–Vehicle Model, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, s. 1–10.
131. Wołek M. Wyszomirski O., *The Trolleybus as an Urban Means of Transport in the Light of the Trolley Project*, Uniwersytet Gdański, Gdańsk 2013.
132. Wu X., Du J., Jiang T., Hu C., Comparison of Different Cycles Control Effects on an Extended-Range Electric Bus, *2nd International Conference on Measurement, Information and Control*, 2013.
133. Wu X., Du J., Hu C., Jiang T., The Influence Factor Analysis of Energy Consumption on All Electric Range of Electric City Bus in China, *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, November 17–20, 2013, Barcelona, Spain, s. 1–6.
134. Yan X., A Study on the MobilityLevel of Public Transit Based on the Transport Energy Consumption, *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, 2010, s. 381–385.
135. Żółtowski A., Pomiar emisji w warunkach nieustalonych. *Journal of KONES Internal Combustion Engines* vol. 10, Warszawa 2003.
136. [bosch-prasa.pl](http://www.bosch-prasa.pl) [dostęp: 11.05.2018]. <http://www.bosch-prasa.pl/>
137. [bosmal.com.pl](https://www.bosmal.com.pl) [dostęp: 28.11.2015]. https://www.bosmal.com.pl/452-pomiary_zuzycia_paliwa_pojazdow
138. [lubus.info](http://www.lubus.info) [dostęp: 20.03.2017]. <http://www.lubus.info/index.php/artykuly/10-technika-trolejbusowa/87-uklady-napedowe-i-sterowania>
139. [mkm.szczecin.pl](http://www.mkm.szczecin.pl) [dostęp 20.03.2017]. <http://www.mkm.szczecin.pl/encyklopedia/rekuperacja>
140. [mpyc.pl](http://www.mpyc.pl) [dostęp: 20.03.2017]. <http://www.mpyc.pl/upload/16.pdf>
141. nl.express.live [dostęp: 11.05.2017]. <https://nl.express.live/2017/01/12/nederlandse-spoorwegen-rijden-nu-100-op-windenergie>
142. [solarisbus.com](https://www.solarisbus.com) [dostęp: 02.11.2021]. https://www.solarisbus.com/vehicles_catalog/6/trollino
143. UITP PROJECT 'SORT'. Standardised On-Road Test Cycles. International Association of Public Transport, 2014.
144. Dokumentacja techniczna producenta autobusu EkoVolt–URSUS Bus S.A. 2015.
145. Dokumentacja techniczna producenta trolejbusów SOLARIS.