



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA: AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA  
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

Metodologia projektowania modułowego układu  
napędowego autobusów elektrycznych

Autor: mgr inż. Łukasz Chełchowski

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Piotr Czop, prof. AGH

Praca wykonana: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Robotyki  
i Mechatroniki

Kraków, 2023



AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

**FIELD OF SCIENCE: ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

SCIENTIFIC DISCIPLINE: AUTOMATION, ELECTRONICS, ELECTRICAL  
ENGINEERING AND SPACE TECHNOLOGIES

## **DOCTORAL THESIS**

Design methodology of a modular powertrain  
system for electric buses

Author: mgr inż. Łukasz Chełchowski

First supervisor: dr hab. inż. Piotr Czop, prof. AGH

Completed in: AGH University of Science and Technology in Kraków,  
Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, Department of Robotics  
and Mechatronics

Kraków, 2023

### *Podziękowania*

*Chciałbym serdecznie podziękować mojej żonie i dzieciom, za wsparcie i wyrozumiałość podczas realizacji przeze mnie studiów doktoranckich.*

*Podziękowania przekazuję dla mojego Promotora – Pana dr. hab. inż. Piotra Czopa, prof. AGH za opiekę naukową oraz pomoc merytoryczną.*

*Dziękuję również Panu prof. dr. hab. inż. Tomaszowi Barszczowi za inspiracje, motywacje i pomoc organizacyjną.*

*Pragnę także podziękować firmie Solaris Bus&Coach sp. z o.o. za umożliwienie realizacji doktoratu wdrożeniowego oraz moim koleżankom i kolegom z pracy za okazaną pomoc w trakcie jego realizacji, a szczególnie mojemu opiekunowi pomocniczemu – Panu dr. inż. Dariuszowi Michałakowi, który na co dzień jest moim mentorem zawodowym i wspierał mnie w moich poczynaniach w trakcie studiów doktoranckich.*

# Spis treści

Streszczenie .....	3
Abstract.....	4
1. Wprowadzenie.....	5
1.1. Charakterystyka rynku miejskich autobusów elektrycznych.....	5
1.2. Napęd konwencjonalny i elektryczny w autobusie miejskim.....	8
1.3. Stan wiedzy w zakresie układów napędowych autobusów elektrycznych .....	11
1.4. Problem badawczy .....	14
1.5. Cel, teza i zakres pracy.....	18
2. Rozważania analityczne i prace badawcze.....	20
2.1. Koncepcja modułowego układu napędowego.....	20
2.2. Silnik i falownik trakcyjny.....	23
2.2.1. Określenie wymagań trakcyjnych autobusu .....	24
2.2.2. Obliczanie parametrów silnika trakcyjnego .....	24
2.2.3. Dobór silnika trakcyjnego.....	27
2.2.4. Dobór falownika trakcyjnego .....	30
2.2.5. Teoretyczna weryfikacja parametrów trakcyjnych zestawu silnik-falownik .....	35
2.3. Zasilanie układów pomocniczych.....	43
2.3.1. Metody wyznaczania zapotrzebowania na moc instalacji elektrycznej 24 V DC autobusu elektrycznego .....	43
2.3.2. Metoda obliczeniowa.....	44
2.3.3. Metoda statystyczna.....	48
2.3.4. Określenie parametrów przetwornicy DC/DC 24 V.....	56
2.3.5. Określenie parametrów przetwornicy DC/AC 3x400 V AC .....	57
2.3.6. Dobór przetwornicy DC/DC 24 V .....	59
2.3.7. Dobór przetwornicy DC/AC 3x400 V AC .....	60
2.3.8. Dobór przetwornicy hybrydowej z wyjściami DC i AC.....	61
2.4. Rozdzielnice zasilająco-sterujące.....	63
2.4.1. Dystrybucja energii elektrycznej .....	63
2.4.2. Prawidłowe załączenie i odłączenie zasilania .....	65
2.4.3. Zabezpieczenie przeciwzwarcziowe.....	71
2.4.4. Kontrola stanu izolacji obwodu HV .....	72

2.4.5.	Pomiar napięcia i natężenia prądu .....	73
2.4.6.	Koncepcja modułowej rozdzielniczy zasilająco-sterującej .....	73
3.	Opracowanie techniki integracji elektrycznego układu napędowego oraz oprogramowania .....	75
3.1.	Integracja elementów składowych układu napędowego .....	75
3.2.	Oprogramowanie sterujące.....	80
4.	Implementacja opracowanego układu w pojeździe oraz jego walidacja.....	85
4.1.	Projekt autobusu.....	85
4.2.	Walidacja rozwiązań w autobusie prototypowym .....	87
4.2.1.	Weryfikacja poprawności konstrukcji rozdzielniczy zasilająco-sterującej	88
4.2.2.	Weryfikacja poprawności doboru silnika i falownika trakcyjnego .....	94
4.2.3.	Weryfikacja poprawności doboru przetwornicy DC/DC 24 V.....	102
4.2.4.	Weryfikacja poprawności doboru przetwornicy DC/AC 3x400 V AC ..	107
4.3.	Korzyści techniczne, technologiczne i ekonomiczne rozwiązania .....	108
5.	Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych.....	113
5.1.	Koncepcja układu napędowego.....	115
5.2.	Silnik i falownik trakcyjny.....	117
5.3.	Zasilanie układów pomocniczych .....	118
5.4.	Rozdzielniczy zasilająco-sterujące.....	120
5.5.	Opracowanie techniki integracji elektrycznego układu napędowego oraz oprogramowania.....	122
5.6.	Projekt autobusu.....	123
5.7.	Walidacja rozwiązań .....	124
6.	Podsumowanie i wnioski.....	126
7.	Bibliografia.....	130

## Streszczenie

W rozprawie doktorskiej sformułowano autorską metodologię projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych na podstawie realizacji referencyjnego projektu autobusu nowej generacji Solaris Urbino 9 LE electric. Zastosowane metody projektowe i badawcze (symulacji komputerowej, statystyczne, eksperymentalne) oraz techniki obliczeniowe, umożliwiają w sposób ustandaryzowany i zrównoważony pod względem techniczno-ekonomicznym, rozwijanie nowych autobusów z napędami elektrycznymi.

Rozprawa zawiera stan wiedzy w zakresie charakterystyki rynku autobusów miejskich ze szczególnym uwzględnieniem napędu elektrycznego. Przedstawiono w niej istniejące rozwiązania oraz najczęstsze problemy producentów tego typu pojazdów.

Rozważaniom analitycznym i pracom badawczym poddano silniki trakcyjne wraz z falownikami, przetwornice prądu stałego i zmiennego oraz rozdzielnice zasilająco-sterujące. Przedstawiono wszystkie etapy konfigurowania elektrycznego układu napędowego, począwszy od fazy koncepcyjnej na poziomie systemu, aż po dobór poszczególnych elementów składowych na podstawie optymalizacji wielokryterialnej metodą sum ważonych z wykorzystaniem do normowania zmiennych metody unitaryzacji zerowanej.

Następnie przedstawiono sposób integracji elementów skonfigurowanych i zaprojektowanych dla elektrycznego układu napędowego autobusu Solaris Urbino 9 LE electric. Integracja objęła połączenie wszystkich elementów obwodu wysokonapięciowego oraz algorytmy potrzebne do realizacji oprogramowania zarządzającego układem.

Rozprawa ukazuje warsztat naukowy autora w zakresie wykorzystanych metod badawczych eksperymentalnych oraz statystycznych, które posłużyły do walidacji zaprojektowanych rozwiązań. Wskazano korzyści uzyskane w rezultacie zastosowania modułowego elektrycznego układu napędowego, wykazując poprawność przyjętej tezy: „zastosowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego umożliwia w autobusach elektrycznych spełnienie następujących kryteriów: maksymalizacji liczby dostępnych wariantów konfiguracji podzespołów, zbalansowania rozkładu masy w pojeździe, a także minimalizacji długości przewodów elektrycznych wysokiego napięcia oraz kosztów produkcji.”

## **Abstract**

In the doctoral dissertation, the original design methodology of a modular powertrain system for electric buses was formulated on the basis of the implementation of the reference design of the new generation bus Solaris Urbino 9 LE electric. The applied design and research methods (computer simulation, statistical, experimental) and calculation techniques enable standardized and technically and economically sustainable, developing new buses with electric powertrain.

The dissertation contains the current state of knowledge regarding the characteristics of the city bus market, with particular emphasis on the electric powertrain. It presents existing solutions and the most common problems faced by manufacturers of this type of vehicles.

Analytical considerations and research work were carried out on traction motors with inverters, DC and AC converters as well as power distribution and control units. All stages of configuring the electric powertrain system are presented, starting from the conceptual phase at the system level, to the selection of individual components on the basis of multi-criteria optimization using the weighted sum method with the use of the zero unitarization method for standardization of variables.

Next, the way of integrating the configured and designed elements for the electric powertrain system of the Solaris Urbino 9 LE electric bus was presented. The integration covered the connection of all elements of the high-voltage circuit and the algorithms needed to implement the system management software.

The dissertation shows the author's scientific skills in the field of experimental and statistical research methods used, which were used to validate the designed solutions. The benefits obtained as a result of the use of a modular electric powertrain system were indicated, demonstrating the correctness of the adopted thesis: "the application of the modular powertrain system design methodology enables the following criteria to be met in electric buses: maximizing the number of available component configuration variants, balancing the weight distribution in the vehicle, as well as minimizing the length of high-voltage electrical cables and production costs."

# 1. Wprowadzenie

Początek drogowego transportu publicznego datowany jest na siedemnasty wiek, kiedy to w Anglii kursowały pierwsze dyliżanse, przewożące pasażerów oraz przesyłki pocztowe. Poruszały się one na ustalonych trasach, wg zdefiniowanego harmonogramu. Wraz z upływem lat powstawały coraz bardziej zaawansowane pojazdy. W 1801 r. Richard Trevithick zbudował pierwszy pojazd o napędzie parowym [1], a w 1895 r. w Niemczech wszedł do użytku pierwszy na świecie autobus z napędem silnikowym [1], [2]. Od tego momentu rozwój autobusowego transportu publicznego znacznie przyspieszył. W roku 1907 w Anglii uruchomiono pierwszą na świecie obsługę linii za pomocą autobusów elektrycznych zasilanych akumulatorowo [3]. Masa jak i niska pojemność akumulatorów spowodowała, że pojazdy te zostały wyparte przez autobusy z silnikami o zapłonie samoczynnym oraz trolejbusy. Dopiero znaczny rozwój technologiczny ogniów akumulatorowych, jaki ma miejsce od początku dwudziestego pierwszego wieku spowodował wzrost zainteresowania autobusami tego typu.

W związku z powyższym, wiedza na temat projektowania układów napędowych autobusów elektrycznych jest w dzisiejszym świecie coraz bardziej potrzebna. Łączy ona wiele dyscyplin w ramach nauk inżynierjno-technicznych oraz ekonomia i finanse, gdyż jest to nieodzowne dla zachowania konkurencyjności. Tak szeroka wiedza wymaga usystematyzowania, dlatego w ramach rozprawy opracowano metodologię projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych.

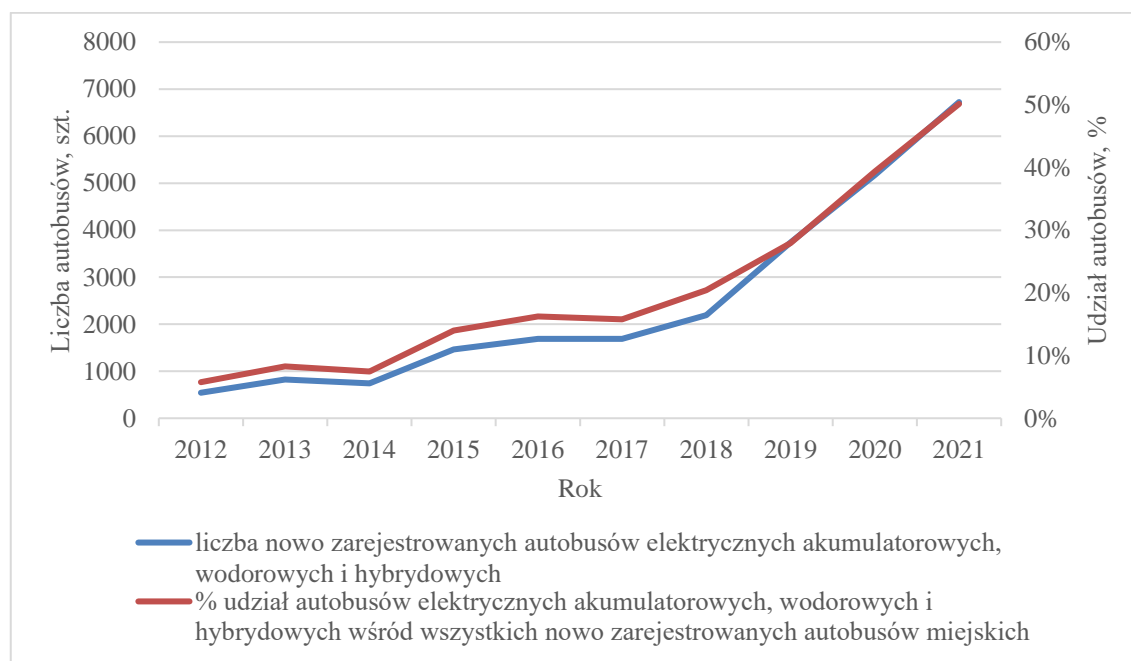
Na podstawie literatury oraz dokumentacji firmy Solaris Bus&Coach sp. z o.o., przedstawiono charakterystykę rynku autobusów miejskich ze szczególnym uwzględnieniem napędu elektrycznego. Opisano istniejące rozwiązania oraz najczęstsze problemy producentów tego typu pojazdów. Przedstawiono różnice pomiędzy napędami konwencjonalnymi oraz elektrycznymi w kontekście autobusów miejskich. Przedstawiono problem badawczy oraz zdefiniowano cel, zakres i tezę pracy.

## 1.1. Charakterystyka rynku miejskich autobusów elektrycznych

Od drugiej dekady dwudziestego pierwszego wieku zaobserwować można rosnące zainteresowanie ekologicznymi pojazdami komunikacji miejskiej. Społeczeństwo zaczęło przywiązywać coraz większą wagę do aspektów środowiskowych, a smog w miastach stał się odczuwalnym problemem. Jednym z rozwiązań na pozbycie się gazów

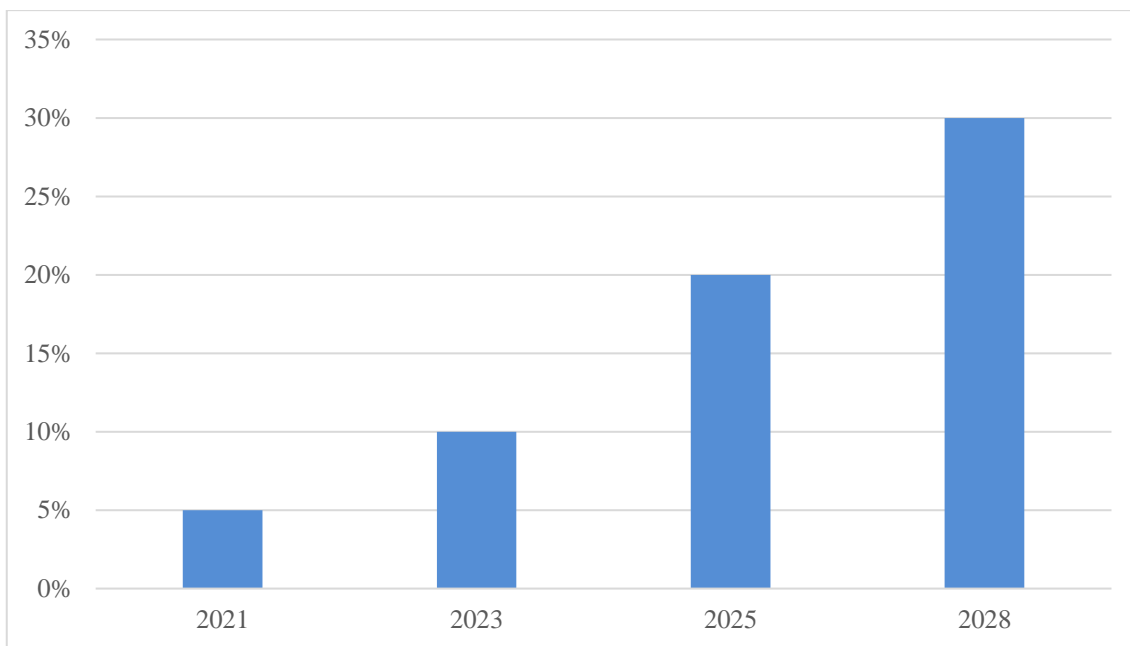


spalinowych z miast jest popularyzacja i stosowanie pojazdów napędzanych lub wspomaganych silnikami elektrycznymi. W zakresie autobusów miejskich, zaliczyć do nich można autobusy elektryczne akumulatorowe, wodorowe (z ogniwem paliwowym) oraz hybrydowe (wyposażone w konwencjonalny silnik spalinowy i w silnik elektryczny). Liczbę nowo zarejestrowanych tego typu autobusów na rynku europejskim, przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Liczba zarejestrowanych w Europie autobusów elektrycznych akumulatorowych, wodorowych i hybrydowych w latach 2012 – 2021  
Źródło: opracowano na podstawie [4]

Udział nowo zarejestrowanych autobusów elektrycznych akumulatorowych, wodorowych i hybrydowych uległ istotnemu zwiększeniu od 2017 roku. Miał na to głównie wpływ rozwój technologii autobusów elektrycznych akumulatorowych. Już wtedy pojemność akumulatorów trakcyjnych umożliwiała pokonywanie odcinków powyżej 200 km na jednym ładowaniu, przy zbliżonej, do autobusów z napędem konwencjonalnym, liczbie przewożonych pasażerów [5], [6]. Dodatkowym czynnikiem, mającym wpływ na wzrost sprzedaży autobusów elektrycznych, stało się wprowadzenie regulacji prawnych, z których do najważniejszych w Polsce zalicza się ustawę o elektromobilności i paliwach alternatywnych. Napisano w niej, że jednostki samorządu terytorialnego, w których liczba mieszkańców przekracza 50 tysięcy, zapewniają udział autobusów zeroemisyjnych w użytkowanej flocie pojazdów na poziomie nie mniejszym niż ten, który przedstawiono na rysunku 2 [5], [7], [8].



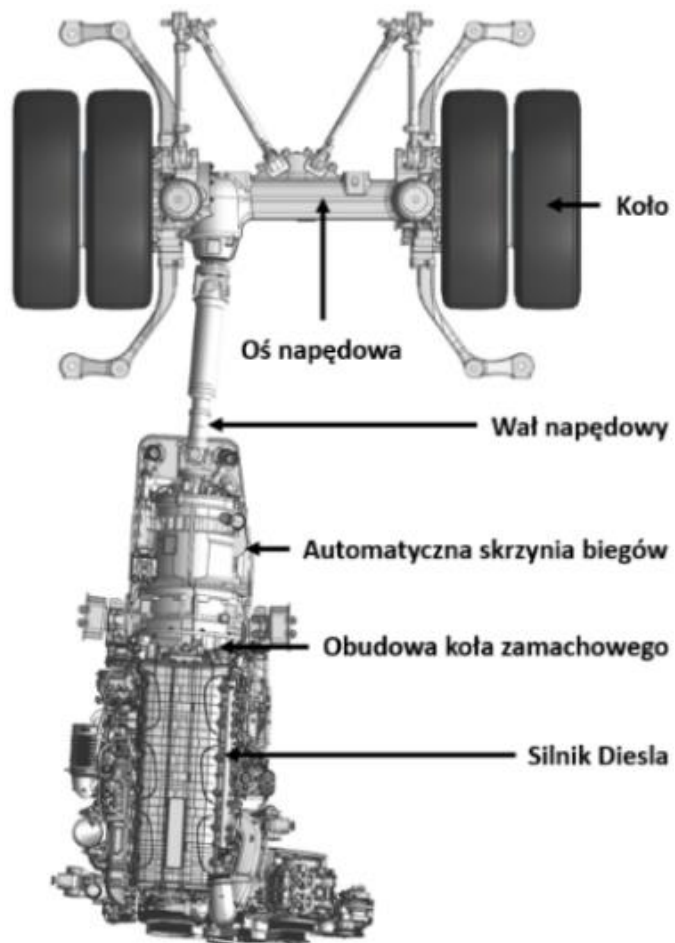
**Rys. 2.** Udział autobusów zeroemisyjnych we flotach pojazdów, wymagany ustawą o elektromobilności i paliwach alternatywnych od jednostek samorządu terytorialnego o liczbie mieszkańców powyżej 50 tys. do 2028 roku  
Źródło: [5]

W Europie zakup taboru komunikacji miejskiej, w zdecydowanej większości, odbywa się poprzez procedurę przetargową, w której zamawiający określa specyfikację pojazdów. Określa ona szereg wymagań podstawowych, takich jak rozmiar autobusu, rodzaj układu napędowego, minimalny zasięg na jednym tankowaniu / ładowaniu, liczbę drzwi czy też minimalną liczbę miejsc siedzących. Oprócz wspomnianych, istnieje wiele wymogów dotyczących dodatkowego wyposażenia autobusu, takiego jak układy ogrzewania i klimatyzacji, układy wsparcia kierowcy (ostrzeżenie przed przeszkodą, monitorowanie martwego pola itp.), a także systemy komunikacji pasażerskiej uwzględniające tablice kierunkowe, kasowniki, biletomaty czy monitoring. Najbardziej rozbudowane specyfikacje przetargowe posiadają nawet kilkusetstronicowe opisy wymagań technicznych. Wszystkie wymagania definiują, rodzaj koniecznych do zastosowania elementów i układów autobusowych w różnych konfiguracjach. Z racji swojego przeznaczenia, jednym z najważniejszych parametrów autobusu miejskiego jest maksymalna dopuszczalna liczba przewożonych pasażerów. Jest to wypadkowa ograniczeń prawnych, które określają dopuszczalną masę całkowitą dla danego typu pojazdu, maksymalne zagęszczenie pasażerów oraz maksymalne dopuszczalne naciski na oś. To ostatnie ograniczenie stanowi największe wymagania od producentów autobusów miejskich, ze względu na liczbę oferowanych konfiguracji. Przy nieodpowiednim

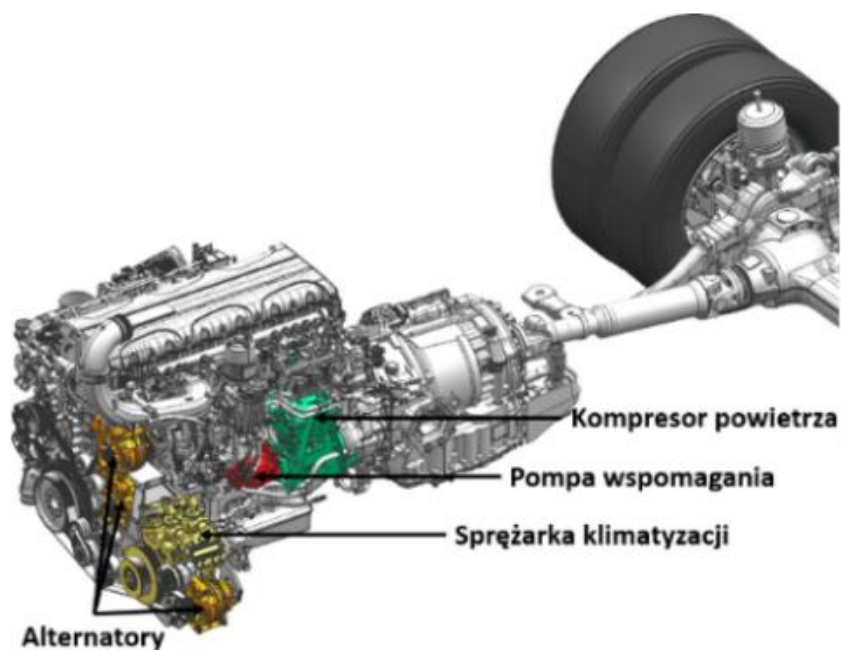
rozmieszczeniu elementów, dopuszczalna maksymalna liczba pasażerów może być limitowana ze względu na zbyt duży nacisk na daną oś. Celem producentów autobusów stało się umożliwienie oferowania większości konfiguracji autobusów, spełniających oczekiwania różnych klientów, przy jak najmniejszej liczbie zmian konstrukcyjnych. Oznacza to takie projektowanie pojazdu aby rozwiązania opcjonalne miały swoje przewidziane miejsce montażu, a zmiana konfiguracji nie wpływała w sposób negatywny na rozkład mas pomiędzy osiami. Takie podejście pozwala na znaczną redukcję kosztów przedsiębiorstwa przy zachowaniu dużej elastyczności w konfigurowaniu oferowanych produktów. Jest to trudne w realizacji wymaganie, które stanowi obecnie jedno z obszarów rywalizacji pomiędzy producentami autobusów miejskich.

## **1.2. Napęd konwencjonalny i elektryczny w autobusie miejskim**

Napęd konwencjonalny w odniesieniu do autobusu miejskiego oznacza układ składający się z silnika o zapłonie samoczynnym, który poprzez układ napędowy przekazuje moc na koła. Nowoczesne autobusy wyposażone są w układ wspomagania kierownicy, klimatyzację kierowcy i przestrzeni pasażerskiej oraz posiadają pneumatyczne układy hamulcowy i zawieszenia. Aby wspomniane układy mogły działać potrzebne są dodatkowe akcesoria takie jak pompa wspomagania, sprężarka klimatyzacji, kompresor powietrza oraz źródło ładowania (24 V DC) akumulatorów pokładowych. Wszystkie wymienione podzespoły, w przypadku autobusu z napędem konwencjonalnym, w sposób pośredni zasilane są energią generowaną przez silnik spalinowy [5]. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono widok układu napędowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym oraz rozmieszczenie wspomnianych podzespołów [4], [5].

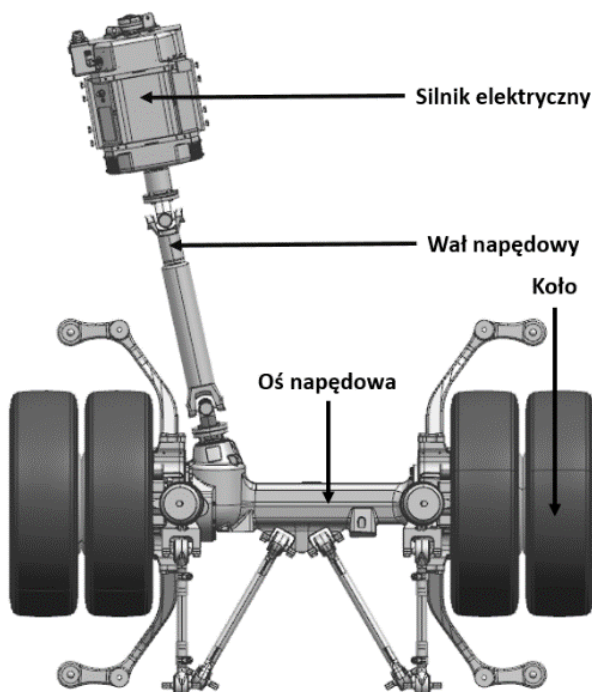


Rys. 3. Widok układu napędowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym  
Źródło: [5]



Rys. 4. Podzespoły napędzane energią generowaną przez silnik o zapłonie samoczynnym  
Źródło: [5]

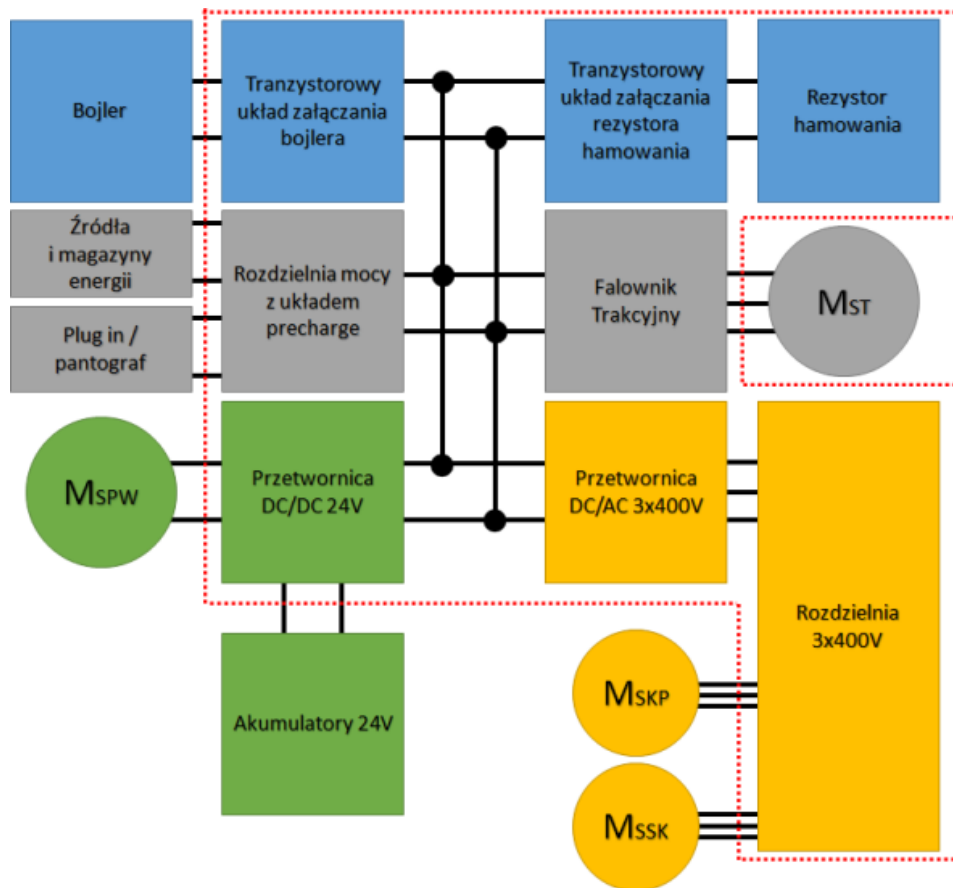
Klasyczny elektryczny układ napędowy składa się głównie z: silnika elektrycznego, wału napędowego, osi napędowej z kołami (rys. 5) [5]. Dodatkowo zawiera również źródło zasilania oraz urządzenia sterowania i automatyki.



**Rys. 5.** Elementy składowe napędu elektrycznego  
Źródło: [5]

Ze względu na konstrukcję autobusów, w niniejszej rozprawie rozszerzono definicję napędu elektrycznego o układ energoelektroniczny i elektryczne elementy pomocnicze, tworząc w ten sposób układ równoważny do napędu konwencjonalnego. Na rysunku 6 przedstawiono schemat wspomnianego rozszerzonego układu napędowego zaznaczając czerwoną przerywaną linią układ energoelektroniczny, do którego oprócz falownika trakcyjnego włączono również przetwornice DC/DC 24 V, 3x400 V AC, a także tranzystorowy układ sterowania bojlerem.

Więcej szczegółów na temat różnic w budowie poszczególnych elementów stosowanych w autobusach z napędem konwencjonalnym i napędem elektrycznym, opisano w artykule pt. „Projektowanie i eksploatacja systemów przeznaczonych do autobusów z napędem alternatywnym” [5].



Legenda:

M<sub>ST</sub> – silnik trakcyjny

M<sub>SPW</sub> – silnik pompy wspomaganie układu kierowniczego

M<sub>SKP</sub> – silnik kompresora powietrza

M<sub>SSK</sub> – silnik sprężarki klimatyzacji

... – układ energoelektroniczny w autobusie elektrycznym

■ – obwód instalacji zasilanej napięciem 24 V DC

■ – obwód instalacji zasilanej napięciem 3x400 V AC

■ – układ napędowy według definicji klasycznej

**Rys. 6.** Schemat ideowy rozszerzonego układu napędowego

Źródło: [4], [5]

### 1.3. Stan wiedzy w zakresie układów napędowych autobusów elektrycznych

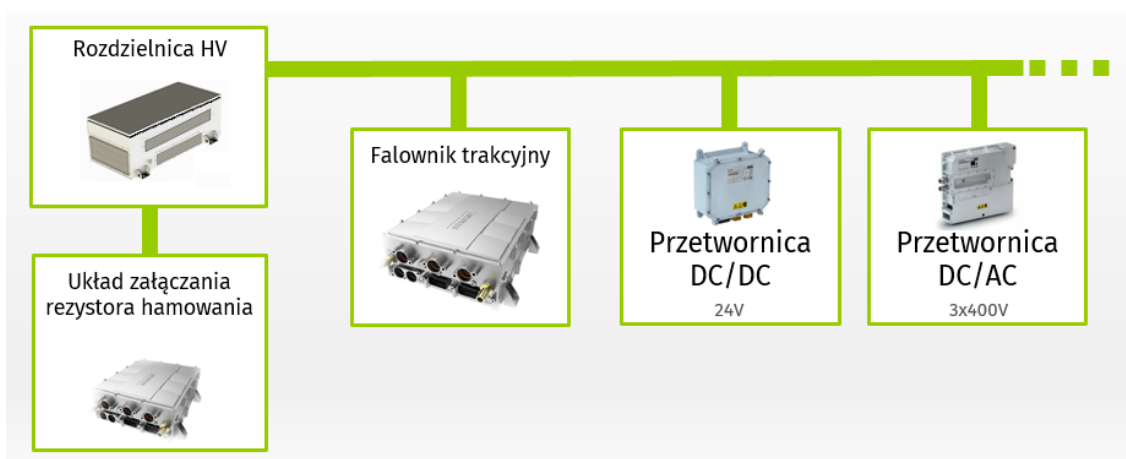
Autobus elektryczny w ramach rozszerzonego układu napędowego wyposażony jest w rozbudowany układ energoelektroniczny, tj. falownik trakcyjny, przetwornicę DC/DC 24 V, przetwornicę DC/AC 3x400 V, układy załączania bojlera i rezystora hamowania, a także rozdzielnice mocy z układem wstępnego ładowania (*ang. precharge*). W zakresie rozwiązań napędów elektrycznych do autobusów rozwinęły się dwa rodzaje układów

energoelektronicznych: scentralizowany i modułowy. Oba posiadają te same układy i funkcjonalność, jednak różni je sposób mechanicznej zabudowy. Układ scentralizowany charakteryzuje się większością lub wszystkimi elementami układu energoelektronicznego umieszczonymi w jednej obudowie, zwanej „skrzynią napędu trakcyjnego” (rys. 7).



**Rys. 7.** Zewnętrzna obudowa scentralizowanego układu energoelektronicznego  
Źródło: opracowano na podstawie [4]

Modułowy układ energoelektroniczny charakteryzuje się niezależnymi obudowami poszczególnych elementów o niewielkich rozmiarach (rys. 8). Oba rozwiązania mają swoje zalety i wady, a wyższość jednego nad drugim zależy od wagi kryteriów uwzględnionych w ocenie. Do najważniejszych należą dostępność miejsca i możliwości w zakresie rozkładu masy w pojeździe oraz zaawansowanie technologiczne w obszarze napędów elektrycznych producenta pojazdu.



**Rys. 8.** Schemat modułowego układu energoelektronicznego  
Źródło: opracowano na podstawie [4]

W tabeli 1 przedstawiono porównanie głównych cech obu rodzajów układów energoelektronicznych.

**Tabela 1.** Porównanie głównych cech scentralizowanego i modułowego układu energoelektronicznego.

<b>Cechy układów energoelektronicznych</b>	<b>Scentralizowany układ energoelektroniczny</b>	<b>Modułowy układ energoelektroniczny</b>
Poziom integralności układu	+	–
Szybkość montażu w pojeździe	+	–
Ilość dostępnego miejsca w pojeździe	–	+
Możliwość niezależnego montażu elementów układu – rozkład masy	–	+
Możliwość elastycznej konfiguracji elementów układu	–	+
Elastyczność w stosowaniu elementów różnych dostawców	–	+

Zródło: opracowanie własne

Bez względu na rodzaj rozwiązania układu energoelektronicznego, przy jego tworzeniu konieczna jest analiza rynku autobusów miejskich, która charakteryzuje się bardzo dużą personalizacją rozwiązań. W zakresie układu napędowego wyróżnia się dwie koncepcje, autobusy z silnikiem elektrycznym montowanym centralnie (przenoszącym moment obrotowy na oś poprzez wał napędowy) oraz z silnikami montowanymi w osi napędowej. W obszarze magazynów energii stosowane są rozwiązania akumulatorów trakcyjnych w technologii pozwalającej na wysoką moc ładowania lub pozwalające zgromadzić dużą ilość energii. Ich ładowanie może odbywać się za pomocą złącza (*ang. plug-in*) lub pantografu, który również występuje w dwóch wariantach, tj. podnoszony z dachu pojazdu do głowicy ładującej i opuszczany z infrastruktury ładującej do szyn umiejscowionych na dachu pojazdu. W zakresie sposobu ogrzewania autobusu, operatorzy, którzy przewozy realizują w miastach o bardzo niskich zimowych temperaturach powietrza, często decydują się na rozwiązania z konwencjonalnym piecem zasilanym olejem napędowym lub gazem CNG. Zapotrzebowanie na energię potrzebną na ogrzanie pojazdu zimą w tych miastach jest bowiem tak duże, że w przypadku zastosowania wyłącznie elektrycznego ogrzewacza, dla utrzymania wymaganych zasięgów operacyjności pojazdu, konieczne byłoby wyposażenie go w dodatkowy akumulator trakcyjny. Ze względu na jego koszt byłoby to posunięcie nieekonomiczne. Dlatego w ostatnich latach coraz częściej stosowanym rozwiązaniem jest hybrydowy układ ogrzewania, pozwalający na elektryczne ogrzewanie autobusu i dogrzewanie piecem konwencjonalnym przy bardzo niskich temperaturach zewnętrznych. Jest to swego rodzaju kompromis pomiędzy ekologią i ekonomią. Wymienione powyżej różne warianty dotyczą tylko i wyłącznie rozwiązań różniących się sprzętowo. Oprócz tego, rynek autobusów miejskich charakteryzuje się dużą liczbą różnych rozwiązań funkcjonalnych połączonych z różnorodnością oprogramowania, takich jak ograniczenia



przyspieszeń, tempomat itd. Wszystkie wyżej wymienione rozwiązania mają wpływ na układ energoelektroniczny. Dodatkowo, mogą one występować w różnych kompletacjach w zależności od wymagań klienta.

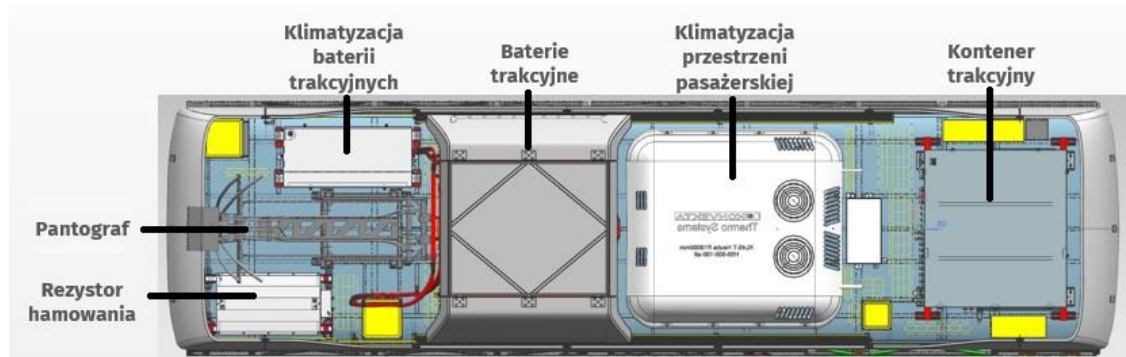
#### **1.4. Problem badawczy**

Niniejsza rozprawa doktorska stanowi podsumowanie 4-ro letnich studiów III stopnia w ramach doktoratu wdrożeniowego. Zgodnie z wytycznymi Ministerstwa Edukacji i Nauki, jego celem jest rozwiązanie problemu technologicznego z jakim zmagają się firma lub ulepszenie produktu, zakończone wdrożeniem [9]. Zarząd firmy Solaris Bus&Coach sp. z o.o. zlecił autorowi rozprawy zaprojektowanie elektrycznego układu napędowego przeznaczonego do nowej generacji autobusu Urbino 9 LE electric, charakteryzującego się:

- dopasowaniem parametrów technicznych do wymagań rynku,
- wyeliminowaniem ograniczeń funkcjonalnych jakie istniały w dotychczas oferowanym modelu Urbino 8,9 LE electric,
- łatwą wymianą elementów na innego typu, aby w przyszłości możliwe było wprowadzenie nowych rozwiązań bez istotnych zmian konstrukcyjnych pojazdu,
- minimalizacją długości przewodów elektrycznych wysokiego napięcia,
- minimalizacją kosztów produkcji.

Pierwszymi podjętymi przez autora rozprawy działaniami była analiza rynku autobusów miejskich, ze szczególnym uwzględnieniem tych z napędem elektrycznym, a także identyfikacja różnic napędów elektrycznych w porównaniu do napędów konwencjonalnych, co opisano w poprzednich podrozdziałach. Następnie przeanalizowano konstrukcję autobusu Urbino 8,9 LE electric i przeprowadzono ankiety z pracownikami poszczególnych działów firmy Solaris, w celu identyfikacji ograniczeń funkcjonalnych jakie ten pojazd posiada w stosunku do innych modeli autobusów elektrycznych zawartych w ofercie, a także w poszukiwaniu potencjalnych usprawnień w obszarze napędu, jakie można wprowadzić przy realizacji nowej konstrukcji. Analizy wskazały, że w tak krótkim pojeździe mała powierzchnia dostępna na dachu ma zasadniczy wpływ na konfigurację osprzętu. Weryfikacja ograniczeń, z których najważniejsze to brak możliwości stosowania klimatyzacji przestrzeni pasażerskiej o dużej mocy chłodniczej (ok. 25 kW) czy klimatyzacji z pompą ciepła, a także brak

rozwiązania z pantografem ładowania umiejscowionym z przodu pojazdu, potwierdza tę diagnozę. Na rysunku 9 przedstawiono rozkład elementów na dachu autobusu Solaris Urbino 8,9 LE electric.



**Rys. 9.** Solaris Urbino 8,9 LE electric – widok dachu (przód pojazdu z prawej)  
Źródło: opracowano na podstawie [4]

Jednymi z większych elementów zlokalizowanych na dachu tego autobusu są dwa akumulatory trakcyjne, które wraz z pozostałymi dwoma umiejscowionymi w tylnej części pojazdu pod miejscami siedzącymi, stanowią źródło zasilania. Obecna technologia, pozwala na zmagazynowanie w nich energii powyżej 300 kWh, umożliwiając zasięg ponad 300 km po jednym ładowaniu, co jest bardzo ważną cechą oczekiwaną przez klientów dla tego typu autobusu [4]. Oznacza to, że nowa konstrukcja również powinna być wyposażona w cztery akumulatory trakcyjne. Wymiary tego typu pojazdów uniemożliwiają montaż więcej niż dwóch akumulatorów (rozmiary akumulatorów wg standardu Solaris) w tylnej części autobusu, a więc założyć należy, że podobnie jak w konstrukcji pierwotnej, dwa akumulatory będą umiejscowione na dachu. Aktualnie gęstość ich energii wynosi ok.  $150 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ , co oznacza, że magazyny energii są elementami o największej masie i objętości do rozlokowania w pojeździe. W związku z tym będą brane pod uwagę jako pierwsze w ramach właściwego rozmieszczenia masy. Następnym z kolei elementem o największej masie do montażu na dachu autobusu Urbino 8,9 LE electric jest skrzynia napędu trakcyjnego zawierająca układ energoelektroniczny. Pojawiło się zasadnicze pytanie, czy nowy model autobusu również musi być wyposażony w skrzynię napędu trakcyjnego. Jak napisano w podrozdziale 1.3, oprócz wersji scentralizowanej istnieją rozwiązania modułowe, których jedną z zalet jest możliwość niezależnego rozmieszczenia elementów w pojeździe. Możliwość zamontowania przynajmniej części elementów układu napędowego poza dachem, pozwoliłoby w nowym autobusie Urbino 9 LE electric, na zamontowanie większej

klimatyzacji czy pantografu w przedniej części pojazdu, co nie było możliwe w autobusie poprzedniej generacji. Rozważania nad zastosowaniem modułowego układu napędowego prowadzą do wniosku, że może on także pomóc w odpowiednim rozmieszczeniu masy, czy zminimalizowaniu długości przewodów elektrycznych. Można przypuszczać, że rozwiązanie modułowe potencjalnie pozwoli na realizację celów postawionych autorowi przez firmę Solaris. Nasuwa się pytanie jak zrealizować projekt modułowego układu napędowego autobusu elektrycznego. Z ilu elementów powinien składać się racjonalnie opracowany modułowy układ napędowy dla autobusu elektrycznego? Jakie należy zastosować metody projektowania, badawcze i jakie techniki obliczeniowe? Czy istnieje opublikowana kompleksowa metodologia projektowania o takiej tematyce?

W rezultacie analizy stanu wiedzy, przeprowadzonego w oparciu o dostępną literaturę naukową, autor ustalił, że istnieje niewielka liczba publikacji odnoszących się do aspektów projektowania modułowych układów napędowych autobusów elektrycznych. Jeżeli nawet pojawiają się doniesienia literaturowe, to są one szczególnie niekompletne w zakresie prezentowania całego procesu projektowego i najczęściej obejmują tylko jego wybrane aspekty lub odnoszą się do innego typu pojazdów. Andreas Schönknecht wraz ze współautorami w artykule [10] omawia metodę optymalizacji wielokryterialnej na potrzeby projektowania układów napędowych pojazdów akumulatorowych i hybrydowych. Uwzględnia w niej akumulatory trakcyjne, falownik, silnik oraz ewentualną przekładnię, nie wspominając o pozostałych elementach energoelektronicznych potrzebnych dla poprawnego działania pojazdu. Pozycja [10] prezentuje wyłącznie ogólne założenia narzędzia symulacyjnego, pozwalającego na optymalizację kosztową, zwracając jako rezultat zbiory elementów i ich parametrów, stanowiące rozwiązania Pareto optymalne. W artykule przedstawiono ogólny zarys metod postępowania bez uszczegółowienia rodzaju dobranej metody optymalizacji wielokryterialnej czy technik obliczeniowych kryjących się w narzędziu symulacyjnym [10]. Emma Arfa Grunditz w swej rozprawie doktorskiej [11] opisuje projekt elektrycznego układu napędowego dla samochodów osobowych. Koncentruje się na akumulatorach trakcyjnych, falowniku i silniku oraz osiągnięciach przyspieszeń jakie ten układ jest w stanie pojazdowi zapewnić. Pozostałe elementy energoelektroniczne układu napędowego zostały w rozprawie tylko wspomniane. Nie przedstawiono żadnych informacji na temat metod postępowania czy technik obliczeniowych [11]. Bilal Kabalan w swej rozprawie [12] podejmuje się stworzenia narzędzia generującego możliwe konfiguracje modułowego napędu hybrydowego, dla których weryfikowane są zużycia

paliwa z uwzględnieniem ilości zastosowanych akumulatorów. W rezultacie otrzymuje rozwiązania Pareto optymalne dla wszystkich konfiguracji elementów hybrydowego układu napędowego. To ciekawe rozwiązanie dotyka problemu potencjalnego zastosowania różnej architektury układu napędowego i poszukiwania rozwiązania optymalnego. Skoncentrowane jest jednak na układzie przeniesienia napędu pojazdu hybrydowego i tylko do niego jest dedykowane [12]. Iqbal Husain w swej książce [13] podejmuje szeroką tematykę projektowania elementów układu napędowego pojazdów elektrycznych i hybrydowych. Opisuje sposoby funkcjonowania oraz techniki obliczeniowe pozwalające na zaprojektowanie tylko wybranych elementów układu napędowego. W książce nie uwzględniono informacji na temat elementów energoelektronicznych zasilających obwody pomocnicze oraz praktycznych informacji na temat wyboru najbardziej racjonalnego rozwiązania [13]. Wszystkie wymienione pozycje literaturowe odnoszą się głównie do projektowania elektrycznych układów napędowych samochodów osobowych. Poszukując informacji na temat układów napędowych autobusów elektrycznych można znaleźć pozycje literaturowe przedstawiające metody obliczania i optymalizacji zużycia energii [14], [15], [16], [17], [18] lub bardzo ogólne informacje na temat budowy i funkcjonowania tych pojazdów [19], [20], [21], [22], [23]. Chan-Ho Kang przedstawia rozwój przetwornicy DC/DC 24 V do autobusu, jednak skupia się na metodzie jej skonstruowania, a nie sposobie wyznaczenia właściwych parametrów czy doborze najbardziej optymalnego rozwiązania dla autobusu [24]. Tematykę obliczenia natężenia prądu obciążenia obwodu 24 V w kontekście przetwornicy DC/DC, podejmuje w swoim artykule [25] Kirill Sidorov. Ogranicza się jednak do metody postępowania i określenia wzorów obliczeniowych bez podania wartości współczynników czasu trwania i obciążenia poszczególnych odbiorników w pojazdach [25].

Podsumowując, w literaturze naukowej tematyka projektowania elektrycznych układów napędowych najczęściej dotyczy samochodów osobowych i ogranicza się do układu przeniesienia napędu, pomijając obwody pomocnicze. Autorzy prac koncentrują się głównie na obiekcie projektowania bez uwzględnienia procesu doboru jednego optymalnego rozwiązania. W zakresie układów napędowych autobusów elektrycznych, w literaturze można znaleźć bardzo ogólne informacje bądź skoncentrowane na zaprojektowanie pojedynczego elementu. Nie znaleziono również informacji na temat doboru przetwornic DC/AC, a także rozdzielnic zasilająco-sterujących stosowanych w autobusach elektrycznych. Wnioskować należy, że kompleksowa metodologia

projektowania układów napędowych autobusów elektrycznych nie jest opublikowana. Producenci elektrycznych układów napędowych oraz autobusów realizują proces projektowania wg własnych procedur, stanowiących tajemnicę przedsiębiorstwa lub wiedza ta nie jest scentralizowana i jej fragment posiada dostawca elementów układu napędowego, a fragment producent pojazdu.

## **1.5. Cel, teza i zakres pracy**

Celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych na podstawie realizacji projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric. Takie podejście pozwoli na kompleksowe ujęcie aspektów projektowania napędów elektrycznych w otoczeniu biznesowym o znacznej konkurencyjności, wymuszającym nieustanny postęp techniczny i technologiczny przy zachowaniu elastyczności procesu produkcyjnego oraz uwzględnieniu licznych wymagań formalno-prawnych. Przedstawione metody projektowe i badawcze oraz techniki obliczeniowe, pozwalające na zaprojektowanie układu napędowego do elektrycznych autobusów miejskich, stanowią unikatową rozprawę o tej tematyce. Umożliwi ona w sposób ustandaryzowany i zrównoważony pod względem techniczno-ekonomicznym, projektować nowe autobusy z napędami elektrycznymi.

Na podstawie przeglądu literatury i analiz sformułowano tezę: zastosowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego umożliwia w autobusach elektrycznych spełnienie następujących kryteriów: maksymalizacji liczby dostępnych wariantów konfiguracji podzespołów, zbalansowania rozkładu masy w pojeździe, a także minimalizacji długości przewodów elektrycznych wysokiego napięcia oraz kosztów produkcji.

Zakres rozprawy obejmuje wszystkie etapy projektowania. Uwzględnia fazę koncepcyjną z opracowaniem wymagań na poziomie systemu (autobusu), układu i elementu. Zawiera wymogi prawne, normy oraz charakterystyczne wymagania branżowe. W kolejnym etapie zaprezentowano metody projektowania i badawcze oraz techniki obliczeniowe zmierzające do właściwego określenia wymagań technicznych stawianych poszczególnym elementom elektrycznego układu napędowego. Wskazano metodę optymalizacji wielokryterialnej doboru elementów wg zdefiniowanych kryteriów technicznych i ekonomicznych. Etap projektowania kończy implementacja i walidacja

opracowanego rozwiązania. Rezultatem działań przedstawionych w rozprawie jest schemat postępowania określający metodologię projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych.

Szeroki zakres badawczy wymaga projektowania zespołowego i koordynacji tych prac. Autor rozprawy, jako kierownik zespołu, zrealizował projekt, który stał się podstawą opracowania metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych. Wymagało to od niego holistycznego spojrzenia na całość zagadnienia.

Ze względu na wielowątkowy projekt i konieczność przedstawienia metodologii projektowania, autor zdecydował się odstąpić od klasycznej struktury rozprawy doktorskiej polegającej na zaprezentowaniu w pierwszej kolejności wiedzy teoretycznej związanej z celem rozprawy doktorskiej, a dopiero w drugiej kolejności dowodzenia poprawności tezy rozprawy używając adekwatnych metod badawczych. Autor zastosował odmienne podejścia polegające na podziale rozprawy na etapy odpowiadające wyodrębnionym zadaniom badawczym w zakresie realizowanego projektu. Zaproponowana w rozprawie metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych została sformułowana w końcowej części rozprawy doktorskiej, korzystając z wnioskowania indukcyjnego, czyli tworząc uogólnione zasady i reguły na podstawie dokonanych obserwacji i analiz wynikających ze zrealizowanego projektu [26].

## **2. Rozważania analityczne i prace badawcze**

Rozważaniom analitycznym i pracom badawczym poddano silnik trakcyjny wraz z falownikiem, przetwornice DC/DC 24 V i DC/AC 3x400 V AC oraz rozdzielnice zasilająco-sterujące. Opisano wszystkie etapy kompletowania elektrycznego układu napędowego, od fazy koncepcyjnej na poziomie systemu, poprzez metody postępowania i techniki obliczania parametrów technicznych, aż po wybór poszczególnych elementów składowych na podstawie optymalizacji wielokryterialnej.

### **2.1. Koncepcja modułowego układu napędowego**

Na podstawie sformułowanego celu rozprawy, należy zaprojektować modułowy układ napędowy przeznaczony dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric i w oparciu o tę realizację opracować metodologię projektowania. Głównymi jego elementami są silnik trakcyjny oraz układ energoelektroniczny, do którego należą falownik trakcyjny, przetwornice DC/DC i DC/AC, a także rozdzielnice zasilająco-sterujące. Układ załączania rezystora hamowania jak i sam rezystor nie są przedmiotem doboru w niniejszej rozprawie. Powodem tego jest fakt, że projektowany autobus podlega homologacji wg klasy I i nie wymaga stosowania rezystora hamowania. Dla standaryzacji rozdzielniczy przygotowano rozwiązanie, które w dalszej perspektywie pozwoli na rozszerzenie homologacji autobusu o klasę II. Szczegóły zależności stosowania rezystora hamowania opisano w podrozdziale 2.4.1. Schemat ideowy rozważanego układu zaprezentowano na rysunku 10, a wspomniane podzespoły, będące przedmiotem rozważań w niniejszym podrozdziale zaznaczono zieloną ramką.

Wszystkie elementy składowe układu napędowego muszą współpracować z pozostałymi podzespołami i układami autobusu. Z tego względu istotne jest aby zweryfikować zakresy napięć pracy oraz sposób komunikacji dobieranych urządzeń. Ważnym aspektem jest ich rozmiar i masa, ponieważ parametry te nie powinny znacząco odbiegać od dostępnych na rynku elementów innych producentów. Ma to znaczenie szczególnie duże w przypadku dalszej perspektywy rozwoju układu napędowego i ewentualnej decyzji wymiany danego elementu na element innego typu. Rozmiar i masa mają również znaczenie pod względem różnych konfiguracji możliwych do zastosowania podzespołów. Im mniejszy i lżejszy element tym łatwiej zabudować go w sposób ograniczający do minimum długość instalacji elektrycznej i hydraulicznej. Ze względu

na powyższe ograniczenia, na początku etapu projektowania poczyniono szereg założeń, których spełnienie stało się wymogiem bezwzględnie koniecznym.



**Rys. 10.** Schemat ideowy modułowego elektrycznego układu napędowego  
Źródło: opracowano na podstawie [4]

Ze względu na to, że firma Solaris produkuje już pojazdy elektryczne i wprowadziła standaryzację akumulatorów trakcyjnych m.in. pod względem zakresu napięć, warunkiem koniecznym jest aby wszystkie elementy układu energoelektronicznego działały co najmniej w zakresie napięć HV (*ang. High Voltage*) 510–750 V DC. Zakres tych napięć określono jako HV zgodnie z regulaminem R100 EKG ONZ, wg którego tym mianem określić należy obwody i elementy elektryczne, których skuteczne napięcie pracy  $> 60 \text{ V}$  i  $\leq 1500 \text{ V DC}$  lub  $> 30 \text{ V}$  i  $\leq 1000 \text{ V AC}$  [27]. Kolejnym warunkiem jest aby układy sterowania zasilane były napięciem znamionowym 24 V DC, będącym standardem w autobusach eksploatowanych w Europie. Wymagany zakres pracy, zdefiniowany przez normę ISO 16750-2 to 16 – 32 V DC [28]. Ich komunikacja pomiędzy sobą, a także z pozostałymi układami w autobusie musi odbywać się zgodnie z protokołem CAN określonym przez normę SAE J1939 [29]. W związku z tym, że podzespoły elektrycznego układu napędowego znajdować się będą w strefie „brudnej” autobusu, warunkiem koniecznym jest aby ich obudowy wykonane były w stopniu ochrony IP65 lub wyższym wg normy EN 60529:2018 [30]. W celu zapewnienia możliwie małych wymiarów i małej masy poszczególnych elementów układu napędowego, wprowadzono wymóg aby wszystkie tranzystorowe falowniki i przetwornice, a także silnik trakcyjny, były chłodzone cieczą. Zaleca się również aby dla ograniczenia ilości obwodów chłodniczych, zwrócić uwagę na wymagania dotyczące



zakresów temperatury chłodziwa i przepływów, tak aby jeden obwód chłodniczy mógł obsłużyć możliwie dużą liczbę elementów.

Przy projektowaniu każdego z układów pojazdu, bezwzględnie konieczne jest zweryfikowanie wymagań prawnych dotyczących tego układu. W Europie wg Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/858 wymagania dla pojazdów ujęto w regulaminach Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ). Ich spełnienie jest konieczne do uzyskania homologacji europejskiej typu pojazdu [1], [31]. Analizując wspomniane regulaminy EKG ONZ, można stwierdzić, że te dotyczące elektrycznego układu napędowego to R10, R85 i R100. W tabeli nr 2 przedstawiono ich tytuły oraz zakres tematyki jaki obejmują.

**Tabela 2.** Regulaminy EKG ONZ istotne przy projektowaniu elektrycznego układu napędowego do autobusu (pojazd kategorii M3)

Numer regulaminu	Tytuł	Zakres tematyki
10	"Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów w odniesieniu do kompatybilności elektromagnetycznej "	Regulamin odnosi się m.in. do pojazdów kategorii M3 (autobusy) w odniesieniu do kompatybilności elektromagnetycznej i dotyczy części i układów montowanych w tych pojazdach.
85	"Jednolite przepisy dotyczące homologacji silników spalinowych lub elektrycznych układów napędowych przeznaczonych do napędzania pojazdów silnikowych kategorii M i N w zakresie pomiaru mocy netto oraz maksymalnej mocy 30-minutowej elektrycznych układów napędowych"	W odniesieniu do autobusów elektrycznych, regulamin wskazuje metody badań w celu określenia mocy netto, a także maksymalnej 30-min. mocy elektrycznego układu napędowego.
100	"Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów w zakresie szczególnych wymagań dotyczących elektrycznego układu napędowego"	Regulamin odnosi się m.in. do pojazdów kategorii M3 (autobusy) i podejmuje kwestie bezpieczeństwa związane z elektrycznym układem napędowym wyposażonym w jeden lub więcej silników trakcyjnych o napędzie elektrycznym oraz wysokonapięciowe elementy i układy.

Źródło: [1], [27], [31], [32], [33]

**Regulamin 10** nie został stworzony tylko dla pojazdów elektrycznych. Dotyczy on wszystkich pojazdów kategorii L, M, N i O w odniesieniu do kompatybilności elektromagnetycznej, którą należy rozumieć jako zdolność urządzenia elektrycznego lub elektronicznego do właściwego działania w środowisku elektromagnetycznym oraz nie generowanie zakłóceń pola elektromagnetycznego, wpływającego na prawidłowe funkcjonowanie urządzeń w otoczeniu. W regulaminie wskazano jak należy wykonać

badania pojedynczych podzespołów oraz całego autobusu z zamontowanymi układami elektrycznymi i elektronicznymi [1], [31], [32].

**Regulamin 85** w odniesieniu do autobusów elektrycznych wskazuje precyzyjne metody badań mające na celu ustalenie mocy netto oraz maksymalnej mocy 30-minutowej elektrycznego układu napędowego. Jako definicję takiego układu przyjmuje się urządzenia sterujące wraz z silnikami elektrycznymi, będącymi jedynym rodzajem napędu danego autobusu. Regulamin zawiera również zapis, że jeśli akumulatory trakcyjne zamontowane w pojeździe ograniczają moc 30-minutową układu napędowego, to moc 30-minutowa autobusu elektrycznego będzie wówczas niższa niż deklarowana, badana wg regulaminu 85 [1], [31], [33].

**Regulamin 100** zawiera przepisy, dotyczące pojazdów wyposażonych w elektryczny układ napędowy. Dokument podzielony jest na dwie części, z których pierwsza wskazuje wymagania dotyczące pojazdu w odniesieniu do elektrycznego układu napędowego, a druga do układu magazynowania energii elektrycznej wielokrotnego ładowania. Ze względu na zakres niniejszej pracy, zasadnicze są wymagania podane w części pierwszej. Dotyczą one wprost bezpieczeństwa elektrycznego i wskazują precyzyjne wymagania w zakresie ochrony przed kontaktem bezpośrednim, pośrednim oraz rezystancji izolacji. Regulamin zawiera załączniki, które precyzyjnie opisują metody pomiarowe stosowane podczas badań homologacyjnych mających na celu weryfikację zgodności pojazdu z wymaganiami [1], [27], [31].

## **2.2. Silnik i falownik trakcyjny**

Niniejszy podrozdział przedstawia metody określania wymagań trakcyjnych dla autobusów miejskich i sposób ich przetransponowania na parametry techniczne silnika i falownika trakcyjnego. Na podstawie projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric, przedstawiono metody projektowe i badawcze (obserwacyjną i symulacji komputerowej) oraz techniki obliczeniowe, uwzględniające sposób pozyskania wartości poszczególnych wielkości fizycznych użytych we wzorach. Obliczone parametry pozwoliły na określenie wymagań technicznych. Przedstawiono metodę doboru silnika i falownika trakcyjnego za pomocą optymalizacji wielokryterialnej. Określono kryteria oceny technicznej i ekonomicznej, które posłużyły tej optymalizacji. Dokonano teoretycznej weryfikacji parametrów trakcyjnych zestawu silnik-falownik, w celu upewnienia się, że dobrane elementy spełniają wszystkie wymagania funkcjonalne.

### 2.2.1. Określenie wymagań trakcyjnych autobusu

Właściwy dobór elektrycznego silnika trakcyjnego do autobusu oraz właściwe dopasowanie do niego falownika wiąże się z koniecznością przeprowadzenia obliczeń. Najpierw jednak, należy zdefiniować wymagania trakcyjne stawiane danemu typowi pojazdu. Uzależnione one są od przeznaczenia autobusu, tj. czy będzie on obsługiwał linie miejskie, podmiejskie czy międzymiastowe. Analiza przetargów na autobusy miejskie klasy midi, tj. o długości 9 - 10,5 m [34], wykonana w oparciu o materiały firmy Solaris wskazuje, że zaprojektowanie pojazdu o prędkości maksymalnej  $\geq 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  (pojazd w pełni obciążony poruszający się po płaskiej nawierzchni) oraz będącego w stanie z prędkością co najmniej  $20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  pokonać wzniesienia o nachyleniu minimum 12% w trybie pracy dorywczej silnika S2-30 min i minimum 15% w trybie S2-30 s spełnia wymagania ponad 95% europejskich klientów [4]. W związku z tym, spełnienie co najmniej takich osiągnięć pojazdu, było kryterium dla doboru silnika i falownika trakcyjnego [35].

### 2.2.2. Obliczanie parametrów silnika trakcyjnego

Do doboru elektrycznego silnika trakcyjnego dla autobusu konieczne jest ustalenie jego parametrów. Do tych podstawowych należą moment obrotowy, który wyznaczyć można ze wzoru (1) oraz moc mechaniczna, którą określono we wzorze (2).

$$M_{\text{sil}} = \frac{F_{\text{total}} \cdot r}{\eta \cdot i} \quad (1)$$

gdzie:  $M_{\text{sil}}$  – moment obrotowy silnika elektrycznego [Nm],  $F_{\text{total}}$  – siła oporów ruchu [N],  $r$  – promień koła [m],  $\eta$  – sprawność przekładni osi napędowej,  $i$  – przełożenie przekładni osi napędowej

$$P_{\text{sil}} = \frac{F_{\text{total}} \cdot v}{1000 \cdot \eta} \quad (2)$$

gdzie:  $P_{\text{sil}}$  – moc mechaniczna silnika elektrycznego [kW],  $v$  – prędkość pojazdu [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ]

Aby obliczyć obie te wielkości niezbędne jest wyznaczenie wartości siły oporów ruchu  $F_{\text{total}}$ , przy zadanej prędkości. Na opory te składają się opory toczenia, opory powietrza oraz opory wzniesienia, co przedstawiono we wzorze (3) [35].

$$F_{\text{total}} = m g f_0 \left( 1 + \left( 0,0216 \cdot \frac{v}{|\hat{v}|} \right)^2 \right) \cos(\arctg(\alpha)) + m g \sin(\arctg(\alpha)) + \frac{1}{2} \rho A c_x v^2 \quad (3)$$

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

Wzór ten pozwala obliczyć moment obrotowy  $M_{\text{sil}}$  i moc mechaniczną silnika  $P_{\text{sil}}$ , jednak wprowadza kolejne dwie nieznanne wielkości, tj. współczynnik oporu toczenia  $f_0$  i współczynnik oporu powietrza  $c_x$ . W celu wyznaczenia ich przybliżonych wartości, można skorzystać z literatury, która określa, że dla pojazdu użytkowego współczynnik oporu toczenia opony na asfalcie wynosi od 0,006 do 0,01 [36], a współczynnik oporu powietrza autobusu zawiera się w przedziale od 0,6 do 0,8 [37]. Posiadając pojazd zbliżony, tj. tej samej klasy, o podobnej konstrukcji, lub prototyp pojazdu, dla którego dobierany jest silnik, można dokonać pomiarów, uzyskując większą dokładność. Najprostszą metodą poznania wartości tych współczynników i jednocześnie metodą w zupełności wystarczającą do obliczeń parametrów silnika elektrycznego, jest tzw. próba wybiegu. Polega ona na rozpędzeniu pojazdu do zadanej prędkości i poddaniu go swobodnemu zwalnianiu mierząc zmianę prędkości w czasie. Technikę obliczeniową w oparciu o próbę wybiegu przedstawiono w podrozdziale 4.2.2. w ramach walidacji obliczeń dla wdrożonego rozwiązania. Wielokrotnie wykonywane w firmie Solaris, takie badania dowodzą, że zakres współczynników oporów toczenia i oporów powietrza opisywanych w literaturze, jest zasadny do doboru silnika elektrycznego. W związku z powyższym przedstawiono obliczenia dla dolnego i górnego zakresu współczynników wskazywanych w literaturze. Ma to na celu pokazanie ich wpływu na moment obrotowy i moc dobieranego silnika trakcyjnego w odniesieniu do wymagań trakcyjnych postawionych autobusowi. Dla przeprowadzenia obliczeń należy wyznaczyć brakujące wielkości fizyczne uwzględnione we wzorach (1), (2) i (3). Należą do nich: wartości gęstości powietrza  $\rho$ , pole powierzchni czołowej pojazdu  $A$ , promień koła  $r$ , sprawność osi napędowej  $\eta$ , oraz przełożenie przekładni osi napędowej  $i$ . Gęstość powietrza  $\rho$  opisana jest wzorem (4).

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T} \quad (4)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość powietrza [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ],  $p$  – ciśnienie powietrza [Pa],  $T$  – temperatura powietrza [K],  $r = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$  [38] – indywidualna stała gazowa dla powietrza [ $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ]

W warunkach standardowych wg ISO13443 (temperatura  $T = 288,15$  K, ciśnienie  $p = 101325$  Pa) [39], gęstość powietrza suchego wynosi więc zgodnie ze wzorem (4)  $\rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

Pozostałe brakujące parametry dotyczą pojazdu i należy je odczytać z kart katalogowych poszczególnych elementów lub samego pojazdu. Pole powierzchni czołowej projektowanego autobusu Urbino 9 LE electric wynosi:  $A = 7,91$  m<sup>2</sup>, promień koła  $r = 0,42$  m, sprawność przekładni osi napędowej  $\eta = 0,97$  a przełożenie przekładni osi napędowej  $i = 6,5$ . W oparciu o wzory (1), (2) i (3) wyznaczono momenty obrotowe  $M_{\text{sil}}$  i moce mechaniczne  $P_{\text{sil}}$  na podstawie sił oporów ruchu  $F_{\text{total}}$ , dla założonych warunków, tj. przy pełnym załadunku ( $m = 16000$  kg) oraz dla prędkości pojazdu  $v = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  na płaskiej nawierzchni ( $\alpha = 0\%$ ),  $v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  na wzniesieniu  $\alpha = 12\%$  oraz  $\alpha = 15\%$ , zarówno dla minimalnych jak i maksymalnych literaturowych wartości współczynników oporów toczenia i oporów powietrza. Wyniki przedstawiono w tabeli nr 3.

**Tabela 3.** Siły oporów ruchu, momenty obrotowe i moce mechaniczne wyliczone dla określonych wymagań postawionych pojazdowi dla minimalnych oraz maksymalnych literaturowych wartości współczynników toczenia i oporów powietrza

Warunki ruchu	$F_{\text{total}}$ [N]	$M_{\text{sil}}$ [Nm]	$P_{\text{sil}}$ [kW]
$v = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ; $\alpha = 0\%$ ; $f_0 = 0,006$ ; $c_x = 0,6$	2594	173	59
$v = 80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ; $\alpha = 0\%$ ; $f_0 = 0,01$ ; $c_x = 0,8$	3845	257	88
$v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ; $\alpha = 12\%$ ; $f_0 = 0,006$ ; $c_x = 0,6$	19733	1316	113
$v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ; $\alpha = 12\%$ ; $f_0 = 0,01$ ; $c_x = 0,8$	20395	1361	117
$v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ; $\alpha = 15\%$ ; $f_0 = 0,006$ ; $c_x = 0,6$	24311	1622	139
$v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ; $\alpha = 15\%$ ; $f_0 = 0,01$ ; $c_x = 0,8$	24970	1666	143

Źródło: opracowanie własne

Analizując powyższe wyniki, zaobserwowano, że jazda na płaskiej nawierzchni nawet z prędkością  $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  wymaga znacznie mniejszego momentu obrotowego i mocy w porównaniu do podjazdu pod wzniesienie. W celu zweryfikowania procentowego udziału oporów wzniesienia  $F_w$  względem sumarycznej siły oporów ruchu  $F_{\text{total}}$  dokonano obliczeń a wyniki przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4.** Procentowy udział oporów wzniesienia  $F_w$  względem sumarycznej siły oporów ruchu  $F_{total}$  dla podjazdu pod wzniesienie 12% i 15%, przy prędkości  $20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  w pełni obciążonego autobusu (16000 kg)

	$F_{total}$ [N]	$F_w$ [N]	$F_w/F_{total}$ [%]
$v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}; \alpha = 12\%; f_0 = 0,006; c_x = 0,6$	19733	18695	95
$v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}; \alpha = 12\%; f_0 = 0,01; c_x = 0,8$	20395	18695	92
$v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}; \alpha = 15\%; f_0 = 0,006; c_x = 0,6$	24311	23276	96
$v = 20 \frac{\text{km}}{\text{h}}; \alpha = 15\%; f_0 = 0,01; c_x = 0,8$	24970	23276	93

Źródło: opracowanie własne

Uzyskane wyniki obliczeń dowodzą, że we wskazanych warunkach, udział oporów wzniesienia jest dominujący (powyżej 90%). Różnice we współczynnikach oporów toczenia i powietrza, dla minimalnych i maksymalnych wartości literaturowych, mają nieznaczący wpływ (3% różnicy) w kontekście doboru silnika elektrycznego do zastosowania w autobusie. Jest to jednocześnie dowód na to, że dla tak określonych wymagań trakcyjnych, przyjęcie maksymalnych literaturowych wartości dla współczynników oporów toczenia i powietrza jest w zupełności wystarczające i nie wiąże się z nadmiernym przewymiarowaniem parametrów silnika.

Na podstawie powyższych obliczeń i analiz, jako minimalne wartości momentu obrotowego i mocy przyjęto dla trybu pracy dorywczej silnika S2-30 min:  $M_{sil} = 1361 \text{ Nm}$  i  $P_{sil} = 117 \text{ kW}$  oraz dla S2-30 s:  $M_{sil} = 1666 \text{ Nm}$  i  $P_{sil} = 143 \text{ kW}$ . Wartości te oraz konieczność posiadania obudowy w klasie szczelności co najmniej IP65 oraz certyfikacji na zgodność z regulaminem R85 EKG ONZ, opisane w podrozdziale 2.1., stały się wymaganiami do doboru silnika trakcyjnego.

### 2.2.3. Dobór silnika trakcyjnego

Analizie poddano 17 silników różnych dostawców. Z tego 5 z nich spełniło wymagania techniczne opisane w podrozdziale 2.2.2. Pojawiło się pytanie, które towarzyszy praktycznie każdej analizie dotyczącej wyboru rozwiązania, tj. który z nich będzie najlepszy. Aby odpowiedzieć na to pytanie należało stworzyć listę kryteriów oceny ważnych z punktu widzenia przedsiębiorstwa, które podzielono na dwie główne grupy: techniczne i ekonomiczne. Do tych pierwszych zaliczono: wartości momentów obrotowych i mocy dla trybu pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s oraz ich stosunki do masy i objętości, sprawność maksymalną, masę a także wymiary silnika mierzone jako objętość potrzebną do jego zabudowy. Wartości momentów i mocy pojawiły się jako wymagania podstawowe, ale stanowią również kryterium oceny,

ponieważ im wyższa wartość momentu i mocy tym parametry trakcyjne pojazdu mogą być lepsze. Wiąże się to często z tym, że wraz ze wzrostem wspomnianych parametrów, rośnie również masa i wymiary silnika, dlatego również one zostały wybrane jako kryterium oceny technicznej. Do grupy kryteriów ekonomicznych wybrano: cenę za produkt, kalkulowaną dla dostaw seryjnych w ilościach rocznych równych przewidywanej sprzedaży autobusów posiadających dany silnik, termin dostawy liczony w tygodniach od momentu zamówienia oraz dojrzałość produktu mierzona w ilości do tej pory sprzedanych przez producenta silników tego typu. Bardzo rzadko zdarza się sytuacja, że dane rozwiązanie jest najlepsze wg wszystkich kryteriów oceny. Spośród wybranych w preselekcji silników, spełniających podstawowe wymagania, nie było takiego rozwiązania. Pojawiły się kolejne pytania, jak porównać wartości kryteriów, wyrażone w różnych jednostkach, należących do 2 grup: technicznych i ekonomicznych, a także które z nich jest ważniejsze. Aby na nie odpowiedzieć autor rozprawy zaproponował dokonanie optymalizacji wielokryterialnej. Istnieje wiele metod aby ją wykonać, jednak jedną z najbardziej znanych, mających na celu znalezienie jednego rozwiązania, jest metoda sum ważonych. Jej zaletą jest sprowadzenie zagadnienia wielokryterialnego do jednokryterialnego, gdzie poszczególne funkcje określające kryteria przekształcane są w jedną funkcję celu zgodnie ze wzorem (5) [40], [41].

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij} \quad (5)$$

gdzie:  $S_i \in [0,1]$ ,  $w_j \in [0,1]$  oraz:  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$

$S_i$  – ogólna ocena alternatywy  $i$ ,  $w_j$  – waga kryterium  $j$ ,  $r_{ij}$  – znormalizowana ocena alternatywy  $i$  względem kryterium  $j$  [41]

Podczas realizacji projektu określono kryteria oraz wagi, które posłużyły optymalizacji. Zgodnie z założeniami tej metody, ocena alternatywy  $r_{ij}$  względem poszczególnych kryteriów musi być znormalizowana. Oznacza to, że należy przekształcić bezwzględne wartości kryteriów, które wielokrotnie posiadają różne zakresy oraz jednostki, w wartości względne o ujednoczonych zakresach liczbowych [42]. Metod normujących jest również wiele. Na potrzeby analizy wybrano metodę unitaryzacji zerowanej, która jest metodą uniwersalną, jedną z najczęściej stosowanych, pozwalającą na normowanie zmiennych dodatnich, ujemnych oraz o wartości 0 [31], [33]. W ramach tej metody, zmienne poddawane normalizacji klasyfikuje się na:

- Stymulanty – ocena rośnie wraz ze wzrostem wartości zmiennej przypisanej do ocenianego kryterium. Wówczas normalizacja odbywa się wg wzoru (6):

$$r_{ij} = (x_{ij} - \min(x_{ij})) / (\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})) \quad (6)$$

gdzie:  $x_{ij}$  – wartość zmiennej kryterium  $j$  dla alternatywy  $i$ ,  $\max(x_{ij})$  – wartość maksymalna zmiennych kryterium  $j$  dla wszystkich alternatyw  $i$ ,  $\min(x_{ij})$  – wartość minimalna zmiennych kryterium  $j$  dla wszystkich alternatyw  $i$

- Destymulanty – ocena maleje wraz ze wzrostem wartości zmiennej przypisanej do ocenianego kryterium. Wówczas normalizacja odbywa się wg wzoru (7):

$$r_{ij} = (\max(x_{ij}) - x_{ij}) / (\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})) \quad (7)$$

- Nominanty – ocena jest najkorzystniejsza w określonym przedziale wartości zmiennej  $\langle c_{1j}, c_{2j} \rangle$  i spada zarówno powyżej jak i poniżej granicy przedziału optymalnego. Wówczas normalizacja odbywa się wg wzoru (8), (9) lub (10) w zależności od wartości zmiennej [40]:

$$r_{ij} = (x_{ij} - \min(x_{ij})) / (c_{1j} - \min(x_{ij})) \quad (8)$$

*gdy*  $x_{ij} < c_{1j}$

$$r_{ij} = 1 \quad (9)$$

*gdy*  $c_{1j} < x_{ij} < c_{2j}$

$$r_{ij} = (x_{ij} - \max(x_{ij})) / (c_{2j} - \max(x_{ij})) \quad (10)$$

*gdy*  $x_{ij} > c_{2j}$

Według opisaney metody optymalizacji wielokryterialnej sum ważonych z wykorzystaniem do normowania zmiennych metody unitaryzacji zerowanej, porównano wszystkie 5 silników, które przeszły etap wstępnej selekcji i spełniły podstawowe założone wymagania techniczne. W tabeli 5 przedstawiono listę ocenianych kryteriów wraz z wagami ustalonymi na etapie projektu oraz oceny dla poszczególnych



rozwiązań. Z uwagi na tajemnicę przedsiębiorstwa oraz podpisane umowy o poufności nazwy producentów oraz typy silników zastąpiono kolejnymi literami alfabetu, a wartości bezwzględne zmiennych dla poszczególnych kryteriów nie zawarto w tabeli. Szarym tłem zaznaczono zmienne będące stymulantami, a beżowym – destymulantami. Nominanty w poniższym zestawieniu nie występowały.

**Tabela 5.** Optymalizacja wielokryterialna silników trakcyjnych w oparciu o metodę sum ważonych z wykorzystaniem metody unitaryzacji zerowanej do normowania zmiennych

Kryterium	Waga	Ocena z wagą				
		A	B	C	D	E
Moc dla S2-30 min, kW	0,02	0,000	0,000	0,006	0,020	0,011
Moc dla S2-30 s, kW	0,02	0,003	0,000	0,007	0,015	0,020
Moment dla S2-30 min, Nm	0,02	0,000	0,020	0,000	0,013	0,006
Moment dla S2-30 s, Nm	0,02	0,010	0,018	0,000	0,020	0,016
Sprawność szczytowa, %	0,04	0,023	0,000	0,000	0,029	0,040
Masa, kg	0,06	0,036	0,028	0,060	0,000	0,021
Objętość, m <sup>3</sup>	0,06	0,032	0,008	0,060	0,000	0,014
Stosunek: moc dla S2-30 min / masa, kW / kg	0,02	0,002	0,000	0,020	0,002	0,003
Stosunek: moc dla S2-30 s / masa, kW / kg	0,02	0,003	0,000	0,020	0,003	0,009
Stosunek: moment dla S2-30 min / masa, Nm / kg	0,02	0,003	0,009	0,020	0,000	0,001
Stosunek: moment dla S2-30 s / masa, Nm / kg	0,02	0,008	0,009	0,020	0,000	0,004
Stosunek: moc dla S2-30 min / objętość, kW / m <sup>3</sup>	0,02	0,003	0,000	0,020	0,005	0,005
Stosunek: moc dla S2-30 s / objętość, kW / m <sup>3</sup>	0,02	0,005	0,000	0,020	0,006	0,011
Stosunek: moment dla S2-30 min / objętość, Nm / m <sup>3</sup>	0,02	0,002	0,005	0,020	0,000	0,000
Stosunek: moment dla S2-30 s / objętość, Nm / m <sup>3</sup>	0,02	0,007	0,001	0,020	0,000	0,002
Cena seryjna produktu, EUR	0,50	0,500	0,000	0,265	0,471	0,485
Termin dostawy, tygodnie	0,06	0,055	0,000	0,046	0,055	0,060
Dojrzałość produktu, liczba sprzedanych sztuk	0,04	0,040	0,027	0,027	0,027	0,000
<b>Suma ocen Si:</b>	<b>1,00</b>	<b>0,732</b>	<b>0,125</b>	<b>0,630</b>	<b>0,667</b>	<b>0,707</b>

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzona optymalizacja wykazała, że optymalnym rozwiązaniem będzie silnik „A”, natomiast najgorszym wg ustalonych kryteriów i wag silnik „B”. W związku z tym do dalszych analiz wybrano silnik „A”.

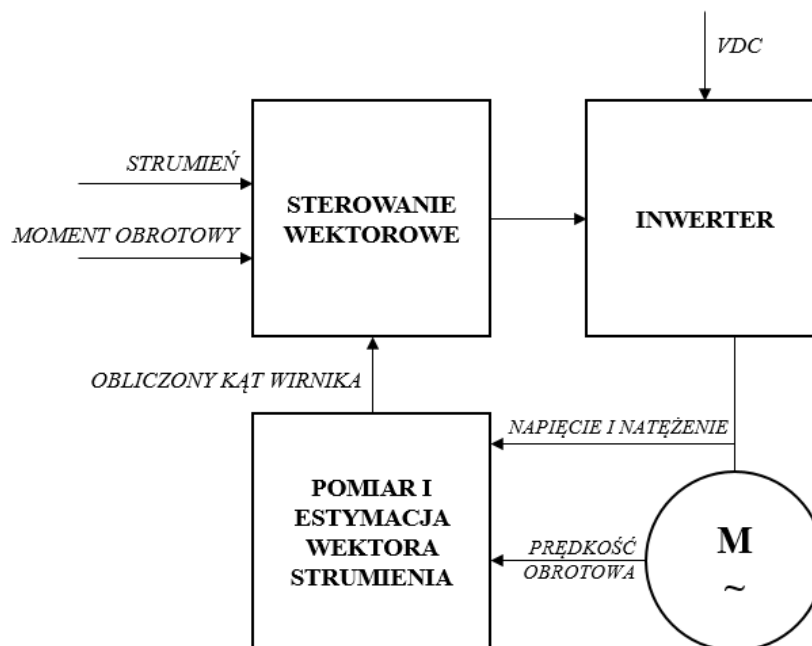
#### 2.2.4. Dobór falownika trakcyjnego

Znając parametry silnika trakcyjnego można rozpocząć proces doboru falownika. Oprócz podstawowych wymagań, takich jak zakres napięć AC, prąd i moc falownika dopasowany do silnika w sposób pozwalający na uzyskanie jego znamionowych

i maksymalnych osiągnięć, należy również uwzględnić te opisane w podrozdziale 2.1., a także wymagania stawiane falownikom autobusów elektrycznych tj.:

- praca falownika w zakresie napięć wejściowych: co najmniej 510–750 V DC,
- układy sterowania falownika zasilane napięciem znamionowym: 24 V DC,
- komunikacja za pomocą magistrali CAN: wg protokołu zgodnego z SAE J1939,
- obudowa falownika wykonana w stopniu ochronnym: IP65 lub wyższym,
- falownik posiadający certyfikaty zgodności z regulaminami EKG ONZ: R10 i R100,
- zabezpieczenie przeciążeniowe,
- zabezpieczenie zwarciove,
- funkcjonalność ochrony termicznej silnika: ograniczenie momentu obrotowego silnika,
- funkcjonalność rekuperacji energii: możliwość aktywacji i deaktywacji funkcji za pomocą sygnałów CAN zgodnie z SAE J1939,
- funkcjonalność redukcji momentu obrotowego silnika: możliwość ograniczenia momentu obrotowego przez sterowniki układu hamulcowego, przegubu oraz Główny Komputer Napędu za pomocą sygnałów CAN zgodnie z SAE J1939,
- funkcjonalności regulacji prędkości pojazdu: możliwość blokady pedału gazu, ustawienia ogranicznika prędkości maksymalnej i zadanej przez kierowcę, ustawienie stałej prędkości zadanej przez kierowcę (tempomat) za pomocą sygnałów CAN zgodnie z SAE J1939,
- funkcjonalność raportowania za pomocą sygnałów CAN zgodnie z SAE J1939: wartości napięć, natężenia prądu, mocy, momentu obrotowego i prędkości obrotowej, temperatury silnika, statusów funkcji realizowanych przez falownik oraz kodów błędów.

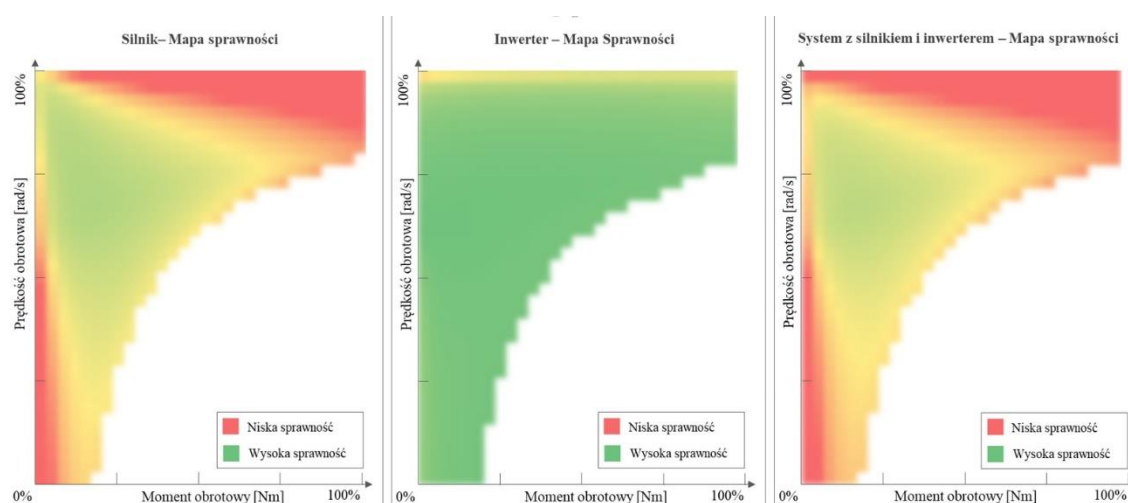
Analizując falowniki należy wybrać sposób sterowania w jaki falownik sterować będzie silnikiem trakcyjnym. Istnieją dwie metody sterowania: skalarna i wektorowa. W praktyce wszystkie nowoczesne falowniki trakcyjne posiadają sterowanie wektorowe, które zapewnia precyzyjne sterowanie prędkością jak i momentem obrotowym silnika. Ideę sterowania wektorowego przedstawiono na rysunku 11 [35], [43].



**Rys. 11.** Idea sterowania wektorowego

Źródło: [35], [43]

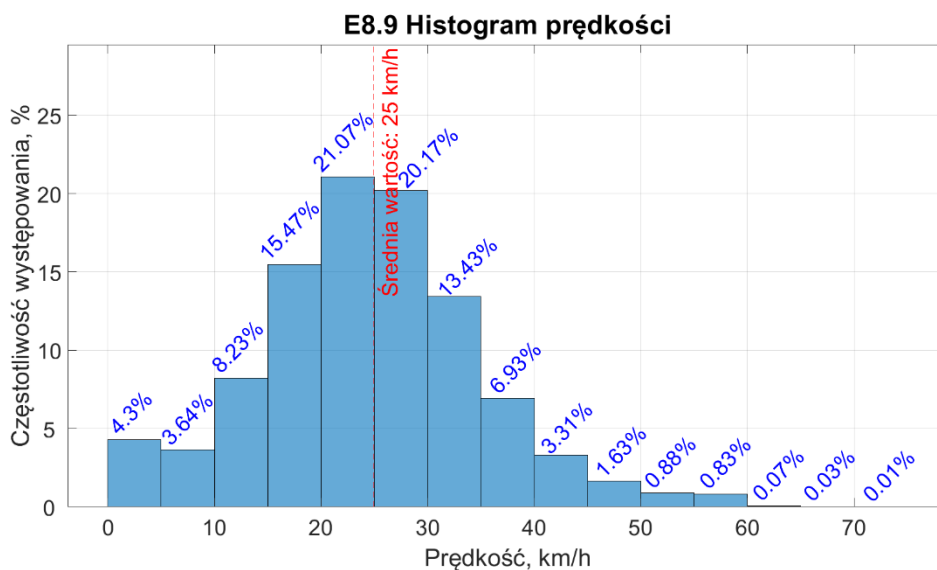
Przy doborze falownika należy zwrócić szczególną uwagę na jego mapę sprawności oraz to czy najwyższe wartości pokrywają się z najwyższą sprawnością silnika elektrycznego w funkcji jego prędkości obrotowej. Jest to często pomijane w procesie projektowania, a tylko takie holistyczne spojrzenie na układ napędowy pozwala na optymalizację zużycia energii pojazdu. Celem projektowania układu napędowego jest bowiem uzyskanie najwyższej sprawności zestawu silnik-falownik w zakresie prędkości obrotowych silnika, występujących najczęściej w warunkach rzeczywistych. Przykładową mapę sprawności przedstawiono na rysunku 12 [35].



**Rys. 12.** Przykładowy rozkład sprawności silnika i falownika w funkcji prędkości obrotowej

Źródło: [35]

Dla uzyskania najwyższej sprawności układu silnik-falownik dla najczęściej występujących prędkości pojazdu należy zidentyfikować te prędkości. Zależą one w głównej mierze od przeznaczenia projektowanego autobusu. Model Solaris Urbino 9 LE electric jest pojazdem niewielkich rozmiarów, który będzie eksploatowany głównie w mniejszych miastach i na trasach podmiejskich, a w związku z tym należy spodziewać się, że prędkości najczęściej występujące pojawią się w przedziale 15–35  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Istnieje możliwość wyznaczenia tych prędkości z większą dokładnością, jednak należy wówczas posiadać w eksploatacji zbliżony produkt, wyposażony w system rejestracji prędkości w pojeździe. Firma Solaris posiada zbliżony produkt i rejestruje jego dane za pomocą autorskiego systemu eSConnect. Dlatego autor rozprawy dokonał analizy danych prędkości 12 pojazdów Urbino 8,9 LE electric, zarejestrowanych w okresie 1 miesiąca z czasem próbkowania wynoszącym 1 s. Wyniki analizy przedstawiono w postaci histogramu wykonanego w środowisku MATLAB (rys. 13).



**Rys. 13.** Histogram prędkości floty autobusów Solaris Urbino 8,9 LE electric  
Źródło: opracowanie własne

Wyznaczono odchylenie standardowe  $\sigma = 10,55 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Wartość ta jest dość mała, co świadczy o tym, że najczęściej występujące prędkości skupiają się wokół wartości średniej. Z histogramu można odczytać, że najczęściej występujące prędkości to te z przedziału 20–25  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$  stanowiące 21,07% czasu operacyjności pojazdu. Niewiele mniej bo 20,17% czasu występują prędkości z zakresu 25–30  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Sumując oba zakresy otrzymano 41,24% dla zakresu prędkości pojazdu 20–30  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Analizując histogram

stwierdzono, że rozszerzając zakres prędkości do wartości  $15\text{--}35 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  uzyskuje się 70,14% wszystkich zmierzonych próbek prędkości. Zakres ten odpowiada dokładnie przedziałowi o szerokości jednego odchylenia standardowego  $1\sigma$ . Projektując pojazd należałoby zadbać aby uzyskać wysoką sprawność układu silnik-falownik, przynajmniej w zakresie najczęściej występujących prędkości pojazdu. W omawianym przypadku są to prędkości w zakresie  $15\text{--}35 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Takie parametry zapewnią możliwie najniższe zużycie energii wykorzystywanej na przemieszczanie się pojazdu.

Silniki elektryczne posiadają mapę sprawności w funkcji własnej prędkości obrotowej. Oznacza to, że najczęstsze prędkości liniowe pojazdu należy przeliczyć na prędkość obrotową wirnika silnika elektrycznego. Można tego dokonać stosując wzór (11).

$$n = \frac{v \cdot i \cdot 1000}{C_R \cdot 60} \quad (11)$$

gdzie:  $n$  – prędkość obrotowa silnika elektrycznego  $[\frac{\text{obr}}{\text{min}}]$ ,  $v$  – prędkość pojazdu  $[\frac{\text{km}}{\text{h}}]$ ,  $i$  – przełożenie przekładni osi napędowej,  $C_R$  – obwód toczny koła [m]

W projektowanym autobusie zastosowano koła o obwodzie tocznym  $C_R = 2,644$  m i oś napędową z przekładnią o przełożeniu  $i = 6,5$ . Wykonano obliczenia wg wzoru (11) dla przedziałów prędkości pojazdu wchodzących w zakres odchylenia standardowego  $1\sigma$  a wyniki przedstawiono w tabeli 6.

**Tabela. 6.** Przeliczenie prędkości liniowej pojazdu na prędkość obrotową wirnika silnika elektrycznego

$v$ $[\frac{\text{km}}{\text{h}}]$	$n$ $[\frac{\text{obr}}{\text{min}}]$
15	615
20	819
30	1229
35	1434

Źródło: opracowanie własne

Zweryfikowano zakresy wyliczonych prędkości obrotowych wirnika silnika elektrycznego z mapą sprawności zestawu silnik-falownik i potwierdzono, że zakres ten jest poprawnie dopasowany z punktu widzenia sprawności napędu. Jeśli wybrane rozwiązanie silnik-falownik posiada najwyższą sprawność w innym zakresie prędkości obrotowych wirnika silnika elektrycznego, to zakres ten można korygować przełożeniem przekładni osi napędowej projektowanego autobusu lub domontowaniem przekładni pomiędzy wałem a silnikiem elektrycznym. Trzeba pamiętać o tym, że taka zmiana ma bezpośredni wpływ na zapotrzebowany moment obrotowy silnika. Wówczas należy

wykonać ponownie obliczenia i jeżeli spełnione będą wymagania, to powtórzyć optymalizację wielokryterialną. Zanim wprowadzi się jakiegokolwiek zmiany, należy zweryfikować jak ta niższa sprawność w praktyce przenosi się na zużycie energii i na podstawie analizy potencjalnych korzyści i strat podjąć końcową decyzję.

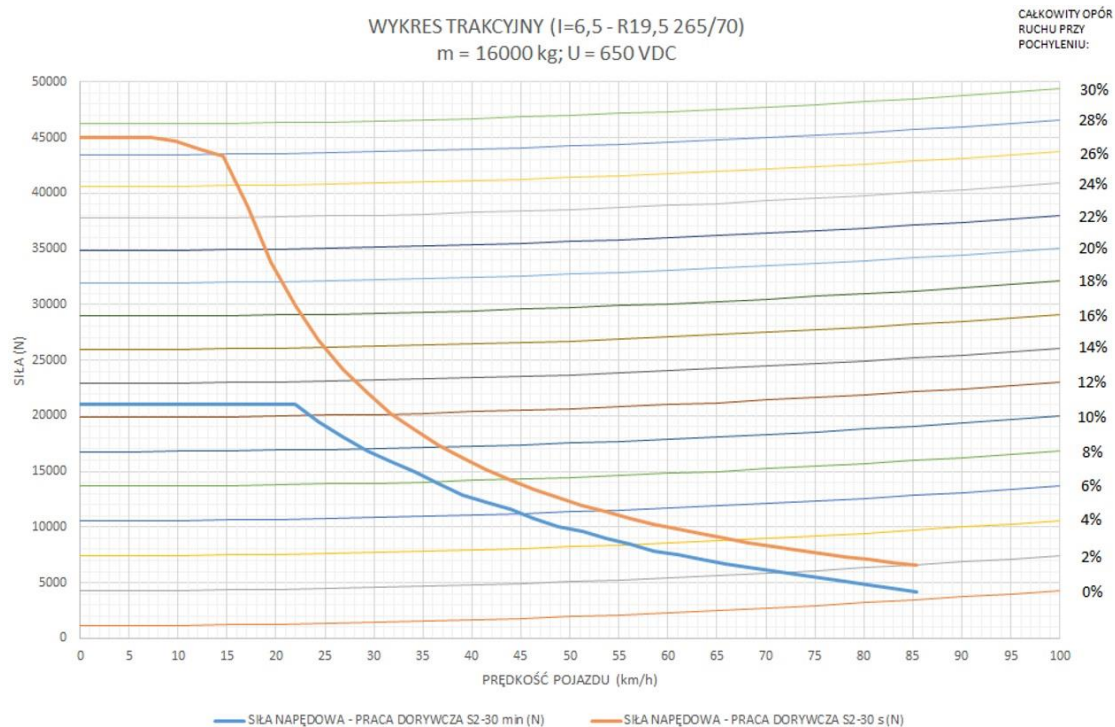
W przypadku silnika „A” problem doboru falownika nie był skomplikowany, ponieważ producent zaprojektował go właśnie do tego silnika, co zapewnia uzyskanie wysokiej sprawności sumarycznej zestawu silnik-falownik. O ile w tej sytuacji, wybrany falownik jest optymalny wg kryteriów technicznych to nie ma już takiej pewności co do kryteriów ekonomicznych. Z tego powodu przeprowadzono optymalizację wielokryterialną silników trakcyjnych wraz z falownikami, których parametry dopasowane były do poszczególnych silników. Wynik potwierdził, że silnik trakcyjny „A” wraz z dedykowanym falownikiem jest rozwiązaniem optymalnym wg zdefiniowanych kryteriów.

#### **2.2.5. Teoretyczna weryfikacja parametrów trakcyjnych zestawu silnik-falownik**

Mając dobrany silnik „A” wraz z falownikiem, należy finalnie zweryfikować podstawowe założenia doboru silnika i falownika określone we wcześniejszym etapie projektowania. Narzędziem pozwalającym na wizualizację i weryfikację takich założeń jest wykres trakcyjny pojazdu, który należy przygotować w oparciu o dane pojazdu oraz silnika i falownika, dostarczone przez producentów tych elementów. W tym celu najpierw należy przygotować charakterystykę wyznaczającą siły oporów ruchu  $F_{total}$ , których pokonanie pozwala na podjazd pojazdu pod wzniesienie o konkretnym nachyleniu z określoną prędkością. Do tego rodzaju obliczeń stosuje się wzór (3). Następnie na tak przygotowany wykres nanosi się siły napędowe  $F_N$  jakich jest w stanie dostarczyć zestaw silnik-falownik dla konkretnych prędkości obrotowych wirnika silnika elektrycznego. W celu przeliczenia prędkości obrotowych wirnika na prędkości liniowe pojazdu należy posłużyć się wzorem (11). Jako końcowy rezultat otrzymuje się wykres trakcyjny, którego przykład dla projektowanego autobusu Solaris Urbino 9 LE electric, przedstawia rysunek 14 [4], [35].

Z wykresu trakcyjnego odczytać można, że pojazd obciążony masą 16000 kg, w trybie pracy dorywczej silnika S2-30 min na płaskiej nawierzchni jest w stanie jechać z prędkością  $85 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , na podjeździe 12% –  $22 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , a w trybie S2-30 s jest w stanie pokonywać

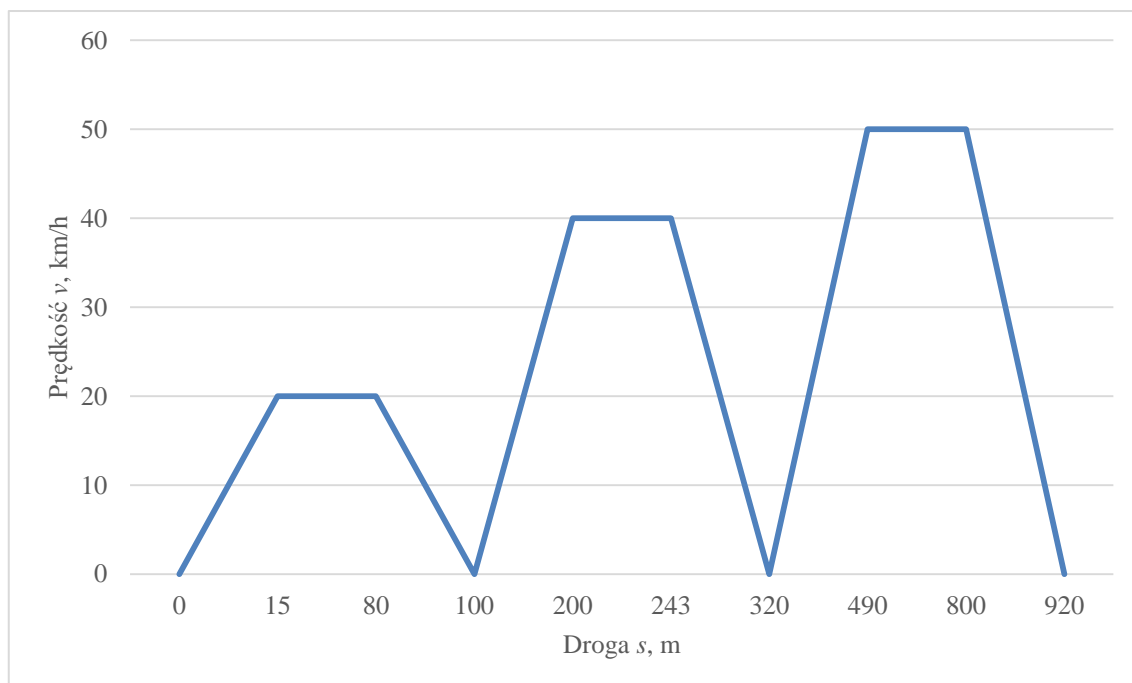
wzniesienia 15% z prędkością  $26 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , co spełnia podstawowe założenia postawione silnikowi trakcyjnemu na początku projektu.



**Rys. 14.** Wykres traktujący autobus Solaris Urbino 9 LE electric  
Źródło: [4], [35]

Ostatnim etapem teoretycznej weryfikacji doboru zestawu silnik-falownik jest sprawdzenie, czy pojazd w niego wyposażony osiągnie przyspieszenia oczekiwane przez klientów. Stowarzyszenie UITP (Międzynarodowe Stowarzyszenie Transportu Publicznego) opracowało ustandaryzowaną procedurę pomiaru zużycia energii w autobusach elektrycznych E-SORT. Metoda ta opisuje wykonywanie pomiarów zużycia energii w ściśle określonych cyklach jezdnych, które z kolei odzwierciedlają charakterystykę eksploatacji autobusów miejskich w Europie. Procedura ta odwołuje się do bardzo szczegółowego opisu 3 cykli jezdnych zawartych we wcześniej opracowanym przez UITP dokumencie SORT, który dedykowany był do pojazdów posiadających silnik termiczny. Pierwszy cykl, nazwany SORT1, odzwierciedla jazdę miejską i charakteryzuje się średnią prędkością wynoszącą  $12,1 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , drugi cykl – SORT2, jest odpowiednikiem jazdy mieszanej ze średnią prędkością  $18 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , a cykl trzeci – SORT3, odpowiada charakterystyce jazdy podmiejskiej z prędkością średnią  $25,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Wszystkie

cykle opracowane są w analogiczny sposób. Uwzględniają etap przyspieszania, jazdy ze stałą prędkością, hamowania, a także postoju. Każdy z cykli składa się z 3 takich powtórzeń różniących się wartością osiągniętej prędkości i pokonywanym dystansem, co zaprezentowano na rysunku 15 na podstawie SORT2 [44], [45].



**Rys. 15.** Przykładowy cykl testowy SORT2  
Źródło: opracowano na podstawie [44], [45]

Można na nim zauważyć, że osiągnięte prędkości dla SORT2 to 20, 40 i 50  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Z kolei dla SORT1 wartości te wynoszą odpowiednio: 20, 30 i 40  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ , natomiast dla SORT3: 30, 50 i 60  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Należy zwrócić uwagę, że wraz ze zmianą osiągniętej prędkości w poszczególnych cyklach, zmieniają się odległości przebytej trasy. Przedstawione na rysunku 15 trapezy wykonano uwzględniając minimalne zdefiniowane w procedurze przyspieszenia średnie, które odzwierciedlają minimalne oczekiwania klientów na rynku autobusów miejskich. Analogiczne wymogi opisano dla pozostałych prędkości dotyczących cykli SORT1 i SORT3. W tabeli 7 przedstawiono minimalne przyspieszenia średnie wymagane procedurą SORT dla wszystkich zdefiniowanych prędkości docelowych występujących w poszczególnych cyklach.



**Tabela 7.** Zestawienie minimalnych przyspieszeń wg procedury SORT

Prędkość $v$ [km/h]	Przyspieszenie $a$ [m/s <sup>2</sup> ]
20	1,03
30	0,77
40	0,62
50	0,57
60	0,46

Źródło: opracowano na podstawie [44], [45]

Podane przyspieszenia wg procedury SORT dotyczą pojazdu obciążonego do poziomu  $116,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  przestrzeni pasażerskiej dla ryczałtowej liczby siedzeń 30, co odpowiada autobusowi z ok. połową z maksymalnej dopuszczalnej liczby pasażerów [45]. Autobus elektryczny może być wyposażony w różną liczbę akumulatorów trakcyjnych, procedura przewiduje osobne badania dla wszystkich konfiguracji. W związku z tym, założono, że przyspieszenia podane w tabeli 7 będą wymogiem minimalnym dla w pełni obciążonego autobusu, co zapewni wystarczające osiągi autobusu w każdej jego konfiguracji.

Aby obliczyć maksymalne przyspieszenie chwilowe pojazdu, należy skorzystać ze wzoru (12) na siłę bezwładności  $F_B$ , która to siła przeciwdziała zmianom prędkości pojazdu [46], [47], [48].

$$F_B = m \cdot \delta \cdot \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

gdzie:  $F_B$  – siła bezwładności [N],  $m$  – masa pojazdu [kg],  $\delta$  – współczynnik mas wirujących;  $v$  – prędkość pojazdu [ $\frac{m}{s}$ ],  $t$  – czas [s]

Znając zależność opisaną wzorem (13):

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (13)$$

gdzie:  $a$  – przyspieszenie pojazdu [ $\frac{m}{s^2}$ ]

oraz przekształcając wzór (12) w celu wyznaczenia przyspieszenia  $a$ , otrzymuje się wzór (14):

$$a = \frac{F_B}{m \cdot \delta} \quad (14)$$

Wartość siły bezwładności pojazdu  $F_B$  to również różnica pomiędzy siłą napędową zestawu silnik-falownik  $F_N$  (odczytana z wykresu trakcyjnego – rys. 14) oraz siłą

oporów ruchu przy zadanej prędkości  $F_{total}$  (wyliczona zgodnie ze wzorem (3)) co przedstawiano wzorem (15) [46].

$$F_B = F_N - F_{total} \quad (15)$$

gdzie:  $F_N$  – maksymalna siła napędowa zestawu silnik-falownik przy zadanej prędkości [N],  $F_{total}$  – siła napędowa, niezbędna do pokonania oporów ruchu przy zadanej prędkości [N]

Należy pamiętać, że wartość tych sił zmienia się w funkcji prędkości i należy je wyliczyć dla całego zakresu prędkości pojazdu, tj. od 0 do  $85 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Brakującą wartością do obliczenia przyspieszenia dla zadanych wartości prędkości, zgodnie ze wzorem (14), jest współczynnik mas wirujących  $\delta$ , który można obliczyć zgodnie ze wzorem (16) [48].

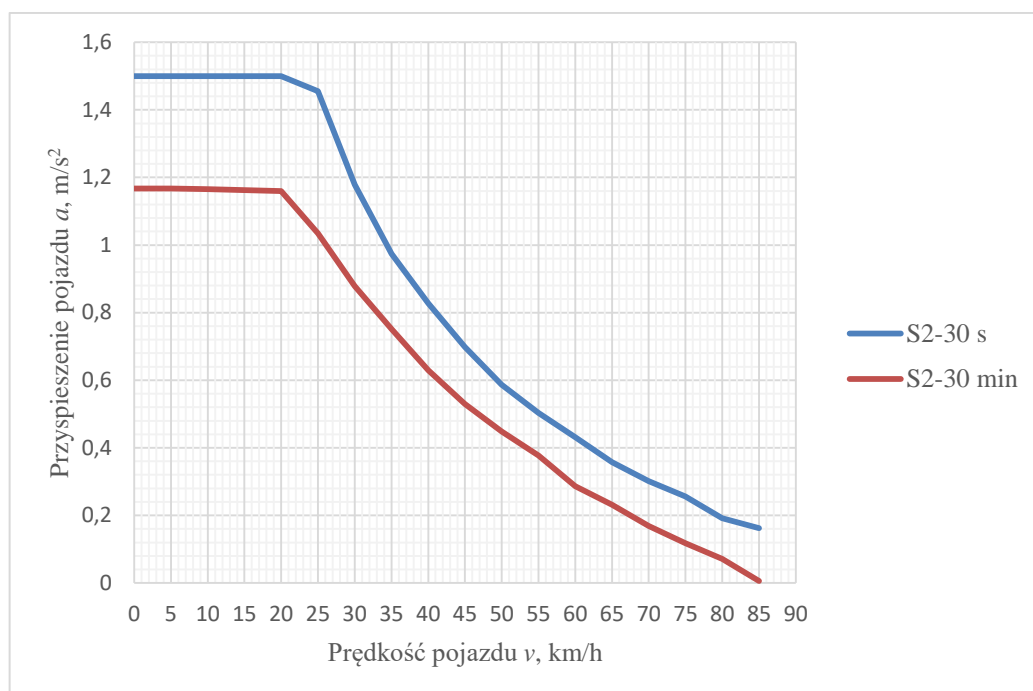
$$\delta = 1 + \frac{1}{r^2 \cdot m} \cdot (J_K + J_O + J_S \cdot i^2) \quad (16)$$

gdzie:  $r$  - promień koła [m],  $m$  – masa pojazdu [kg],  $J_K$  – moment bezwładności wszystkich kół pojazdu [ $\text{kg m}^2$ ],  $J_O$  – moment bezwładności osi napędowej na wyjściu [ $\text{kg m}^2$ ],  $J_S$  – moment bezwładności wirnika silnika elektrycznego [ $\text{kg m}^2$ ],  $i$  – przełożenie przekładni osi napędowej

Na wcześniejszym etapie rozprawy poznano promień koła wynoszący  $r = 0,42$  m oraz masę pojazdu obciążonego do pełna  $m = 16000$  kg, a także przełożenie przekładni osi napędowej  $i = 6,5$ . Wartości pozostałych wielkości użytych we wzorze (16), odczytano z dokumentacji technicznej dostawców podzespołów. Są to kolejno: moment bezwładności wszystkich kół pojazdu  $J_K = 60 \text{ kg m}^2$  (moment bezwładności jednego koła wynosi  $10 \text{ kg m}^2$ , w autobusie dwuosiowym montowane są 2 koła na osi przedniej i 4 koła na osi napędowej), moment bezwładności osi napędowej na wyjściu  $J_O = 7,38 \text{ kg m}^2$  oraz moment bezwładności wirnika silnika elektrycznego  $J_S = 1,36 \text{ kg m}^2$ . Po podstawieniu powyższych danych do wzoru (16) otrzymuje się współczynnik mas wirujących  $\delta = 1,04$  dla danej konfiguracji pojazdu i dopuszczalnej masy całkowitej 16000 kg.

Mając wszystkie potrzebne dane, wykorzystując wzór (14), przeprowadzono symulację przyspieszenia chwilowego pojazdu w funkcji jego prędkości (krok  $v = 5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ )

zarówno dla trybu pracy dorywczej silnika S2-30 s jak i S2-30min. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 16.



**Rys. 16.** Wyniki symulacji przyspieszenia chwilowego pojazdu w funkcji jego prędkości dla trybów pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s ( $m = 16000$  kg; R19,5 265/70;  $U = 650$  V DC,  $\alpha = 0\%$ )  
Źródło: opracowanie własne

Należy zwrócić uwagę, że producent falownika ograniczył programowo przyspieszenie chwilowe do wartości  $1,5 \frac{m}{s^2}$ . Uwzględniono to w przeprowadzonych symulacjach i zwiualizowano dla trybu pracy dorywczej silnika S2-30 s dla niskich prędkości ( $< 25 \frac{km}{h}$ ) pojazdu.

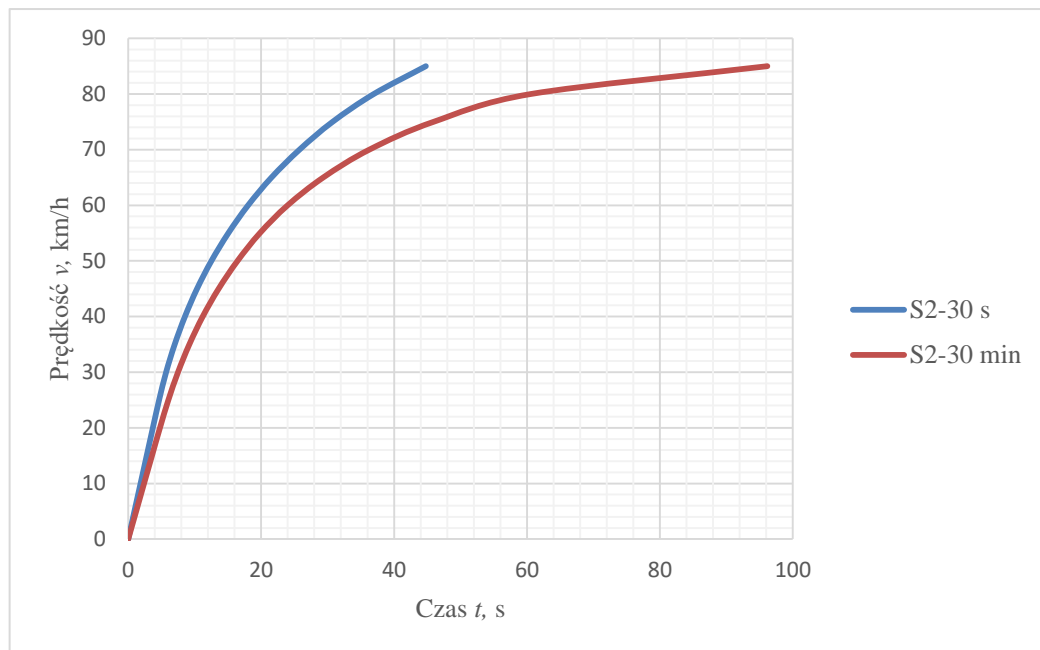
Stosując przekształcenie wzoru (13) można wykonać symulację obrazującą zmianę prędkości w czasie. Należy przy tym uwzględnić fakt, że przyspieszenie chwilowe jest zmienne w funkcji prędkości. Zastosowany w symulacji krok  $v = 5 \frac{km}{h}$  powoduje konieczność uśrednienia wartości przyspieszenia z 2 punktów obliczeniowych pomiędzy krokiem obecnym i poprzednim. Zależność przedstawia wzór (17) i (18).

$$\frac{a_i - a_{i-1}}{2} = \frac{v_i - v_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (17)$$

gdzie:  $t_i$  – czas przejazdu w kroku  $i$  [s],  $t_{i-1}$  – czas przejazdu w kroku  $i-1$  [s],  
 $v_i$  – prędkość pojazdu w kroku  $i$  [ $\frac{m}{s}$ ],  $v_{i-1}$  – prędkość pojazdu w kroku  $i-1$  [ $\frac{m}{s}$ ],  
 $a_i$  – przyspieszenie pojazdu w kroku  $i$  [ $\frac{m}{s^2}$ ],  $a_{i-1}$  – przyspieszenie pojazdu w kroku  $i-1$  [ $\frac{m}{s^2}$ ]

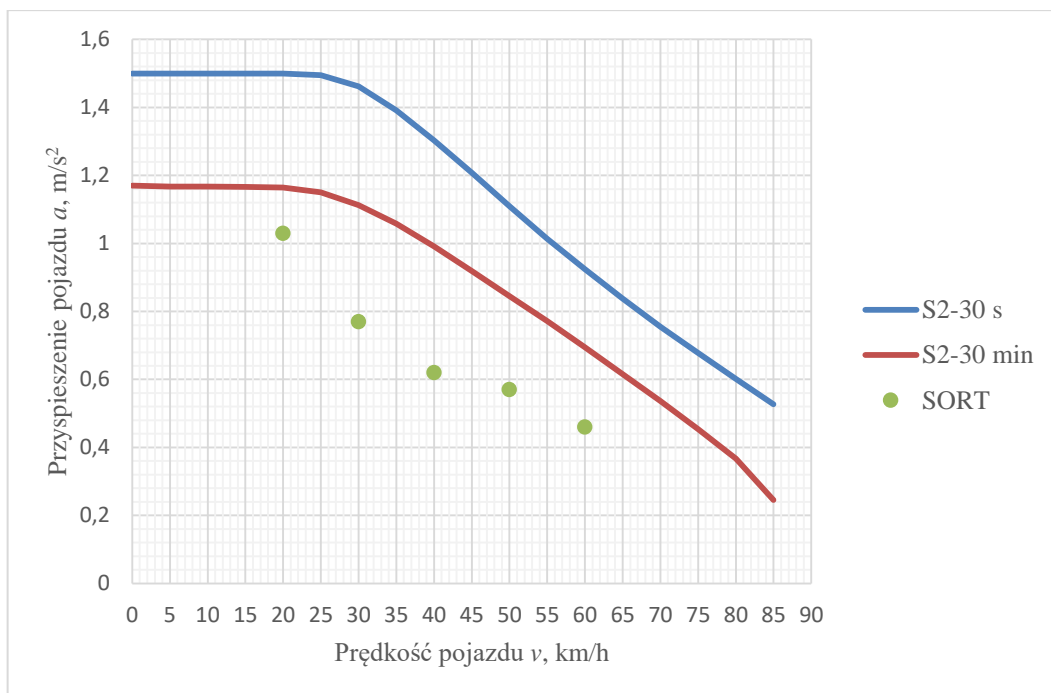
$$t_i = 2 \cdot \frac{v_i - v_{i-1}}{a_i - a_{i-1}} + t_{i-1} \quad (18)$$

Na rysunku 17 przedstawiono wyniki symulacji zmiany prędkości w czasie dla pojazdu przyspieszającego w trybie pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s.

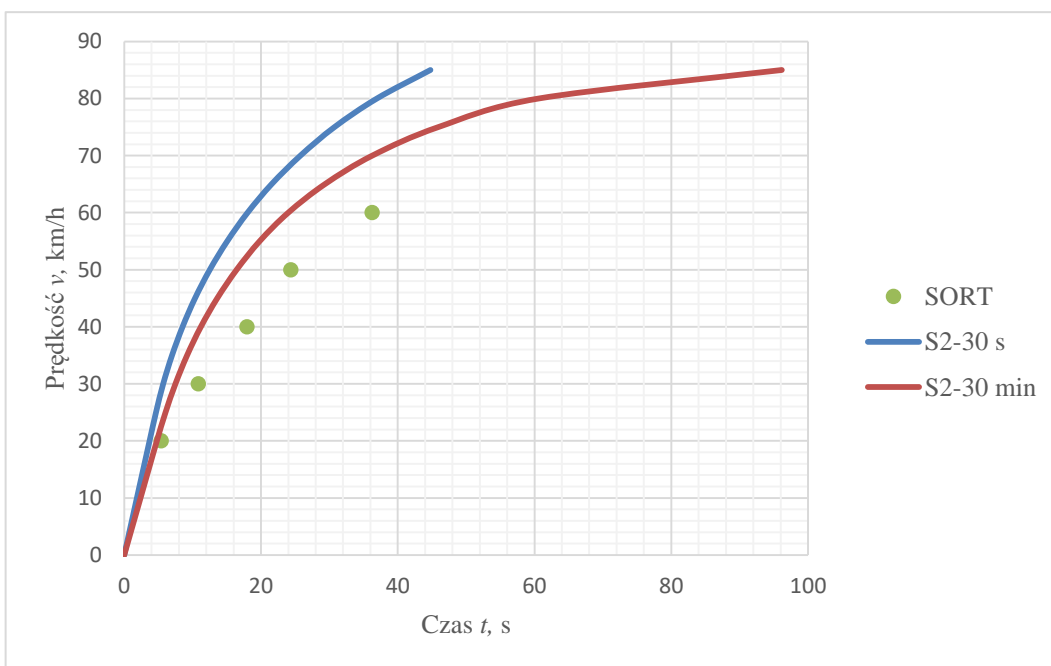


**Rys. 17.** Wyniki symulacji zmiany prędkości pojazdu w czasie dla trybów pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s ( $m = 16000$  kg; R19,5 265/70;  $U = 650$  V DC,  $\alpha = 0\%$ )  
 Źródło: opracowanie własne

Dla porównania przyspieszeń pojazdu z wymaganiami z procedury SORT i zawartymi w tabeli 7, należy przeliczyć przyspieszenia chwilowe w funkcji prędkości, przedstawione na rysunku 16, do postaci przyspieszeń średnich uzyskiwanych w trakcie rozpędzania pojazdu od prędkości  $0 \frac{km}{h}$  do poszczególnych  $i$ -tych prędkości. Wynika to z faktu, że przyspieszenia zdefiniowane w procedurze SORT są przyspieszeniami średnimi uzyskiwanymi podczas przyspieszenia pojazdu do określonej wartości prędkości. Dla przeliczenia na wartość średnią przyspieszeń, mając zasymulowaną zmianę prędkości w czasie, można skorzystać ze wzoru (13). Tak wykonaną symulację zestawiono z wartościami przyspieszeń średnich wg SORT i zaprezentowano na rysunku 18. Analogicznie zaktualizowano rysunek 17, a wyniki przedstawiono na rysunku 19.



**Rys. 18.** Wyniki symulacji dla przyspieszenia średniego w funkcji prędkości dla trybów pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s zestawione z minimalnymi przyspieszeniami średnimi wg SORT ( $m = 16000$  kg; R19,5 265/70;  $U = 650$  V DC,  $\alpha = 0\%$ )  
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 19.** Wyniki symulacji zmiany prędkości pojazdu w czasie dla trybów pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s zestawione z wartościami prędkości wynikającymi z SORT ( $m = 16000$  kg; R19,5 265/70;  $U = 650$  V DC,  $\alpha = 0\%$ )  
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, że dobrany zestaw silnik-falownik z zapasem spełnia minimalne wymagania przyspieszeń pojazdu określone

w procedurze SORT. Prezentowane osiągi zestawu silnik-falownik są wartościami maksymalnymi możliwymi do osiągnięcia i mogą być za pomocą oprogramowania zredukowane do oczekiwanych przez producenta pojazdu.

W oparciu o powyższe obliczenia i analizy, przedstawiono rekomendację Zarządowi firmy, aby w autobusie Urbino 9 LE electric zastosować silnik „A” wraz z dedykowanym do niego falownikiem. Rekomendację przyjęto.

### **2.3. Zasilanie układów pomocniczych**

W niniejszym podrozdziale opisano sposób zasilania układów pomocniczych w autobusie elektrycznym oraz metody doboru przetwornic DC/DC oraz DC/AC używanych w tym celu. Przedstawiono techniki wyznaczania zapotrzebowania na moc układów pomocniczych. Na ich podstawie określono kluczowe parametry dla przetwornic, które po wstępnej selekcji wytypowano na podstawie optymalizacji wielokryterialnej. Sposób postępowania przedstawiono w praktyczny sposób na podstawie realizacji projektu elektrycznego układu napędowego przeznaczonego dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric.

#### **2.3.1. Metody wyznaczania zapotrzebowania na moc instalacji elektrycznej 24 V DC autobusu elektrycznego**

Dla właściwego doboru przetwornicy DC/DC 24 V DC należy określić maksymalne natężenie prądu wyjściowego. Jego obliczenie możliwe jest dzięki wyznaczeniu zapotrzebowania na moc w instalacji pokładowej pojazdu. Dla napięcia stałego, zachodzi zależność opisana wzorem (19):

$$P = U \cdot I \quad (19)$$

gdzie:  $P$  – moc [W],  $U$  – napięcie [V],  $I$  – natężenie prądu [A]

Wiedząc, że napięcie znamionowe wynosi 24 V i znając zapotrzebowanie na moc, w oparciu o wzór (19) można określić maksymalne natężenie prądu potrzebne do zasilania instalacji 24 V.

Autobusy miejskie wyposażone są w szereg urządzeń elektrycznych i elektronicznych zasilanych z instalacji 24 V DC. Określenie właściwego zapotrzebowania na moc instalacji 24 V całego pojazdu jest bardzo trudne ze względu na sposób oraz miejsce jego

eksploatacji. Wpływa to na fakt, że wiele odbiorników działa z różną mocą w zależności od ich wykorzystania, a odbiorniki o pracy dorywczej mogą być aktywowane w różnym czasie, a więc w różnej konfiguracji z innymi odbiornikami [25], [49]. Zapotrzebowanie na moc dla instalacji 24 V DC w autobusie miejskim można wyznaczyć metodą obliczeniową oraz statystyczną. Ta pierwsza opiera się na założeniach odnośnie poziomu obciążenia odbiorników oraz czasu ich wykorzystania, co przy dużej ilości urządzeń może być dość dużym uproszczeniem. W literaturze naukowej znaleźć można różne metody obliczeniowe pozwalające na określenie tej wartości w sposób wystarczający dla doboru właściwego alternatora lub przetwornicy DC/DC 24 V [25], [49]. Przywołano metody stosowane przy doborze alternatora, ponieważ w przypadku pojazdów z napędem konwencjonalnym, to właśnie on jest odpowiednikiem przetwornicy DC/DC 24 V stosowanej w pojazdach elektrycznych, a sposób obliczania zapotrzebowania na moc dla instalacji 24 V pojazdu jest w obu przypadkach jednakowy. Druga metoda – statystyczna, została zaproponowana przez autora rozprawy, nie jest ona opisywana w literaturze, ponieważ wielokrotnie brakuje danych aby móc dokonać dokładnej analizy. Żeby z niej skorzystać należy posiadać flotę pojazdów o takiej samej, bądź zbliżonej konfiguracji, eksploatowanych w warunkach, na jakie przeznaczony jest nowoprojektowany pojazd. Analizowana flota musi być monitorowana w zakresie poboru mocy bądź prądu z instalacji 24 V. Żeby wnioski z analizy były precyzyjne, należy rozpoznać różnice w zakresie odbiorników 24 V pomiędzy analizowaną flotą a nowoprojektowanym pojazdem, oraz wprowadzić stosowne korekty. W dalszych rozważaniach przedstawione zostaną zarówno metoda obliczeniowa (bazująca na literaturze oraz doświadczeniu firmy Solaris) jak i statystyczna (będąca efektem prac autora rozprawy).

### **2.3.2. Metoda obliczeniowa**

Metoda obliczeniowa wyznaczenia wartości zapotrzebowania na moc, dla instalacji 24 V w autobusie elektrycznym, bazuje na określeniu współczynnika obciążenia oraz współczynnika czasu jego trwania, dla każdego odbiornika elektrycznego w pojeździe. Ze wzoru (19) wiadomo, że dla napięcia stałego, moc odbiornika jest wprost proporcjonalna do iloczynu napięcia i natężenia prądu jaki przez niego przepływa. Maksymalne natężenie prądu, potrzebne do zasilenia instalacji 24 V pojazdu, można więc zapisać wzorem (20) [50]:

$$I_{obc} = \sum_{i=1}^n I_{obc\ i} = \sum_{i=1}^n I_{Ni} \cdot k_{ti} \cdot k_{obc\ i} \quad (20)$$

gdzie:  $I_{obc}$  – maksymalne natężenie prądu potrzebne do zasilenia instalacji 24 V pojazdu [A],  $I_{obc\ i}$  – obliczeniowe natężenie prądu i-tego odbiornika [A],  $I_{Ni}$  – znamionowe natężenie prądu i-tego odbiornika [A],  $k_{ti}$  – współczynnik czasu wykorzystania i-tego odbiornika,  $k_{obc\ i}$  – współczynnik obciążenia i-tego odbiornika

Dla uproszczenia, ze względu na współczynnik czasu wykorzystania  $k_{ti}$ , poszczególne odbiorniki można skategoryzować wg trzech głównych grup:

- odbiorniki o ciągłym charakterze pracy,
- odbiorniki o długotrwałym charakterze pracy,
- odbiorniki o dorywczym charakterze pracy [49].

Dla odbiorników o ciągłym charakterze pracy współczynnik  $k_{ti}$  przyjmuje zawsze wartość 1. Dla odbiorników o długotrwałym i dorywczym charakterze pracy, współczynnik ten powinien przyjmować wartości w zakresie  $k_{ti} \in (0, 1)$ . Takie wartości przyjmuje wielu producentów pojazdów, w oparciu o własne doświadczenia [4]. W literaturze można spotkać daleko idące uproszczenia. Tom Denton w swej książce pt. „Automobile Electrical and Electronic Systems” zakłada, że dla odbiorników o długotrwałym charakterze pracy należy przyjąć, że  $k_{ti} = 1$ , a dla odbiorników o dorywczym charakterze pracy  $k_{ti} = 0,1$  [49]. Na potrzeby zawartych rozważań, do określenia współczynników  $k_{ti}$  dla poszczególnych odbiorników, skorzystano z doświadczeń firmy Solaris.

Współczynnik obciążenia odbiornika  $k_{obc\ i}$  koryguje wartość natężenia prądu znamionowego do wartości rzeczywistej natężenia prądu płynącego przez dany odbiornik, bądź w przypadku zmiennego obciążenia, do wartości średniej. Współczynnik obciążenia odbiornika  $k_{obc\ i}$  dla odbiorników rezystancyjnych w większości przypadków wynosi 1. Może się on zmieniać w przypadku odbiorników, których rezystancja ulega zmianie. Najtrudniejsze do oszacowania są współczynniki obciążenia odbiorników posiadających w swym zakresie różnego rodzaju silniki, napędzające np. wycieraczki czy hydrauliczne pompy układu wspomagania kierownicy. Obciążenie ich bowiem zależy od warunków pracy i w przypadku wycieraczek duże znaczenie ma stan piór oraz poziom wilgotności szyby, a w przypadku układu wspomagania kierownicy ciśnienie hydrauliczne pompy, które z kolei zależy od współczynnika przyczepności nawierzchni, po której porusza się pojazd. W celu teoretycznego wyznaczenia maksymalnego



natężenie prądu  $I_{obc}$ , potrzebnego do zasilania instalacji 24 V autobusu Solaris Urbino 9 LE electric zestawiono poszczególne odbiorniki i w oparciu o wzór (20) dokonano obliczeń, których wyniki zestawiono w tabeli 8.

**Tabela 8.** Zestawienie odbiorników i wyznaczenie maksymalnego natężenie prądu  $I_{obc}$  metodą obliczeniową dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric

Odbiornik	$I_{Ni}$ [A]	$k_{ti}$	$k_{obc i}$	$I_{obc i}$ [A]
Światła postojowe - przód LED	0,15	0,50	1,00	0,075
Światła postojowe - tył LED	0,07	0,50	1,00	0,035
Światła obrysowe - bok LED	0,50	0,50	1,00	0,250
Światła mijania - LED	2,15	0,50	1,00	1,075
Światła drogowe - LED	1,80	0,01	1,00	0,018
Światła dzienne - LED	0,98	0,50	1,00	0,490
Światło przeciwmgielne - tył LED	0,35	0,01	1,00	0,004
Światła cofania - LED	0,35	0,01	1,00	0,004
Światła STOP - LED	0,57	0,10	1,00	0,057
Kierunkowskaz - przód, bok LED	0,50	0,05	1,00	0,025
Kierunkowskaz - tył LED	0,57	0,05	1,00	0,029
Oświetlenie tablicy rejestracyjnej - LED	0,71	0,50	1,00	0,357
Oświetlenie wewnętrzne LED 30%	3,21	0,10	1,00	0,321
Oświetlenie wewnętrzne LED 100%	6,43	0,02	1,00	0,129
Oświetlenie kabiny kierowcy	0,27	0,01	1,00	0,003
Oświetlenie wejść LED	0,54	0,15	1,00	0,081
Wycieraczki	5,00	0,02	0,80	0,080
Sygnał dźwiękowy	5,50	0,01	1,00	0,055
Sterowanie lusterek	1,00	0,01	1,00	0,010
Ogrzewanie lusterek zewnętrznych	3,00	0,03	1,00	0,090
Ogrzewanie szyb	3,00	0,03	1,00	0,090
Radio	5,00	1,00	0,40	2,000
Tachograf/Symulator tachografu	4,20	1,00	0,01	0,042
Układ sterowania drzwi	5,00	0,10	1,00	0,500
Układ sterowania ogrzewania	4,00	0,01	1,00	0,040
Ogrzewanie fotela kierowcy	3,00	0,03	1,00	0,090
Dmuchała powietrza kierowcy	7,86	0,60	0,50	2,357
Dmuchały powietrza nagrzewnicy pasażerskiej	8,00	0,50	1,00	4,000
Klimatyzacja przestrzeni pasażerskiej (z funkcją grzania)	60,00	0,50	0,50	15,000
Układ zawieszenia	4,30	0,02	1,00	0,086
Układu hamulcowy	15,00	0,10	0,30	0,450
System multipleksowy	2,50	1,00	1,00	2,500
Inne czujniki i zawory	2,00	1,00	1,00	2,000
System informacji pasażerskiej, monitoring	28,57	1,00	0,50	14,286
Przetwornica DC/DC 24V i DC/AC 3x400 V AC	1,30	1,00	1,00	1,300
Falownik silnika trakcyjnego	8,00	1,00	1,00	8,000
Napęd pompy układu wspomagania kierownicy (24 V)	87,50	1,00	0,25	21,875

Napęd pantografu	23,50	0,01	1,00	0,235
Układ zarządzania temperaturą akumulatorów trakcyjnych	20,00	1,00	0,70	14,000
Wentylatory chłodzenia układu napędu	96,00	0,80	0,60	46,080
Sterowniki akumulatorów trakcyjnych	5,20	1,00	1,00	5,200
Pompa obiegowa chłodzenia napędu	20,00	1,00	0,60	12,000
Pulpit kierowcy	1,44	1,00	0,70	1,008
Gateway	0,20	1,00	1,00	0,200
System kamer wstecznych	4,00	1,00	0,80	3,200
AVAS - dźwiękowy system ostrzegania	2,70	0,10	1,00	0,270
Sterowanie rozdzielni HV	21,00	1,00	0,30	6,300
Ładowanie akumulatorów 24 V	25,00	0,30	0,50	3,750
<b><math>I_{obc}</math> [A]</b>	<b>170,045</b>			

Źródło: opracowano na podstawie [4]

Współczynniki  $k_{ti}$  i  $k_{obci}$ , mogą przyjmować różne wartości w zależności od miejsca użytkowania pojazdu (klimatu, pory roku, miasta). Można wykonać dedykowane obliczenia dla konkretnego klienta i dla skrajnych w aspekcie temperatury pór roku, jednak przy założeniu, że projektowany pojazd stanowi uniwersalną platformę dla rynku europejskiego, powinien on spełniać oczekiwania większości operatorów występujących na danym terenie. Tego typu dedykowane obliczenia wykonuje się na etapie oferowania pojazdów w sytuacji, kiedy specyficzne wymagania klienta znacząco zwiększają zapotrzebowanie na moc instalacji 24 V pojazdu. Wówczas jeśli obliczenia wskazują, że standardowa przetwornica DC/DC 24 V jest niewystarczająca, powstaje dedykowane rozwiązanie. W tabeli 8 przyjęto współczynniki uśrednione dla rynku europejskiego, co wg doświadczenia firmy Solaris, jest metodą wystarczającą. Odbiorniki o ciągłym charakterze pracy zaznaczono kolorem szarym, o długotrwałym charakterze pracy – beżowym, a te o dorywczym charakterze pracy – kolorem zielonym. Wiele odbiorników pracuje w zmiennych warunkach obciążenia i w takich przypadkach do obliczeń wskazano wartości średnie. Wg tak przeprowadzonych obliczeń  $I_{obc} = 170,045$  A. Oznacza to, że dobierana przetwornica powinna charakteryzować się maksymalnym prądem  $I_{max} > I_{obc}$ . Zachowując krok 10 A otrzymano  $I_{max} = 180$  A. W literaturze znaleźć można informacje, że odbiorniki o ciągłym i długotrwałym charakterze pracy powinny móc być zasilone z alternatora na biegu jałowym silnika konwencjonalnego [49]. Maksymalne natężenie prądu jest wówczas o około połowę niższe od znamionowego natężenia prądu ładowania. W autobusie elektrycznym, w którym zamontowano przetwornicę DC/DC 24 V, nie występują tego rodzaju niedogodności,

gdyż natężenie prądu maksymalnego jest ciągle dostępne [5]. W związku z tym nie ma potrzeby stosowania dodatkowych współczynników zwiększających parametr  $I_{\max}$ .

### 2.3.3. Metoda statystyczna

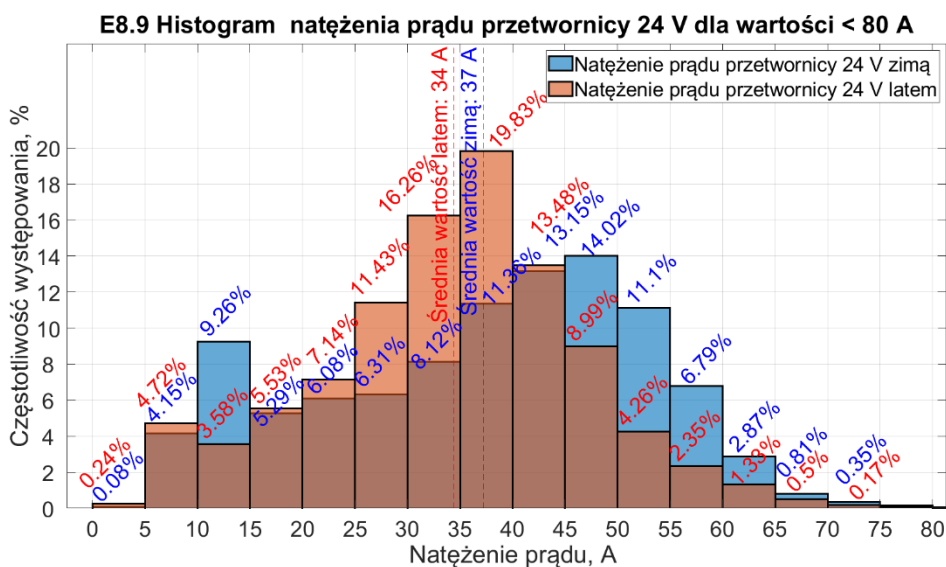
Wyznaczenie wartości zapotrzebowania na moc dla instalacji 24 V dla nowo projektowanego autobusu elektrycznego można zrealizować bazując na analizie statystycznej danych pochodzących z floty pojazdów o zbliżonym wyposażeniu oraz miejscu użytkowania. Metoda poniżej opisana oraz założenia poczynione w trakcie analizy są efektem autorskich badań i doświadczenia. Dokładność metody zależy od znajomości konfiguracji analizowanych autobusów. W zależności od tego, metoda statystyczna może stanowić uzupełnienie metody obliczeniowej lub być jedyną zastosowaną w procesie projektowania. Pierwszym krokiem tej metody jest wyznaczenie grupy pojazdów, które zostaną poddane analizie. W związku z faktem, że projektowany autobus Solaris Urbino 9 LE electric przeznaczony jest na rynek europejski, to grupa analizowanych pojazdów również musi być eksploatowana na tym terenie. Obszar ten pokrywa kilka stref klimatycznych w związku z tym należy tak wybrać grupy referencyjne autobusów, aby zbliżona ich liczba reprezentowała poszczególne strefy. Jest to niezbędne ponieważ odbiorniki 24 V montowane w autobusach miejskich odpowiedzialne są za układy, których zapotrzebowanie na moc zmienia się w zależności od warunków atmosferycznych. Należą do nich układ chłodzenia napędu czy układy odpowiedzialne za komfort tj. ogrzewanie i klimatyzacja. Z tego samego powodu, należy uwzględnić zmienność pór roku. Na podstawie doświadczenia określić można, że najwyższe zapotrzebowanie na moc w instalacjach 24 V autobusów miejskich na terenie Europy występuje podczas zimy oraz lata, a więc dla tych pór roku powinna zostać wykonana analiza. Oczywiście analizie można poddać okres całego roku, jednak ważniejsza od ilości analizowanych danych jest pewność danych. W zależności od metod oceny jakości danych, okres analizy może być rozszerzany. Należy jednak przy tym pamiętać aby analizie poddawać równą liczbę miesięcy z poszczególnych pór roku aby dane wejściowe jednego okresu nie stały się dominujące. Jak wcześniej wspomniano, analizowana flota autobusów musi występować w podobnej konfiguracji do autobusu nowo projektowanego pod względem odbiorników 24 V. Wszelkie różnice muszą być zidentyfikowane i, o ile stanowią znaczący udział zapotrzebowania na moc całego pojazdu, uwzględnione w dalszej części analizy. W oparciu o wymienione kryteria należy

stworzyć reprezentatywną grupę referencyjną autobusów, które zostaną poddane analizie. Liczba ich nie może być zbyt mała oraz należy zadbać o różnorodność pod względem miejsca eksploatacji. W przeciwnym razie unikalne czynniki występujące u konkretnego klienta bądź w danym mieście, mogą stać się dominujące. Podsumowując, tworząc reprezentatywną grupę pojazdów w celu poddania jej analizie zapotrzebowania na moc dla instalacji 24 V, należy uwzględnić następujące kryteria:

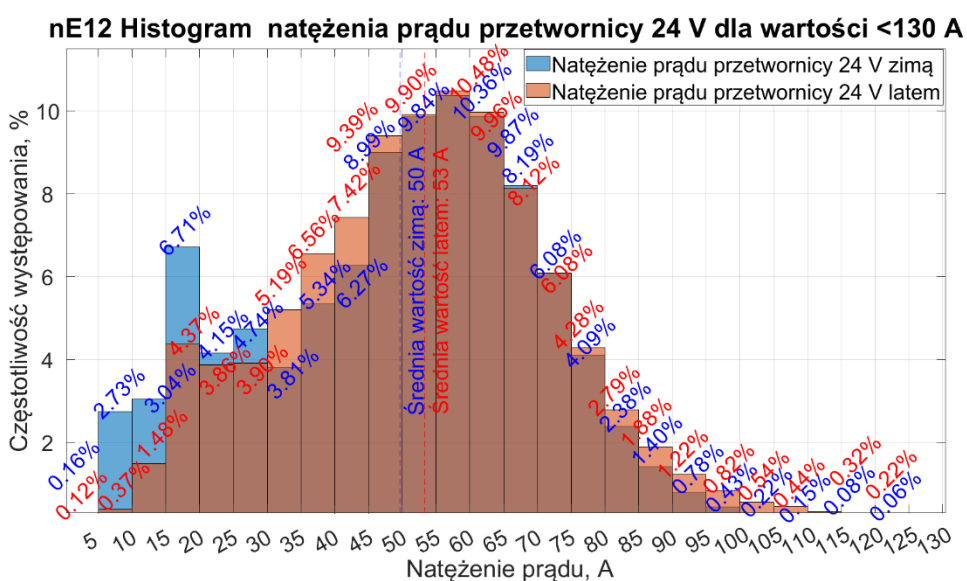
- miejsce eksploatacji pojazdów,
- strefa klimatyczna eksploatacji pojazdów,
- pory roku eksploatacji pojazdów,
- konfiguracja odbiorników 24 V eksploatowanych pojazdów,
- różnorodność analizowanych pojazdów,
- liczba analizowanych pojazdów.

Na potrzeby projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric, jako najbardziej zbliżoną konstrukcję wybrano autobusy Solaris Urbino 8,9 LE electric. Uwzględniając powyższe kryteria wytypowano 10 autobusów eksploatowanych na terenie Polski, Litwy, Francji i Hiszpanii. Pojazdy tego typu, wyposażone w system monitorowania poboru energii, nie występowały w krajach zlokalizowanych na północy Europy, a te zlokalizowane na południu nie stanowiły wystarczającej liczby. Z tego powodu wytypowano kolejny model pojazdu, którym został Solaris Urbino 12 electric. Jako referencyjną grupę wytypowano 10 autobusów eksploatowanych na terenie Polski, Niemiec, Włoch, Rumunii, Węgier oraz Norwegii. Dla obu wytypowanych grup pojazdów autor rozprawy wykonał analizę natężenia prądu pobieranego w instalacji 24 V (w autobusach Solaris monitorowane jest bezpośrednio natężenie prądu, nie ma więc konieczności przekształcania wartości ze wzoru na moc). Histogramy przygotowano w środowisku MATLAB dla pory letniej, reprezentowanej w analizie przez miesiąc sierpień oraz zimy, reprezentowanej przez miesiąc grudzień. Wyniki przedstawiono na rysunkach 20 i 21.

Wskazano najczęściej występujące przedziały, te o wartości zbliżonej lub większej od 50%, a także wyznaczono odchylenia standardowe dla poszczególnych histogramów i określono zakresy i częstość występowania dla przedziału zbliżonego do szerokości  $1\sigma$ . Dla autobusu Urbino 8,9 LE electric odchylenie standardowe dla okresu letniego wyniosło  $\sigma_{8,9_L} = 12,64$  A, a dla zimowego  $\sigma_{8,9_Z} = 15,52$  A. Dla autobusu Urbino 12 electric odchylenie standardowe dla okresu letniego wyniosło  $\sigma_{12_L} = 20,52$  A, a dla zimowego  $\sigma_{12_Z} = 21,09$  A. Wyniki analizy statystycznej przedstawiono w tabeli 9.



**Rys. 20.** Histogram natężenia prądu pobieranego w instalacji 24 V DC grupy autobusów Solaris Urbino 8,9 LE electric w okresie zimy i lata  
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 21.** Histogram natężenia prądu pobieranego w instalacji 24 V DC grupy autobusów Solaris Urbino 12 electric w okresie zimy i lata  
Źródło: opracowanie własne

**Tabela. 9.** Analiza statystyczna zakresów natężenia prądu pobieranego przez autobusy Solaris Urbino 8,9 LE electric i Urbino 12 electric dla okresu lata i zimy

Autobus i pora roku pomiarów	Najczęstszy zakres		Zakres ~50%		Zakres ~1σ	
	Zakres prądu [A]	Częstotliwość występowania [%]	Zakres prądu [A]	Częstotliwość występowania [%]	Zakres prądu [A]	Częstotliwość występowania [%]
E8,9_Lato	35-40	19,83	30-45	49,57	20-50	77,13
E8,9_Zima	45-50	14,02	35-55	49,63	20-55	70,14
E12_Lato	55-60	10,48	40-70	55,27	30-75	73,10
E12_Zima	55-60	10,36	40-70	53,52	25-70	67,41

Źródło: opracowanie własne

W tego typu analizach należy dokładnie zidentyfikować istotne różnice w pojazdach. Taką istotną różnicą w instalacji 24 V DC pomiędzy autobusami Urbino 8,9 LE electric a Urbino 12 electric jest zasilanie układu chłodzenia silników trakcyjnych. W poddanych analizie autobusach 12-sto metrowych silniki trakcyjne chłodzone są cieczą, która z kolei chłodzona jest w chłodnicy wyposażonej w pompę obiegową cieczy oraz wentylatory zasilane z instalacji 24 V. Silnik trakcyjny w krótszym autobusie chłodzony jest natomiast powietrzem z wentylatora zasilanego z instalacji 3x400 V AC. W dłuższym autobusie, należy się także spodziewać większego poboru mocy na ogrzewanie i klimatyzację, a także na oświetlenie. Tłumaczy to różnice w zapotrzebowaniu na moc z instalacji 24 V DC w obu modelach pojazdów. Nowo projektowany autobus Urbino 9 LE electric wyposażony będzie w silnik oraz urządzenia energoelektroniczne chłodzone cieczą. Dobre chłodnice posiadają wentylatory zasilane z instalacji 24 V. Z tabeli 8 wyczytać można, że obliczeniowe natężenie prądu wentylatorów układów chłodzenia  $I_{obc} = 46,080$  A. Wartość tę można wprost dodać do najczęściej występujących obciążeń w autobusie Urbino 8,9 LE electric (taka chłodnica w tym autobusie nie występuje) oraz nieco pomniejszoną (ok. 10 A mniejszą) czyli 35 A do autobusu 12-sto metrowego (różnica ta wynika z tego, że autobus ten posiada chłodnicę silnika trakcyjnego zasilaną z instalacji 24 V i nie posiada układów energoelektronicznych chłodzonych cieczą). Wprowadzając powyższe korekty otrzymano szacowaną wartość najczęstszych przedziałów dla nowo projektowanego autobusu Solaris Urbino 9 LE electric (tab. 10).

**Tabela 10.** Szacowane zakresy wartości natężeń prądu pobieranego przez autobus Solaris Urbino 9 LE electric na podstawie analizy statystycznej autobusów Urbino 8,9 LE electric i Urbino 12 electric dla okresu lata i zimy.

Autobus i pora roku pomiarów	Najczęstszy zakres	Zakres ~50%	Zakres $\sim 1\sigma$
	Zakres prądu [A]	Zakres prądu [A]	Zakres prądu [A]
E8,9_Lato -> E9_Lato	80-85	75-90	65-95
E8,9_Zima -> E9_Zima	90-95	80-100	65-100
E12_Lato -> E9_Lato	90-95	75-105	65-110
E12_Zima -> E9_Zima	90-95	75-105	60-105

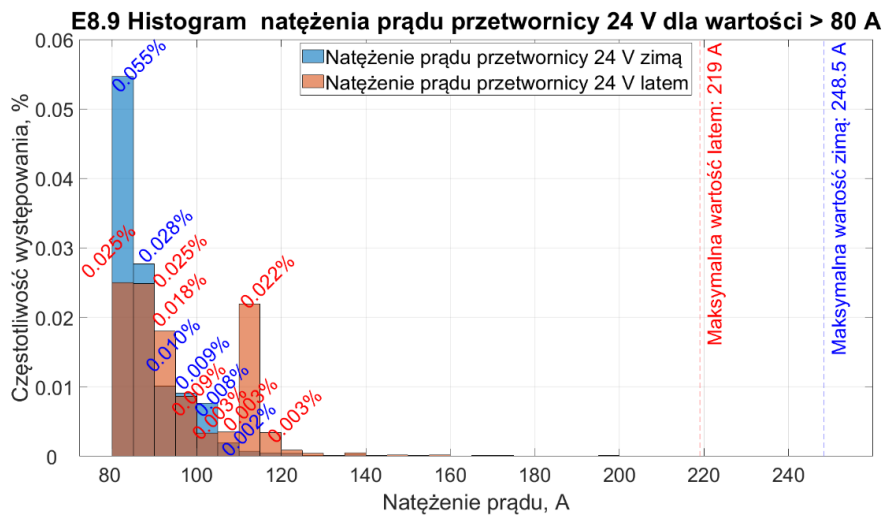
Źródło: opracowanie własne

Po zrealizowanych korektach stwierdzono że obliczenia wykonane na bazie analizy statystycznej autobusu Urbino 8.9 LE electric są podobne do tych wykonanych na bazie autobusu Urbino 12 electric. Nieco wyższe wartości dla obliczeń na bazie dłuższego autobusu wynikają z długości pojazdu i związanego z tym większego poboru mocy.

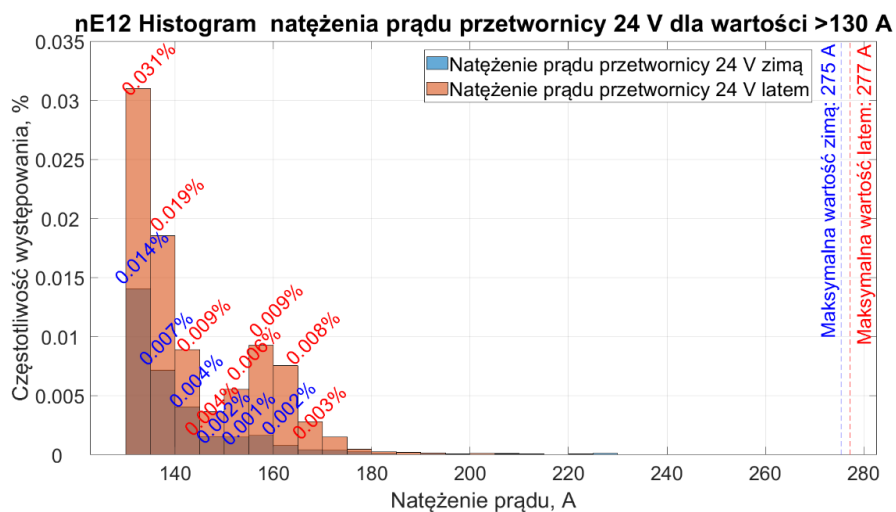
Przetwornice DC/DC 24 V charakteryzują się dość szerokim zakresem wysokiej sprawności dlatego zaleca się, aby jej sprawność była najwyższa w zakresie

pokrywającym wszystkie wartości szacowane dla  $\sim 1\sigma$  obu modeli pojazdów dla okresu lata i zimy. Tak określony zakres zawiera się w przedziale 60–110 A.

Istotnym jest, że ciągle zasilanie pokładowe 24 V jest niezbędne dla prawidłowego działania autobusu miejskiego. Należy więc określić maksymalne jednoczesne pobory prądu przez odbiorniki, aby nie dopuścić do awarii pojazdu. W tym celu autor rozprawy wykonał analizę najwyższych wartości natężenia prądu dla obu grup badanych pojazdów, uwzględniając obciążenia występujące mniej niż 0,1% czasu eksploatacji. Histogramy przedstawiono na rysunkach 22 i 23.



**Rys. 22.** Histogram natężenia prądu > 80 A pobieranego w instalacji 24 V DC grupy autobusów Solaris Urbino 8,9 LE electric w okresie zimy i lata  
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 23.** Histogram natężenia prądu > 130 A pobieranego w instalacji 24 V DC grupy autobusów Solaris Urbino 12 electric w okresie zimy i lata  
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie histogramów stwierdzono, że maksymalne wartości natężenia prądu występują w zakresie pojedynczych zdarzeń dla całej analizowanej populacji pojazdów. Mogą to być wartości chwilowe występujące podczas załączania odbiorników lub dłuższe, sporadycznie występujące zdarzenia. Należy pamiętać, że elektryczny autobus miejski wyposażony jest w akumulatory pokładowe zasilające instalację 24 V. Ich zadaniem jest zasilenie odbiorników gdy przetwornica DC/DC jest wyłączona (akumulatory trakcyjne są rozłączone), ale także krótkotrwałe uzupełnienie niedoborów mocy w sytuacjach gdy zapotrzebowanie przekracza maksymalną moc tej przetwornicy. Nie ma więc potrzeby przewymiarowania parametrów przetwornicy na krótkotrwałe, nie często występujące sytuacje, gdyż akumulatory pokładowe uzupełnią brakującą moc. Dla określenia, które sytuacje są krótkotrwałe i nie częste, dokonano analizy szczegółowej przypadków ilości zdarzeń oraz ich minimalnych, maksymalnych, średnich i mediany czasów wystąpień. Dla uzyskania odpowiedniej precyzji ustalono krok 10 A. Wyniki dla obu grup przedstawiono w tabelach 11, 12, 13, 14.

**Tabela 11.** Analiza zdarzeń obciążenia natężeniem prądu >80 A dla autobusów Solaris Urbino 8,9 LE electric dla miesiąca sierpnia

Zakres, A	Liczba zdarzeń	Maks. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Min. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Średni czas zdarzenia, hh:mm:ss	Mediana czasu zdarzenia, hh:mm:ss
0-90	48387	00:15:53.8330	00:00:00.0070	00:00:03.6947	00:00:01.1010
90-100	28928	00:09:19.6040	00:00:00.0620	00:00:02.9953	00:00:01.1000
100-110	11742	00:03:10.5040	00:00:00.0240	00:00:01.8005	00:00:01.0000
110-120	4664	00:03:47.1070	00:00:00.0240	00:00:01.6833	00:00:01.0010
120-130	1041	00:00:07.1000	00:00:00.2210	00:00:00.9443	00:00:00.6000
130-140	256	00:00:04.7000	00:00:00.5000	00:00:00.7812	00:00:00.6000
140-150	131	00:00:04.6000	00:00:00.5000	00:00:00.9549	00:00:00.6000
150-160	56	00:00:04.0000	00:00:00.5000	00:00:00.8946	00:00:00.6000
160-170	16	00:00:01.6000	00:00:00.5000	00:00:00.6748	00:00:00.6000
170-180	6	00:00:01.1000	00:00:00.5000	00:00:00.6331	00:00:00.5495
180-190	2	00:00:00.6000	00:00:00.5000	00:00:00.5500	00:00:00.5500
190-200	2	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000
200-210	2	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000
210-220	1	00:00:00.5990	00:00:00.5990	00:00:00.5990	00:00:00.5990
>220	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000

Źródło: opracowanie własne



**Tabela 12.** Analiza zdarzeń obciążenia natężeniem prądu >80 A dla autobusów Solaris Urbino 8,9 LE electric dla miesiąca grudnia

Zakres, A	Liczba zdarzeń	Maks. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Min. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Średni czas zdarzenia, hh:mm:ss	Mediana czasu zdarzenia, hh:mm:ss
80-90	47872	00:18:30.6240	00:00:00.0220	00:00:01.9488	00:00:01.0010
90-100	14178	00:07:35.6230	00:00:00.0150	00:00:01.7549	00:00:00.6010
100-110	4548	00:07:38.3180	00:00:00.5000	00:00:01.9447	00:00:00.6000
110-120	2406	00:01:03.5010	00:00:00.1760	00:00:01.4263	00:00:00.6000
120-130	778	00:00:10.4000	00:00:00.0750	00:00:01.0113	00:00:00.6000
130-140	304	00:00:06.5000	00:00:00.4750	00:00:00.7910	00:00:00.6000
140-150	178	00:00:37.0780	00:00:00.0750	00:00:01.0626	00:00:00.6000
150-160	62	00:00:10.8000	00:00:00.2790	00:00:00.9335	00:00:00.6000
160-170	15	00:00:00.9000	00:00:00.5000	00:00:00.5734	00:00:00.5990
170-180	13	00:00:01.2000	00:00:00.5000	00:00:00.7079	00:00:00.6000
180-190	4	00:00:00.6000	00:00:00.5000	00:00:00.5250	00:00:00.5000
190-200	1	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000
200-210	1	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000
210-220	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000
220-230	1	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000
230-240	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000
240-250	1	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000
>250	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 13.** Analiza zdarzeń obciążenia natężeniem prądu >130 A dla autobusów Solaris Urbino 12 electric dla miesiąca sierpnia

Zakres, A	Liczba zdarzeń	Maks. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Min. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Średni czas zdarzenia, hh:mm:ss	Mediana czasu zdarzenia, hh:mm:ss
130-140	24891	00:03:41.1070	00:00:00.0010	00:00:02.1044	00:00:01.0000
140-150	14858	00:06:10.0080	00:00:00.0030	00:00:02.5306	00:00:01.1000
150-160	7415	00:06:23.4170	00:00:00.2510	00:00:02.8665	00:00:01.1000
160-170	2900	00:01:24.5020	00:00:00.0520	00:00:01.7827	00:00:00.6010
170-180	1749	00:02:56.4040	00:00:00.1520	00:00:01.9706	00:00:00.6050
180-190	955	00:01:26.5020	00:00:00.5000	00:00:02.7436	00:00:01.0970
190-200	437	00:00:13.0020	00:00:00.5000	00:00:01.7373	00:00:01.0000
200-210	111	00:00:03.4000	00:00:00.5000	00:00:00.8232	00:00:00.6000
210-220	73	00:00:07.8020	00:00:00.5000	00:00:00.8519	00:00:00.5990
220-230	31	00:00:01.6020	00:00:00.5000	00:00:00.6453	00:00:00.5030
230-240	12	00:00:01.2010	00:00:00.5000	00:00:00.6252	00:00:00.5014
240-250	11	00:00:01.6000	00:00:00.5000	00:00:00.6542	00:00:00.5990
250-260	4	00:00:01.1000	00:00:00.5000	00:00:00.6750	00:00:00.5500
260-270	2	00:00:00.5010	00:00:00.5000	00:00:00.5004	00:00:00.5004
270-280	2	00:00:00.6000	00:00:00.5000	00:00:00.5500	00:00:00.5500
>280	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 14.** Analiza zdarzeń obciążenia natężeniem prądu >130 A dla autobusów Solaris Urbino 12 electric dla miesiąca grudzień

Zakres, A	Liczba zdarzeń	Maks. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Min. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Średni czas zdarzenia, hh:mm:ss	Mediana czasu zdarzenia, hh:mm:ss
130-140	19610	00:04:05.4040	00:00:00.0010	00:00:02.1752	00:00:01.0000
140-150	11382	00:02:26.8010	00:00:00.0120	00:00:02.5404	00:00:01.0000
150-160	5375	00:04:15.6969	00:00:00.0050	00:00:02.5529	00:00:01.0020
160-170	2339	00:00:53.0010	00:00:00.3020	00:00:01.7294	00:00:00.6000
170-180	1502	00:01:46.9050	00:00:00.5000	00:00:01.8928	00:00:00.6010
180-190	773	00:01:36.7010	00:00:00.5000	00:00:02.2473	00:00:00.6000
190-200	337	00:01:10.8080	00:00:00.5000	00:00:01.7927	00:00:00.6000
200-210	125	00:00:02.8000	00:00:00.5000	00:00:00.7407	00:00:00.5990
210-220	69	00:00:04.8010	00:00:00.5000	00:00:00.7580	00:00:00.5980
220-230	36	00:01:04.6870	00:00:00.5000	00:00:02.5774	00:00:00.6000
230-240	16	00:00:01.0000	00:00:00.5000	00:00:00.5996	00:00:00.5990
240-250	10	00:00:01.0990	00:00:00.5000	00:00:00.6397	00:00:00.5500
250-260	6	00:00:00.6020	00:00:00.5000	00:00:00.5833	00:00:00.5995
260-270	2	00:00:01.1980	00:00:00.5010	00:00:00.8495	00:00:00.8495
270-280	1	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000
>280	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000

Źródło: opracowanie własne

Analizując dane z tabel 11–14 zauważono, że w każdym z przypadków istnieje taki 10-cio amperowy przedział natężenia prądu, w którym maksymalny czas zdarzenia wynosi > 1 min (oznaczony w tabelach kolorem szarym), a dla którego kolejny przedział (oznaczony kolorem beżowym) charakteryzuje się maksymalnym czasem znacząco niższym przy czym liczba zdarzeń maleje co najmniej dwukrotnie. W tabeli 14 dla przedziału oznaczonego kolorem zielonym zauważyć można nietypowy wzrost maksymalnego czasu zdarzenia powyżej 1 min. Mając na uwadze medianę dla tego przedziału oraz trend zmian, wnioskować można, że w tym zakresie wystąpił błąd przypadkowy lub błąd związany z jakością danych. Uwzględniając, że dla obciążeń występujących rzadko (nie częściej niż średnio 10 razy dziennie / pojazd) i trwających krócej niż 1 min, możliwe jest uzupełnienie brakującej mocy z akumulatorów. Wówczas górną wartość zakresu, oznaczonego kolorem szarym w powyższych tabelach, można interpretować jako wymaganą wartość natężenia prądu maksymalnego dostępnego z przetwornicy DC/DC w danych warunkach. Należy pamiętać o różnicach w konfiguracji pojazdów. Jak wspomniano wcześniej, główną różnicą pomiędzy autobusem Urbino 8,9 LE electric i nowo projektowanym Urbino 9 LE electric jest układ chłodzenia silnika trakcyjnego i urządzeń energoelektronicznych. Z tabeli 8 odczytano,

że znamionowe natężenie prądu wentylatorów układu chłodzenia  $I_N = 96$  A, natomiast współczynnik czasu wykorzystania dla tego odbiornika  $k_{ti} = 0,8$ . Dla skrajnych warunków należy założyć, że współczynnik obciążenia  $k_{obci} = 1$ . Wówczas otrzymuje się wartość  $I_{obci} = 76,8$  A. Jest to zarazem wartość natężenia prądu maksymalnego, występująca przy maksymalnej prędkości wentylatorów uwzględniając współczynnik czasu wykorzystania reprezentujący w tym przypadku prawdopodobieństwo długotrwałego wystąpienia zdarzenia. Dodając tę wartość do wymaganej wartości natężenia prądu maksymalnego (oznaczonych kolorem szarym w tabeli 11 i 12) otrzymuje się przedział dla natężenia prądu maksymalnego 186,8–196,8 A, czyli szacowany najgorszy możliwy przypadek dla autobusu Urbino 9 LE electric. Analogicznie należy postąpić dla autobusu 12-sto metrowego, jednak konieczne jest zwrócenie uwagi na to, że pojazd ten wyposażony jest już w chłodnicę silnika trakcyjnego, a układ ogrzewania i klimatyzacji stanowi większe obciążenie niż w projektowanym autobusie Urbino 9 LE electric. Uwzględniając te różnice konstrukcyjne pojazdów oszacowano różnice natężenia prądu obciążenia pomiędzy nimi. Uzyskano wartość ok. 6 A więcej w autobusie 12-sto metrowym. Oznacza to, że wartości w praktyce się bilansują i można założyć, że szacowana wartość maksymalnego natężenia prądu obciążenia projektowanego Urbino 9 LE electric będzie nie większa niż wartość wynikająca ze statystyk Urbino 12 electric (oznaczonych kolorem szarym w tabeli 13 i 14). Z tego założenia otrzymuje się przedział dla natężenia prądu maksymalnego 190-200 A.

#### **2.3.4. Określenie parametrów przetwornicy DC/DC 24 V**

W podrozdziałach 2.3.2. i 2.3.3. przedstawiono dwie metody wyznaczania zapotrzebowania na moc dla instalacji 24 V DC, metodę obliczeniową i statystyczną. Dla uzyskania większej pewności należy stosować obie metody jako wzajemnie się uzupełniające. Jeśli różnice w wynikach tych metod nie różnią się znacząco (poniżej 20%) to przy doborze przetwornicy DC/DC 24 V należy uwzględnić wyższe wartości parametru natężenia prądu maksymalnego. W przeciwnym razie należy ponownie przeanalizować dane, gdyż zachodzi duże prawdopodobieństwo, że na etapie obliczeń czy analiz popełniono błąd. Wartości  $I_{max}$  wyznaczone dwiema metodami to 180 A dla obliczeniowej i 200 A dla statystycznej. Różnica stanowi 10%. Jako, że spełniony jest warunek zakładający że różnica między tymi wartościami powinna być mniejszej niż

20%, można postawić wymaganie, że przetwornica DC/DC 24 V dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric powinna zostać tak dobrana, aby jej maksymalna wartość natężenia prądu  $I_{\max}$  nie była niższa niż 200 A (wartość wyższa spośród wyznaczonych przedstawionymi metodami).

Przetwornica DC/DC 24 V musi spełniać również wymagania postawione wszystkim elementom energoelektronicznym nowoprojektowanego autobusu, jakie opisano w podrozdziale 2.1. Należą do nich zakres napięć HV zawierający się w przedziale 510–750 V DC, zakres napięć obwodu zasilania i sterowania wynoszący 16–32 V DC, komunikacja CAN zgodna z normą SAE J1939, obudowa elementu wykonana w stopniu ochrony IP65 wg normy EN 60529:2018 oraz zgodność z regulaminami R10 i R100 EKG ONZ. Dodatkowo musi spełniać wymagania stawiane przetwornicom DC/DC 24 V dla autobusów elektrycznych, tj.:

- separacja galwaniczna: pomiędzy wejściem a wyjściem przetwornicy,
- zabezpieczenie przeciążeniowe: nie wyłączające przetwornicy tylko ograniczające napięcie wyjściowe,
- zabezpieczenie zwarciove,
- funkcjonalność sterowania napięciem: możliwość nastawy wartości napięcia wyjściowego przez Główny Komputer Napędu za pomocą sygnałów CAN zgodnie z SAE J1939,
- funkcjonalność raportowania za pomocą sygnałów CAN zgodnie z SAE J1939: wartości napięć, natężenia prądu, mocy, statusów funkcji realizowanych przez przetwornicę oraz kodów błędów.

Wszystkie wymienione powyżej wymagania stanowią kryteria, których niespełnienie powoduje wykluczenie danej przetwornicy z dalszych rozważań.

### **2.3.5. Określenie parametrów przetwornicy DC/AC 3x400 V AC**

W projektowanym autobusie Urbino 9 LE electric znajdować się będą także odbiorniki wyższych mocy, dla których podjęto decyzję, że ze względu na udział strat nie będą zasilane z instalacji 24 V DC. Należą do nich kompresor powietrza, układ chłodzenia akumulatorów trakcyjnych, sprężarka klimatyzacji i bojler. Podjęto również decyzję, żeby urządzenia te były podłączone bezpośrednio do linii HV DC bądź posiadały własne, podłączone do tej linii, dedykowane przetwornice DC/AC. Podłączenie odbiorników do instalacji o wyższym napięciu (510–750 V DC) znacznie obniża wartość natężenia prądu,

co z kolei ogranicza straty energii elektrycznej [52]. Również zastosowanie dedykowanej przetwornicy DC/AC, dobranej do odbiornika poprawia sprawność całego układu. Odbiorniki, które dobrano z własnymi przetwornicami nie są przedmiotem niniejszej analizy i badań. Elementem, który nie posiadał własnej przetwornicy DC/AC był napęd sprężarki klimatyzacji i ten stał się przedmiotem niniejszej analizy. W celu właściwego doboru przetwornicy DC/AC 3x400 V AC należy poznać zapotrzebowanie na moc odbiornika. Zgodnie z założeniami, projektowany autobus będzie mógł być wyposażony w konwencjonalną klimatyzację przestrzeni pasażerskiej lub w wersję z pompą ciepła. Ze względu na niezbyt duże różnice w poborach mocy obu urządzeń celem stało się uniwersalne dobranie przetwornicy DC/AC 3x400 V AC. Z dokumentacji urządzeń można wyczytać, że moc czynna obciążenia wynosi 5,8 kW dla pierwszego urządzenia i 7,2 kW dla drugiego, przy częstotliwości zasilania 50 Hz. Dla mocy czynnej obwodu trójfazowego zachodzi zależność opisana wzorem (21) [51].

$$P = \sqrt{3} \cdot U_P \cdot I_P \cdot \cos \varphi \quad (21)$$

gdzie:  $P$  – moc czynna [W],  $U_P$  – wartość skuteczna napięcia międzyfazowego [V],  $I_P$  – wartość skuteczna natężenia prądu przewodowego [A],  $\cos \varphi$  - cosinus przesunięcia fazowego między wartością skuteczną napięcia i natężenia prądu

Przy założeniu, że dla wspomnianych napędów sprężarki  $\cos \varphi = 0,9$ , z przekształcenia tego wzoru obliczyć można prąd obciążenia maksymalnego, który dla sprężarki klimatyzacji konwencjonalnej wynosi  $I_{KK} = 9,3$  A, a dla klimatyzacji z pompą ciepła  $I_{KPC} = 11,5$  A. W związku z założeniem, że bez względu na konfigurację klimatyzacji, stosowana ma być ta sama przetwornica DC/AC 400 V AC, jako wartość maksymalną natężenia prądu tej przetwornicy należy wskazać wartość nie mniejszą niż 11,5 A.

Analogicznie jak pozostałe urządzenia energoelektroniczne również przetwornica DC/AC 3x400 V AC musi spełniać wymagania co do zakresu napięć HV w przedziale 510–750 V DC, zakresu napięć obwodu zasilania i sterowania wynoszącego 16–32 V DC, komunikacji CAN zgodnej z normą SAE J1939, obudowy elementu wykonanej w stopniu ochrony IP65 wg normy EN 60529:2018 oraz zgodności z regulaminami R10 i R100 EKG ONZ. Dodatkowo musi spełniać wymagania stawiane przetwornicom DC/AC 3x400 V AC dla autobusów elektrycznych, tj.:

- sposób sterowania: bezczujnikowe sterowanie wektorowe silnika, z funkcją kontroli momentu obrotowego i prędkości obrotowej za pomocą sygnałów CAN zgodnie z SAE J1939,
- zabezpieczenie przeciążeniowe,
- zabezpieczenie zwarciovowe,
- zabezpieczenie termiczne: z funkcją ograniczenia momentu obrotowego silnika,
- funkcjonalność „miękkiego startu”,
- funkcjonalność raportowania za pomocą sygnałów CAN zgodnie z SAE J1939: wartości napięć, natężenia prądu, mocy, momentu obrotowego i prędkości obrotowej, temperatury silnika, statusów funkcji realizowanych przez przetwornicę oraz kodów błędów.

Wszystkie wymienione powyżej wymagania stanowią kryteria, których niespełnienie powoduje wykluczenie danej przetwornicy z dalszych rozważań.

### **2.3.6. Dobór przetwornicy DC/DC 24 V**

Przeanalizowano 5 przetwornic DC/DC 24 V DC różnych dostawców. W tym 4 z nich spełniły postawione wymagania. Aby wskazać tę najlepszą, analogicznie jak w przypadku doboru silnika trakcyjnego, co przedstawiono w podrozdziale 2.2.3., posłużono się, zaproponowaną przez autora rozprawy, optymalizacją wielokryterialną metodą sum ważonych i normalizacją zmiennych metodą unitaryzacji zerowanej. Podobnie stworzono listę kryteriów oceny, ważnych z punktu widzenia przedsiębiorstwa, które podzielono na 2 główne grupy: techniczne i ekonomiczne. Do tych pierwszych zaliczono: zakres napięcia wejściowego i wyjściowego, maksymalny prąd wyjściowy oraz jego stosunki do masy i objętości, masę a także wymiary przetwornicy mierzone jako objętość potrzebną do jej zabudowy. Zakresy napięć wejściowych, wyjściowych oraz maksymalny prąd wyjściowy stanowią wymogi podstawowe jednak stały się również kryterium oceny. Im te wartości są wyższe tym lepiej dla uniwersalności rozwiązania. Wiąże się to często z tym, że wraz ze wzrostem wspomnianych parametrów, rośnie również masa i rozmiary urządzenia, a także koszt. Do grupy kryteriów ekonomicznych wybrano: cenę za produkt kalkulowaną dla dostaw seryjnych w ilościach rocznych, równych przewidywanej sprzedaży autobusów posiadających wskazaną przetwornicę, termin dostawy liczony w tygodniach od momentu zamówienia oraz

dojrzałość produktu mierzona w ilości do tej pory sprzedanych przez producenta urządzeń tego typu. Dla przeprowadzenia optymalizacji, wyznaczono wagi odpowiadające ważności poszczególnych kryteriów. Z uwagi na tajemnicę przedsiębiorstwa oraz podpisane umowy o poufności nazwy producentów oraz typy urządzeń zastąpiono kolejnymi literami alfabetu, a wartości bezwzględne zmiennych dla poszczególnych kryteriów nie zawarto w niniejszej rozprawie. Rezultat optymalizacji wielokryterialnej przedstawiono w tabeli 15. Kolorem szarym zaznaczono zmienne będące stymulantami a kolorem beżowym – destymulantami. Nominanty w poniższym zestawieniu nie występowały.

**Tabela 15.** Optymalizacja wielokryterialna przetwornic DC/DC 24 V DC w oparciu o metodę sum ważonych z wykorzystaniem metody unitaryzacji zerowanej do normowania zmiennych

Kryterium	Waga	Ocena z wagą			
		A	B	C	D
Maksymalny prąd wyjściowy DC, A	0,08	0,00	0,02	0,08	0,00
Zakres napięcia wyjściowego DC, V	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00
Zakres napięcia wejściowego DC, V	0,04	0,04	0,01	0,00	0,00
Masa, kg	0,06	0,06	0,06	0,00	0,04
Objętość, m <sup>3</sup>	0,06	0,06	0,05	0,00	0,06
Stosunek: maksymalny prąd wyjściowy / masa, A / kg	0,06	0,05	0,06	0,02	0,00
Stosunek: maksymalny prąd wyjściowy / objętość, A / m <sup>3</sup>	0,06	0,05	0,06	0,00	0,06
Cena za przewidywaną ilość seryjną rocznie, EUR	0,50	0,50	0,00	0,00	0,48
Termin dostawy, tygodnie	0,06	0,06	0,00	0,00	0,04
Dojrzałość produktu, liczba sprzedanych sztuk	0,04	0,04	0,00	0,04	0,00
<b>Suma ocen Si:</b>	<b>1,00</b>	<b>0,90</b>	<b>0,25</b>	<b>0,13</b>	<b>0,68</b>

Źródło: opracowanie własne

Stosując metodę sum ważonych stwierdzono, że optymalnym urządzeniem, wg przyjętych kryteriów oraz wag, jest przetwornica DC/DC 24 V oznaczona literą A, która uzyskała ogólną ocenę równą 0,90.

### 2.3.7. Dobór przetwornicy DC/AC 3x400 V AC

W sposób analogiczny do przetwornicy DC/DC przeanalizowano 5 przetwornic DC/AC 3x400 V AC, z których 3 spełniły postawione wymagania. Kryteria ekonomiczne i wagi dla nich przyjęto identycznie jak dla przetwornicy DC/DC. Do kryteriów technicznych zaliczono zakres napięcia wejściowego DC, wartość znamionowego natężenia prądu wyjściowego AC oraz jego stosunki do masy i objętości, masę a także

wymiary przetwornicy mierzone jako objętość potrzebną do jej zabudowy. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej przedstawiano w tabeli 16.

**Tabela 16.** Optymalizacja wielokryterialna przetwornic DC/AC 3x400 V AC w oparciu o metodę sum ważonych z wykorzystaniem metody unitaryzacji zerowanej do normowania zmiennych

Kryterium	Waga	Ocena z wagą		
		E	F	G
Znamionowy prąd wyjściowy AC, A	0,08	0,00	0,08	0,00
Zakres napięcia wejściowego DC, V	0,04	0,00	0,00	0,04
Masa, kg	0,06	0,06	0,00	0,06
Objętość, m <sup>3</sup>	0,06	0,04	0,00	0,06
Stosunek: znamionowy prąd wyjściowy / masa, A / kg	0,08	0,01	0,00	0,08
Stosunek: znamionowy prąd wyjściowy / objętość A / m <sup>3</sup>	0,08	0,00	0,08	0,07
Cena za przewidywaną ilość seryjną rocznie, EUR	0,50	0,17	0,00	0,50
Termin dostawy, tygodnie	0,06	0,00	0,00	0,06
Dojrzałość produktu, liczba sprzedanych sztuk	0,04	0,00	0,00	0,04
<b>Suma ocen Si:</b>	<b>1,00</b>	<b>0,28</b>	<b>0,16</b>	<b>0,91</b>

Źródło: opracowanie własne

Kolorem szarym zaznaczono zmienne będące stymulantami a kolorem beżowym – destymulantami. Dla zastosowanej metody, wg przyjętych kryteriów oraz wag, optymalnym urządzeniem jest przetwornica DC/AC 3x400 V AC oznaczona literą G. Uzyskała ona ogólną ocenę równą 0,91.

### 2.3.8. Dobór przetwornicy hybrydowej z wyjściami DC i AC

W sprzedaży dostępne są rozwiązania hybrydowe łączące w jednej obudowie przetwornicę DC/DC i DC/AC. W celu oceny tych rozwiązań, porównano je z zestawem najlepszych przetwornic DC/DC z tabeli 15 (oznaczona literą A) i DC/AC z tabeli 16 (oznaczona literą G). Ponownie założono, że kryteria ekonomiczne jak i ich udział w całkowitej ocenie nie ulegnie zmianie. Dla zestawu przetwornic DC/DC i DC/AC cenę stanowi suma cen, termin dostawy wskazano jako dłuższy, a dojrzałość produktu jako mniejszą wartość wytypowanych urządzeń. Kryteria techniczne powielono spośród optymalizacji dla pojedynczych elementów, przy czym dla zestawu przyjęto sumę dla mas i objętości poszczególnych przetwornic. Dla zakresu napięcia wejściowego przyjęto wartość mniejszą dla zestawu urządzeń. Suma ocen ważonych za kryteria techniczne nie uległa zmianie. Oznacza to, że przy większej ilości kryteriów technicznych, należało zredefiniować ich wagi, co odbyło się metodą ekspercką. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla rozwiązań hybrydowych oraz zestawu najlepszych przetwornic DC/DC i DC/AC zestawiono w tabeli 17.



**Tabela 17.** Optymalizacja wielokryterialna przetwornic w wykonaniu hybrydowym i zestawem najlepszych przetwornic DC/DC 24 V i DC/AC 3x400 V AC w oparciu o metodę sum ważonych z wykorzystaniem metody unitaryzacji zerowanej do normowania zmiennych

Kryterium	Waga	Ocena z wagą		
		H HYB	I HYB	A+G
Maksymalny prąd wyjściowy DC, A	0,04	0,00	0,00	0,00
Znamionowy prąd wyjściowy AC, A	0,04	0,00	0,00	0,00
Zakres napięcia wyjściowego DC, V	0,04	0,00	0,04	0,04
Zakres napięcia wejściowego DC, V (mniejsza wartość z DC/DC i DC/AC)	0,04	0,00	0,04	0,04
Suma mas DC/DC i DC/AC, kg	0,04	0,04	0,04	0,00
Suma objętości DC/DC i DC/AC, m <sup>3</sup>	0,04	0,04	0,04	0,00
Stosunek: maksymalny prąd wyjściowy DC / suma mas, A / kg	0,04	0,04	0,04	0,00
Stosunek: maksymalny prąd wyjściowy DC / suma objętości, A / m <sup>3</sup>	0,04	0,04	0,04	0,00
Stosunek: znamionowy prąd wyjściowy AC / suma mas, A / kg	0,04	0,04	0,04	0,00
Stosunek: znamionowy prąd wyjściowy AC / suma objętości, A / m <sup>3</sup>	0,04	0,04	0,04	0,00
Cena za przewidywaną ilość seryjną rocznie, EUR (suma cen dla zestawu DC/DC i DC/AC)	0,50	0,50	0,39	0,00
Termin dostawy, tygodnie (dłuższy dla zestawu DC/DC i DC/AC)	0,06	0,00	0,00	0,06
Dojrzałość produktu, liczba sprzedanych sztuk (mniejsza dla zestawu DC/DC i DC/AC)	0,04	0,00	0,00	0,00
<b>Suma ocen Si:</b>	<b>1,00</b>	<b>0,74</b>	<b>0,71</b>	<b>0,14</b>

Źródło: opracowanie własne

W rezultacie przeprowadzonych prac stwierdzono, że optymalnym urządzeniem, wg przyjętych kryteriów oraz wag, jest przetwornica w wykonaniu hybrydowym oznaczona „H HYB”, uzyskując ogólną ocenę równą 0,74. Jest ona relatywnie niska ponieważ dla kilku kryteriów wszystkie urządzenia charakteryzowały się tymi samymi wartościami. W związku z tym można było te kryteria usunąć lub przypisać im tę samą ocenę. Aby zachować ciągłość logiczną przeprowadzonych optymalizacji, zdecydowano się nie usuwać tych kryteriów tylko przypisać im ocenę równą 0. Analizując dane z tabeli 17, można wyciągnąć jeszcze jeden, bardzo istotny wniosek – rozwiązania hybrydowe wypadają znacznie korzystniej od zestawu 2 przetwornic DC/DC i DC/AC, zarówno wg kryteriów stosunków natężenia prądu do masy i objętości, jak i najważniejszego kryterium ekonomicznego, którym jest cena. Jest to z pewnością wynikiem możliwości wykorzystania efektów synergii pomiędzy urządzeniami, takimi jak jedna obudowa, jeden układ chłodzenia, jeden sterownik itp.

W oparciu o obliczenia i optymalizacje, przedstawiono rekomendację Zarządowi firmy, aby w autobusie Urbino 9 LE electric zastosować hybrydowe rozwiązanie przetwornic DC/DC 24 V i DC/AC 3x400 V AC oznaczone „H HYB”. Wyjście DC/DC

tej przetwornicy charakteryzuje się maksymalnym natężeniem prądu 200 A, a DC/AC 15 A. Rekomendację przyjęto.

## 2.4. Rozdzielnice zasilająco-sterujące

Wszystkie urządzenia energoelektroniczne takie jak falownik trakcyjny, przetwornice DC/DC i DC/AC muszą być w sposób bezpieczny zasilone z akumulatorów trakcyjnych. Te z kolei muszą być cyklicznie ładowane poprzez ładowarki zewnętrzne. Do połączenia w sposób bezpieczny wszystkich odbiorników zasilanych z linii HV z magazynami energii oraz ładowarkami zewnętrznymi służą rozdzielnice zasilająco-sterujące. Pełnią one w elektrycznym układzie napędowym następujące funkcje:

- dystrybucja energii elektrycznej,
- prawidłowe załączenie i odłączenie zasilania,
- zabezpieczenie przeciwzwarciove,
- kontrola stanu izolacji obwodu HV,
- pomiar napięcia i natężenia prądu.

### 2.4.1. Dystrybucja energii elektrycznej

W elektrycznym układzie napędowym należy połączyć do wspólnej linii zasilającej HV wiele różnych odbiorników i źródeł energii. Niektóre z nich będą występowały w każdym wariantcie projektowanego autobusu, inne tylko opcjonalnie. W tabeli 18 przedstawiono listę wszystkich elementów podłączonych do linii HV z podziałem na standardowe i opcjonalne.

**Tabela 18.** Lista elementów HV standardowych i opcjonalnych autobusu Solaris Urbino 9 LE electric

Standardowe urządzenia HV	Opcjonalne urządzenia HV
Akumulatory trakcyjne	Układ załączania rezystora hamowania
Falownik trakcyjny	Układ ładowania plug-in
Przetwornica DC/DC 24 V + DC/AC 3x400 V	Układ ładowania pantografem
Układ chłodzenia akumulatorów trakcyjnych	Układ zasilania bojlera
Układ zasilania sprężarki powietrza	

Źródło: opracowanie własne

Należy przy tym dodać, że każdy autobus musi posiadać możliwość naładowania akumulatorów trakcyjnych, jednak może on być stosowany wariantowo, tj. autobus wyposażony jest w układ ładowania za pomocą złącza, pantografu, bądź obu razem. Również bojler elektryczny jest opcją, gdyż niektórzy klienci decydują się na ogrzewanie za pomocą pieca zasilanego olejem napędowym.

Ważnym aspektem jest opcjonalne występowanie rezystora hamowania. Występuje on wówczas, gdy autobus rejestrowany jest w kategorii M3 w klasie II wg definicji określonej w regulaminie R107 EKG ONZ [53]. Wynika to z kolei z wymogów określonych w regulaminie R13 EKG ONZ wskazujących, że taki pojazd musi przejść test na skuteczność hamowania długodystansowego. Polega on na utrzymaniu prędkości średniej  $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  przy 7% spadku na odcinku drogi 6 km w trakcie hamowania rekuperacyjnego bez użycia hamulca roboczego ani ręcznego, przy czym warunki te muszą zostać spełnione nawet jeśli akumulatory trakcyjne naładowane są w 100%. Determinuje to konieczność zastosowania rezystora hamowania, w którym to nadmiar energii elektrycznej pochodzącej z rekuperacji zostaje rozproszony w postaci ciepła [54].

Uwzględniając, że powyżej wymienione opcje mogą występować w różnych konfiguracjach powstaje 12 teoretycznych wariantów, które zestawiono w tabeli 19.

**Tabela 19.** Warianty występowania opcjonalnych elementów HV w autobusie elektrycznym Solaris Urbino 9 LE electric

L.p.	Układ załączania rezystora hamowania	Układ ładowania <i>plug-in</i>	Układ ładowania pantografem	Układ zasilania bojlera
1.		X		
2.			X	
3.		X	X	
4.		X		X
5.			X	X
6.		X	X	X
7.	X	X		
8.	X		X	
9.	X	X	X	
10.	X	X		X
11.	X		X	X
12.	X	X	X	X

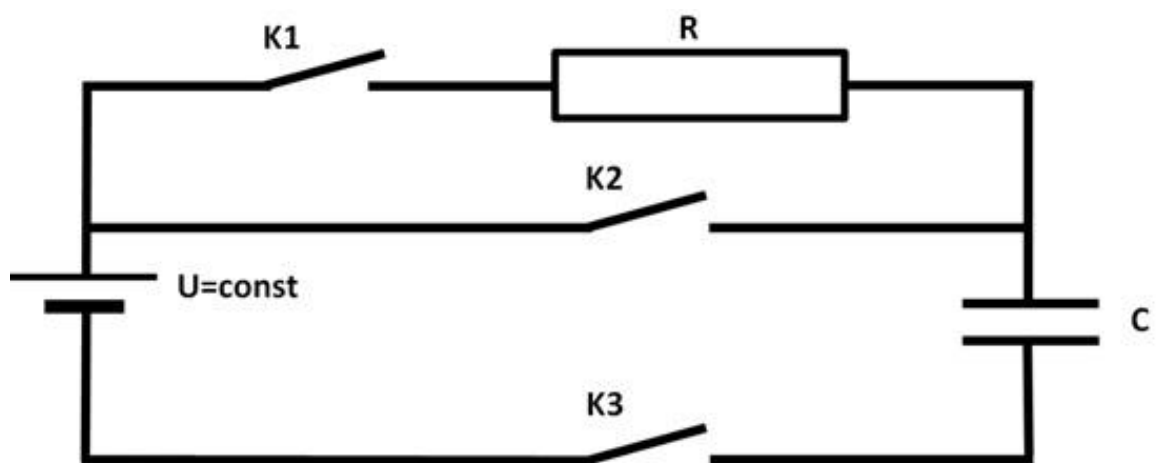
Źródło: opracowanie własne

Duża liczba wariantów powoduje konieczność zastosowania różnych rozwiązań. Stosowanie dwunastu różnych rozdzielnic jest trudne w zarządzaniu i kosztowne, natomiast przygotowanie rozdzielnic na wariant uwzględniający wszystkie funkcje jest ekonomicznie nieuzasadnione, szczególnie że występuje on relatywnie rzadko (< 10% wszystkich przetargów na autobusy miejskie) [4]. Dlatego racjonalne jest modułowe przygotowanie rozdzielnic zasilająco-sterującej polegające na wyodrębnieniu do mniejszych dedykowanych rozdzielnic układów załączania oraz pomiaru napięcia i natężenia prądu (*plug-in*, pantograf, bojler) lub odrębne (poza główną rozdzielnicą zasilająco-sterującą) ulokowanie tranzystorowego układu załączania rezystora hamowania.

#### 2.4.2. Prawidłowe załączenie i odłączenie zasilania

Obwody HV układów odpowiedzialnych za ładowanie za pomocą złącza jak i pantografu, ze względów bezpieczeństwa posiadają styczniki. Ich przeznaczeniem jest dopinanie obwodów do głównej linii zasilającej tylko podczas ładowania akumulatorów trakcyjnych. Również układ zasilania bojlera wyposażony jest w styczniki, które załączają i rozłączają odpowiednie sekcje grzejne urządzenia. Pozwala to na kilkustopniową regulację mocy grzejnej bojlera. Poszczególne sekcje załączane są zgodnie z zaprogramowaną, w sterowniku głównym pojazdu, charakterystyką komfortu klimatycznego.

Urządzenia energoelektroniczne, takie jak falowniki czy przetwornice, występujące w elektrycznym układzie napędowym, posiadają na wejściu kondensatory o pojemności sumarycznie przekraczającej  $1000 \mu F$ . Podłączając wprost do takiego obwodu akumulatory trakcyjne o napięciu pracy w zakresie 510–750 V, w czasie ładowania kondensatorów płynąłby prąd o natężeniu rzędu kiloamperów. Taka sytuacja spowodowałaby uszkodzenie wielu elementów instalacji elektrycznej takich jak bezpieczniki, styczniki oraz niektóre elementy energoelektroniczne. Dlatego w celu prawidłowego załączania zasilania stosuje się układy wstępnego ładowania. Składają się one z rezystora wstępnego ładowania R ograniczającego prąd ładowania kondensatorów C, stycznika obwodu wstępnego ładowania K1, styczników obwodu głównego zasilania potencjału dodatniego K2 oraz ujemnego K3. Schemat zastępczy układu przedstawiono na rysunku 24.

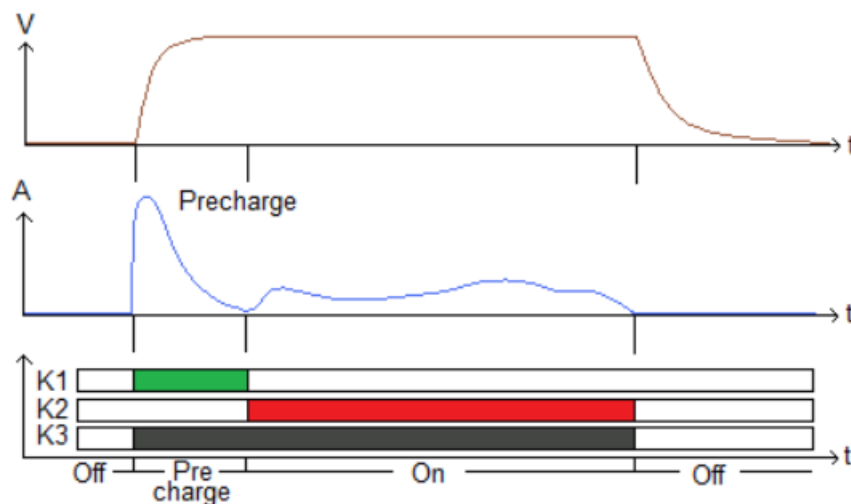


Rys. 24. Schemat zastępczy układu wstępnego ładowania  
Źródło: opracowanie własne

Działanie układu wstępnego ładowania można podzielić na 3 fazy:

- „Off” - kiedy obwód zasilania jest wyłączony, wszystkie styczniki (K1, K2, K3) są wyłączone;
- „Precharge” - kiedy obwód zasilania jest włączany i następuje ładowanie kondensatorów, styczniki K1 i K3 są włączone;
- „On” – kiedy po wstępnym naładowaniu kondensatorów stycznik K2 zostaje włączony a K1 wyłączony, przy czym stycznik K3 pozostaje włączony;

Opisane sekwencje wraz z zachowaniem się napięcia oraz natężenia prądu po stronie odbiorników przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 25 [55].



**Rys. 25.** Cykle załączania styczników obwodu zasilania z uwzględnieniem fazy wstępnego ładowania  
Źródło: [55]

Rezystancja rezystora wstępnego ładowania dobierana jest na podstawie sumarycznej pojemności wszystkich odbiorników w pojeździe oraz oczekiwanego czasu trwania fazy wstępnego ładowania [55]. Poniżej przedstawiono obliczenia wartości rezystancji rezystora wstępnego ładowania dla elektrycznego układu napędowego zastosowanego w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric. Ponieważ poszczególne urządzenia energoelektroniczne podłączone są równolegle, a przy równoległym połączeniu kondensatorów pojemność zastępcza równa jest sumie pojemności poszczególnych kondensatorów [51] to sumaryczną pojemność wszystkich odbiorników HV w tym pojeździe wyznaczono dodając poszczególne wartości pojemności odczytane z dokumentacji elementów. Wartość ta wyniosła  $C = 2011 \mu\text{F}$ . Oczekiwany czas trwania fazy wstępnego ładowania określono jako zawierający się w przedziale od 1 do 2 s. Jako, że w praktyce należy spodziewać się opóźnień wynikających z przetwarzania

zmierzonych wartości oraz komunikacji między sterownikami, to do obliczeń przyjęto wartość  $T = 1$  s. Zakłada się, że przy napięciu na kondensatorze wynoszącym 99,3% wartości napięcia zasilania  $U$ , tj. po czasie wynoszącym pięciokrotność stałej czasowej  $\tau$ , wartość natężenia prądu po włączeniu stycznika głównego obwodu zasilania, będzie na tyle mała, aby nie uszkodzić elementów elektrycznego układu napędowego. Uwzględniając powyższe założenia wiadomo, że prawdziwa jest zależność opisana wzorem (22) [55], [56].

$$T = 5 \cdot \tau \quad (22)$$

gdzie:  $T$  - oczekiwany czas trwania fazy wstępnego ładowania [s],  $\tau$  – stała czasowa [s]

Rezystancja wewnętrzna akumulatorów trakcyjnych oraz przewodów jest w porównaniu z wartością rezystancji rezystora wstępnego ładowania tak mała, że można ją pominąć. Wówczas prawdziwy jest wzór (23) na stałą czasową [51].

$$\tau = R \cdot C \quad (23)$$

gdzie:  $R$  - rezystancja rezystora wstępnego ładowania [ $\Omega$ ],  $C$  – pojemność zastępcza elektrycznego układu napędowego po stronie HV [F]

Z przekształcenia wzorów (22) i (23) otrzymuje się wzór (24) na wartość rezystancji rezystora wstępnego ładowania [55].

$$R = \frac{T}{5 \cdot C} \quad (24)$$

Po podstawieniu do wzoru (24) wartości  $T$  oraz  $C$ , otrzymuje się wartość rezystancji rezystora wstępnego ładowania równą 99,45  $\Omega$ . Do dobrania właściwego rezystora, należy określić parametr mocy  $P_{sr}$  jaki rezystor będzie musiał rozpraszyc. Moc ta, zgodnie ze wzorem (25) jest wartością energii  $W_e$  rozpraszaną podczas wstępnego ładowania w czasie ładowania  $T$  [51].

$$P_{sr} = \frac{W_e}{T} \quad (25)$$

gdzie:  $P_{sr}$  – średnia moc elektryczna rozpraszana na rezystorze [W],  $W_e$  – energia rozpraszana na rezystorze [J]

Energia rozpraszana na rezystorze równa jest energii pola elektrycznego kondensatorów układu napędowego po stronie HV. Zatem prawdziwa jest zależność opisana wzorem (26) [51], [55].

$$W_e = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (26)$$

gdzie:  $U$  – napięcie źródła zasilania [V]

Znając wartość pojemności zastępczej  $C = 2011 \mu\text{F}$ , czas  $T = 1 \text{ s}$ , oraz zakładając, że najgorszy przypadek dla doboru rezystora wstępnego ładowania występuje przy maksymalnym napięciu akumulatorów trakcyjnych, tj. dla  $U = 750 \text{ V}$ , obliczono wartość energii  $W_e = 565,6 \text{ J}$  oraz moc średnią  $P_{sr} = 565,6 \text{ W}$ . Cechą charakterystyczną tego stanu nieustalonego jest zmienność mocy w czasie. Oznacza to, że wartość średnia mocy dla rezystora jest tylko i wyłącznie wartością poglądową, wg której należy rozpocząć poszukiwanie właściwego rezystora wstępnego ładowania. Należy zweryfikować z producentem rezystora wartości maksymalnych mocy i czasu ich trwania dla konkretnego podzespołu, bowiem wartość maksymalna mocy  $P$  występująca na początku ładowania jest znacznie większa od wartości średniej i określona jest wzorem (27) [51], [55].

$$P = \frac{U_R^2}{R} \quad (27)$$

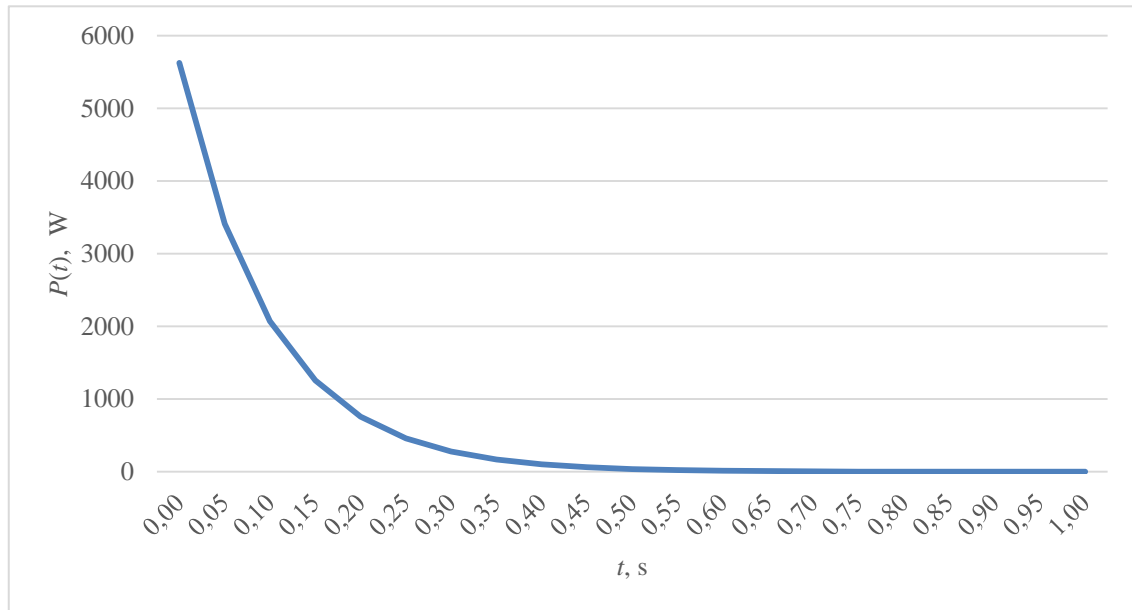
gdzie:  $P$  – moc ładowania kondensatorów [W],  $U_R$  – napięcie na rezystorze wstępnego ładowania [V]

Po podstawieniu do wzoru wartości napięcia na rezystorze (równego, w momencie załączenia stycznika, napięciu zasilania) i rezystancji rezystora wstępnego ładowania otrzymano wartość mocy maksymalnej rozpraszanej na rezystorze  $P = 5656 \text{ W}$ . Wartość ta jest maksymalną wartością mocy i dynamicznie maleje, dlatego z punktu widzenia doboru rezystora wstępnego ładowania istotne jest aby był to rezystor odporny na krótkotrwałe wysokie moce jednak nie musi on mieć rozbudowanego radiatora, gdyż ze względu na sposób działania używany jest bardzo krótko (ok. 1 s). W oparciu o wzór (27) przeprowadzono symulację rozproszenia mocy na rezystorze wstępnego ładowania uwzględniając, że napięcie na rezystorze określone jest wzorem (28) [51].

$$U_R(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (28)$$

gdzie:  $U_R(t)$  – napięcie na rezystorze w funkcji czasu [V],  $t$  – czas [s]

Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 26.



**Rys. 26.** Przebieg rozpraszanej mocy na rezystorze wstępnego ładowania w funkcji czasu  
Źródło: opracowanie własne

Znając te parametry można dobrać rezystor wstępnego ładowania. W przypadku projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric wybrano rezystor o rezystancji 100  $\Omega$  z potwierdzoną przez producenta możliwością obciążenia krótkotrwałego mocą 6,7 kW.

Dla weryfikacji, czy układ wstępnego ładowania zapewnia prawidłowe dołączenie akumulatorów trakcyjnych do odbiorników HV, należy obliczyć prąd płynący po załączeniu głównego obwodu zasilania, a więc z pominięciem rezystora wstępnego ładowania. Określono, że projektowany oczekiwany czas trwania fazy wstępnego ładowania to 1 s, a więc po tym czasie następuje przełączenie na główny obwód zasilania. Wartość napięcia kondensatorów w funkcji czasu określona jest wzorem (29) [51].

$$U_c(t) = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (29)$$

gdzie:  $U_c(t)$  – napięcie kondensatora w funkcji czasu [V]

Dla napięcia zasilania 750 V, napięcie kondensatorów po czasie 1 s, zgodnie ze wzorem (29) powinno wynosić 745 V. Taka wartość występowałaby gdyby nie rezystory wolnego



rozładowania montowane równolegle do kondensatorów. Ich rezystancja zastępcza obliczona na podstawie dokumentacji wynosi 10 kΩ. W trakcie fazy wstępnego ładowania stanowią one szeregowe połączenie wraz z rezystorem wstępnego ładowania tworząc dzielnik napięcia w proporcji 1:100 (100 Ω : 10000 Ω). Wówczas kondensatory nie będą ładowane do poziomu napięcia zasilania, a 1% niżej, tj. 7,5 V niżej (1% z 750 V), a więc w trakcie fazy wstępnego ładowania po czasie 1 s należy się spodziewać napięcia na kondensatorach na poziomie 737,5 V. Na podstawie rezystancji wewnętrznej akumulatorów trakcyjnych oraz rezystancji przewodów odczytanych z dokumentacji wyliczono, że rezystancja zastępcza głównego obwodu zasilania wynosi ok. 80 mΩ. Korzystając ze wzoru (30) można obliczyć natężenie prądu w momencie załączenia głównego obwodu zasilania [51].

$$I_c(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{\frac{-t}{RC}} \quad (30)$$

gdzie:  $I_c(t)$  – natężenie prądu kondensatora w funkcji czasu [A],  $U$  – różnica napięć zasilania i kondensatorów [V],  $t$  – czas [s],  $R$  – rezystancja głównego obwodu zasilania [Ω]

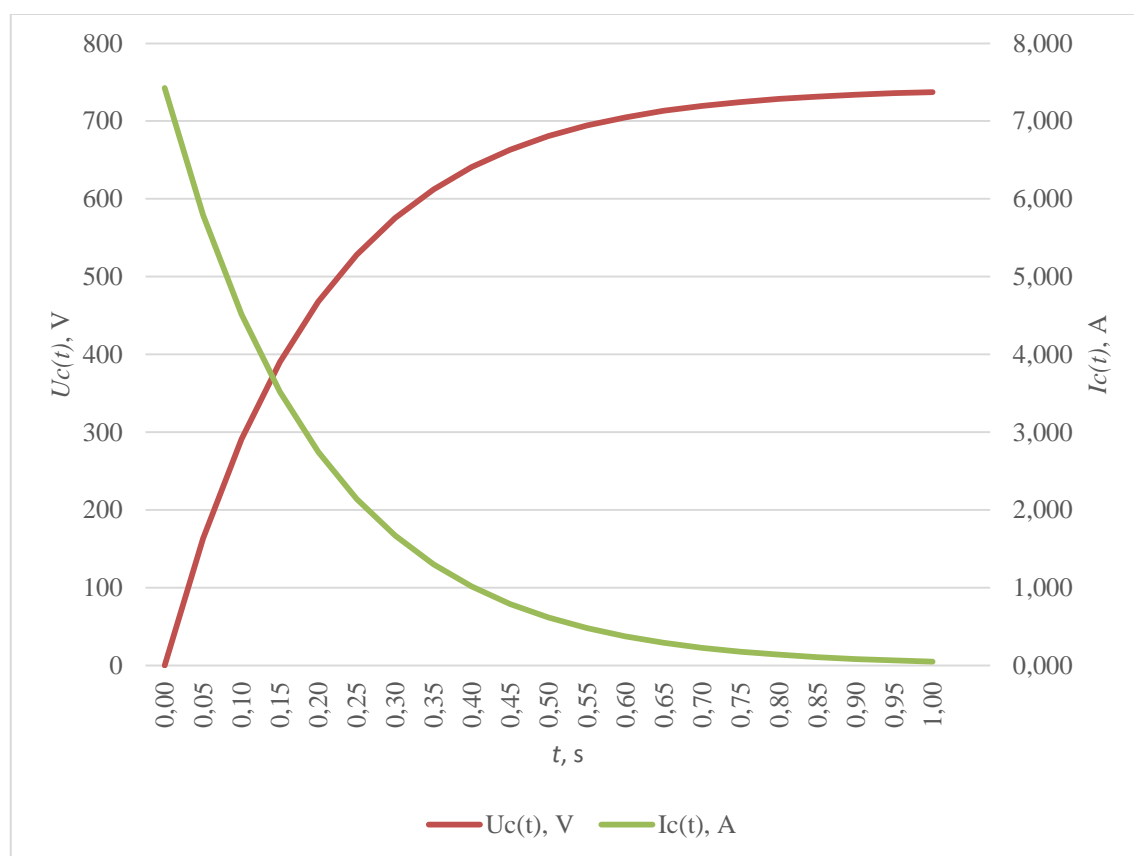
Należy przy tym pamiętać, że po przełączeniu na główny obwód zasilania, napięcie zasilania  $U$  stanowi różnicę napięć źródła oraz napięcia na kondensatorze w momencie przełączenia, a rezystancja  $R$  to rezystancja zastępcza głównego obwodu zasilania. Czas  $t$  w momencie przełączenia równy jest 0 s, a więc podstawiając wartości do wzoru (30) otrzymuje się:

$$I_c(t) = \frac{750 - 737,5}{0,080} \cdot 1 = 156,25 \text{ A}$$

Otrzymana wartość prądu jest wartością bezpieczną dla wszystkich projektowanych podzespołów głównej linii zasilającej instalacji HV. Zweryfikowano prądy składowe poszczególnych urządzeń i potwierdzono, że ich wartości są mniejsze od dopuszczalnych prądów dla poszczególnych elementów.

W oparciu o wzory (29) i (30) autor rozprawy wykonał symulacje przebiegów napięcia i natężenia prądu w funkcji czasu na kondensatorze podczas fazy wstępnego ładowania. Należy zwrócić uwagę, że na potrzeby wspomnianej symulacji do wzorów należy podstawić napięcie zasilania  $U$  pomniejszone o 1% wynikający ze spadku napięcia na

rezystorze wstępnego ładowania tj. 742,5 V, a rezystancja  $R$  jest rezystancją rezystora wstępnego ładowania równą 100  $\Omega$ . Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 27.



**Rys. 27.** Przebiegi napięcia i natężenia prądu w funkcji czasu na kondensatorze podczas fazy wstępnego ładowania

Źródło: opracowanie własne

Analogicznym procesem do wstępnego ładowania, jest proces rozładowania kondensatorów. Stosuje się go do zapewnienia bezpieczeństwa obsłudze przy serwisowaniu elektrycznego układu napędowego. Dlatego w rozdzielnicy zastosowano również rezystory do szybkiego rozładowania kondensatorów, które podłączane są pomiędzy potencjałem dodatnim i ujemnym w momencie rozłączenia zasilania HV w sposób konwencjonalny (wyłączając stacyjkę) lub awaryjny (poprzez przerwanie pętli bezpieczeństwa HV).

### 2.4.3. Zabezpieczenie przeciwzwarciowe

Poszczególne funkcjonalne obwody HV zabezpieczone są przeciw zwarciu. Służą do tego bezpieczniki, które należy dobrać zgodnie ze sztuką uwzględniając następujące parametry:

- zakres napięcia pracy,
- dopuszczalny prąd zwarciovowy,
- stałą czasową L/R,
- znamionową wartość natężenia prądu bezpiecznika.

Parametry te powinny zostać obliczone dla poszczególnych obwodów uwzględniając rekomendacje dostawców poszczególnych odbiorników oraz rodzaj zastosowanych w linii zasilającej elementów takich jak przewody, złącza, styczniki. Należy pamiętać o tym, że prąd zwarciovowy mocno zależy od zastosowanych akumulatorów trakcyjnych. Istotną składową impedancji pętli zwarcia jest ich rezystancja wewnętrzna, która jest różna w zależności od zastosowanej technologii, a także zmienia się w funkcji temperatury. Dlatego w celu unifikacji instalacji należy dobrać bezpieczniki o dopuszczalnym prądzie zwarciovym większym od największego przypadku obliczeniowego.

#### **2.4.4. Kontrola stanu izolacji obwodu HV**

Bezpieczeństwo jest jednym z podstawowych aspektów podczas eksploatacji pojazdów, szczególnie pojazdów elektrycznych. Dlatego podstawowe wymogi określone są przez regulaminy EKG ONZ, a ich spełnienie jest warunkiem niezbędnym uzyskania europejskiej homologacji typu dla pojazdu. Bezpieczeństwo elektryczne związane z HV określone jest w regulaminie R100. Jednym z wymogów jest aby rezystancja izolacji dla obwodu HV spełniała określone wartości minimalne. Dla pojazdów, w których obwody AC i DC są galwanicznie izolowane od siebie, rezystancja izolacji pomiędzy przewodami HV i nadwoziem pojazdu powinna wynosić minimum  $100 \frac{\Omega}{V}$  napięcia roboczego dla obwodu DC oraz minimum  $500 \frac{\Omega}{V}$  napięcia roboczego w obwodzie AC. W przypadku pojazdów, w których oba obwody są galwanicznie połączone, rezystancja izolacji pomiędzy przewodami HV i nadwoziem pojazdu powinna przyjmować minimum  $500 \frac{\Omega}{V}$ . Regulamin R100 definiuje również metody wykonywania pomiarów rezystancji izolacji, w celu dokładnej kontroli czy dany pojazd właściwie skonstruowano [1], [27], [31]. Pojazdy są eksploatowane często w trudnych warunkach atmosferycznych i drogowych przez co instalacje narażone są na zmiany temperatury oraz drgania, a także uszkodzenia mechaniczne, np. w wyniku kolizji. Z tego powodu stosuje się układy monitorowania stanu izolacji aby mieć pewność, że jeśli rezystancja izolacji spadnie poniżej

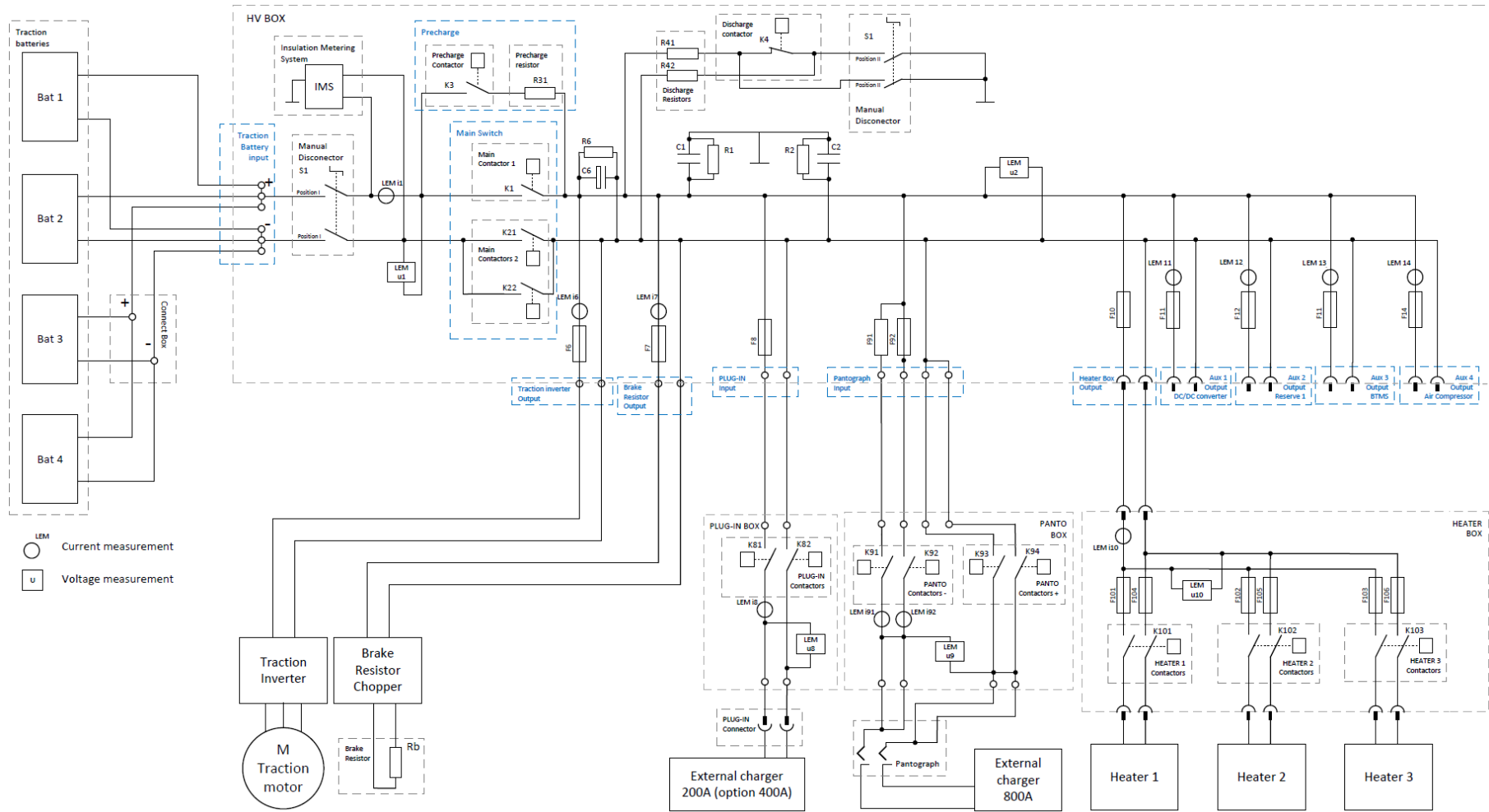
wymaganego poziomu stosowna informacja ostrzegawcza zostanie wyświetlona na pulpicie kierowcy, a proces ładowania za pomocą ładowarki nie rozpocznie się. Dostępne są rozwiązania w postaci urządzeń monitorowania stanu izolacji, w których programuje się wartość rezystancji izolacji, poniżej której aktywowany jest komunikat ostrzegawczy dla kierowcy. Istnieją również rozwiązania, które oprócz sygnalizowania obniżenia rezystancji izolacji poniżej zaprogramowanego progu, wysyłają (np. poprzez magistralę CAN) ciągłą informację na temat aktualnej jej wartości. Takie rozwiązanie dobrano do nowoprojektowanego autobusu Solaris Urbino 9 LE electric i umieszczono je w głównej rozdzielnicy zasilająco-sterującej. W pojeździe tym, obwody HV DC i AC są galwanicznie połączone dlatego zgodnie z regulaminem R100 obowiązuje konstrukcyjny wymóg zapewnienia rezystancji izolacji minimum  $500 \frac{\Omega}{V}$  napięcia roboczego. Jako, że zakres napięć DC dla tego pojazdu to 510–750 V, wymagana minimalna rezystancja izolacji równa jest 375 k $\Omega$ . Wartość tę przyjęto jako graniczną, poniżej której kierowcy zostanie wyświetlony komunikat o obniżeniu stanu izolacji, a także włączona będzie blokada ładowania akumulatorów trakcyjnych.

#### **2.4.5. Pomiar napięcia i natężenia prądu**

W instalacji HV należy monitorować napięcie oraz natężenia prądu. Układy pomiaru napięcia zamontowano przed i za głównym stycznikiem, co pozwala na monitorowanie narastania napięcia w trakcie fazy wstępnego ładowania kondensatorów, a także od strony obwodów ładowania za pomocą złącza jak i pantografu, dając możliwość weryfikacji poprawności polaryzacji przed załączeniem styczników. Układy pomiaru natężenia prądu zainstalowano na wejściu do rozdzielnicy, co pozwala na pomiar natężenia prądu akumulatorów trakcyjnych, a także przed wszystkimi odbiornikami, dzięki czemu możliwa jest reakcja na ewentualne przeciążenia obwodów jak i monitorowanie zużycia energii.

#### **2.4.6. Koncepcja modułowej rozdzielnicy zasilająco-sterującej**

W podrozdziałach od 2.4.1 do 2.4.5 opisano funkcjonalności jakie powinna spełniać modułowa rozdzielnica zasilająco-sterująca. Wykorzystując przedstawione rozważania i obliczenia przygotowano schemat ideowy rozdzielnicy, który zaprezentowano na rysunku 28.



Rys. 28. Schemat ideowy rozdzielniczy zasilająco-sterującej w wersji modułowej.  
Źródło: opracowanie własne

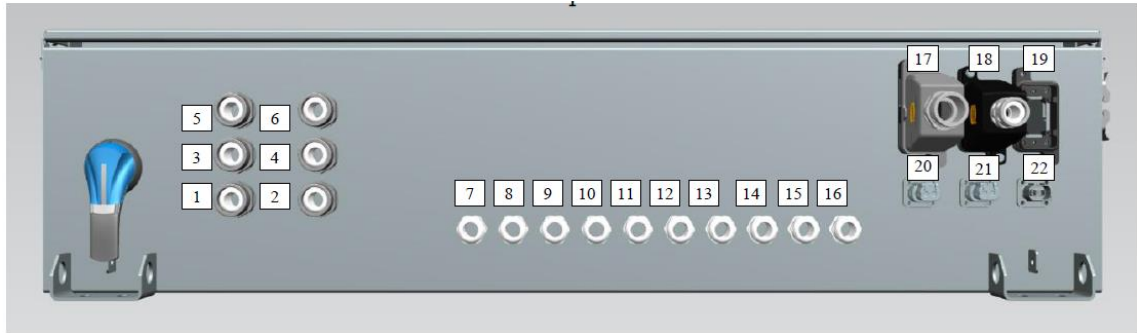
### **3. Opracowanie techniki integracji elektrycznego układu napędowego oraz oprogramowania**

W niniejszym podrozdziale przedstawiono w jaki sposób zintegrowano elementy dobrane i zaprojektowane dla elektrycznego układu napędowego prototypowego autobusu Solaris Urbino 9 LE electric. Opisano funkcjonalności oraz wyposażenie rozdzielnic zasilająco-sterujących wraz z wizualizacją w postaci modeli 3D. Przedstawiono sposób połączeń wszystkich elementów obwodu HV z podziałem na te występujące w każdym pojeździe oraz opcjonalne. Opisano algorytmy potrzebne do realizacji oprogramowania integrującego elektryczny układ napędowy.

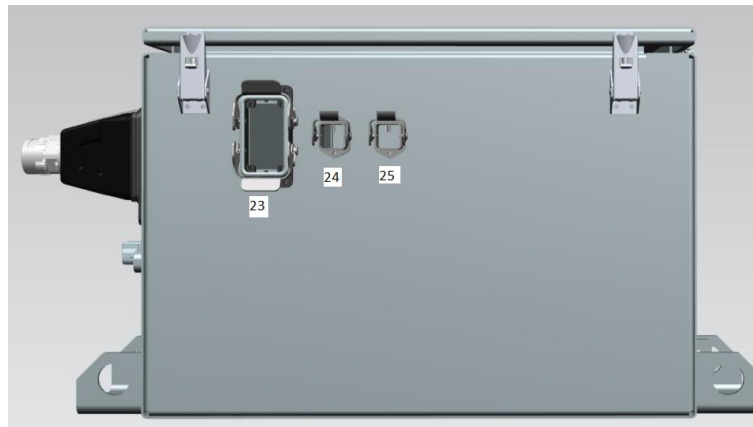
#### **3.1. Integracja elementów składowych układu napędowego**

W rozdziale 2 przeprowadzono rozważania analityczne i prace badawcze, które pozwoliły na dobór konkretnych rozwiązań w zakresie silnika i falownika trakcyjnego oraz przetwornic DC/DC 24 V i DC/AC 3x400 V AC dla sprężarki klimatyzacji przestrzeni pasażerskiej. Na tej podstawie zaprojektowano modułową rozdzielnicę zasilająco-sterującą, integrującą wszystkie elementy obwodu HV. Oprócz tych będących przedmiotem niniejszej rozprawy uwzględniono również te, które dobrano jako niezależne funkcjonalne układy z własną przetwornicą (układ zarządzania temperaturą akumulatorów trakcyjnych BTMS (*ang. Battery Thermal Management System*) i kompresor powietrza) lub układem załączania, (tranzystorowy układ załączania rezystora hamowania). Poszczególne moduły rozdzielnic nazwano „HV BOX”, „PLUG-IN BOX”, „PANTO BOX” i „HEATER BOX”.

„HV BOX” jest to główna rozdzielnica elektrycznego układu napędowego, łącząca ze sobą wszystkie elementy HV, w tym „PLUG-IN BOX”, „PANTO BOX” i „HEATER BOX”. Połączenie ze sobą tak wielu elementów wymaga opracowania interfejsu elektrycznego i takiego rozlokowania podłączeń przewodów, aby te nie ulegały splątaniu przy montażu ich w pojeździe. Z tego względu prowadzenie przewodów i miejsce ich podłączenia do rozdzielnic zaprojektowano również w ujęciu mechanicznym co stanowi warstwę modelu 3D autobusu. Rozlokowanie wejść przewodów i złączy w rozdzielnicy HV przedstawiają rysunki 29 i 30.



**Rys. 29.** Rozmieszczenie wejść przewodów i złączy w rozdzielnicy „HV BOX” – widok z przodu  
Źródło: [4]

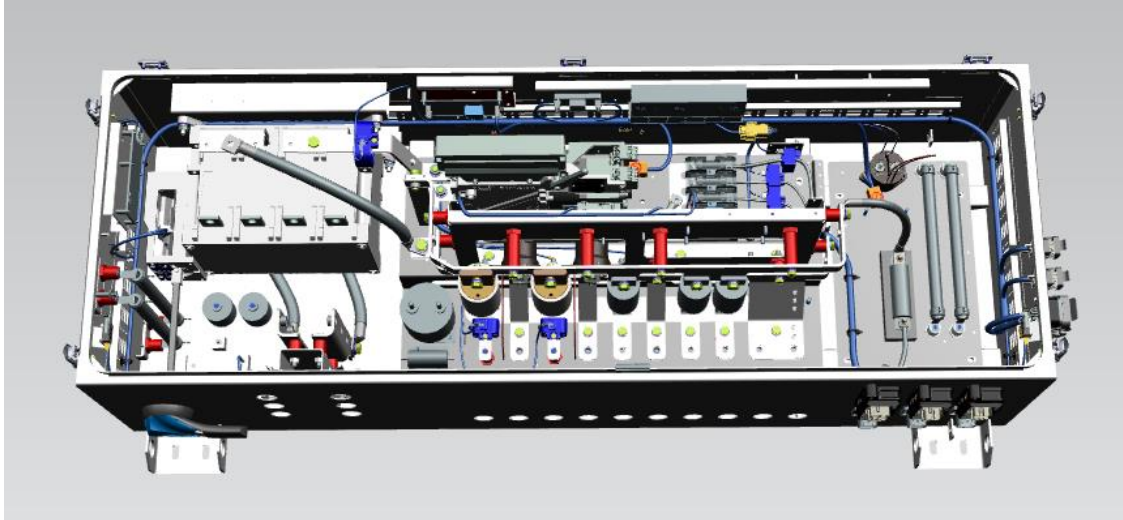


**Rys. 30.** Rozmieszczenie wejść przewodów i złączy w rozdzielnicy „HV BOX” – widok z boku  
Źródło: [4]

Poszczególne wejścia i złącza oznaczono liczbami a ich opis przeznaczenia przedstawia się następująco:

- 1–6 – akumulatory trakcyjne (3 pary +/-),
- 7,8 – falownik trakcyjny,
- 9,10 – układ załączający rezystor hamowania,
- 11,12 – „PLUG-IN BOX”,
- 13-16 – „PANTO BOX”,
- 17 – „HEATER BOX”,
- 18 – przetwornica DC/DC i DC/AC,
- 19 – rezerwa 1,
- 20 – kompresor powietrza,
- 21 – układ zarządzania temperaturą akumulatorów trakcyjnych BTMS,
- 22 – rezerwa 2.

Rozdzielnica ta składa się m.in. z: ręcznego rozłącznika zasilania, styczników, bezpieczników, obwodu wstępnego ładowania oraz rozładowania, a także przetworników pomiarowych i sterowników. Model 3D wnętrza rozdzielnicy „HV BOX” przedstawiono na rysunku 31.



**Rys. 31.** Model 3D wnętrza rozdzielnicy „HV BOX”  
Źródło: [4]

Zastosowany w rozdzielnicy ręczny rozłącznik trakcyjnych umożliwia wybór jednej z trzech pozycji (rys. 32).



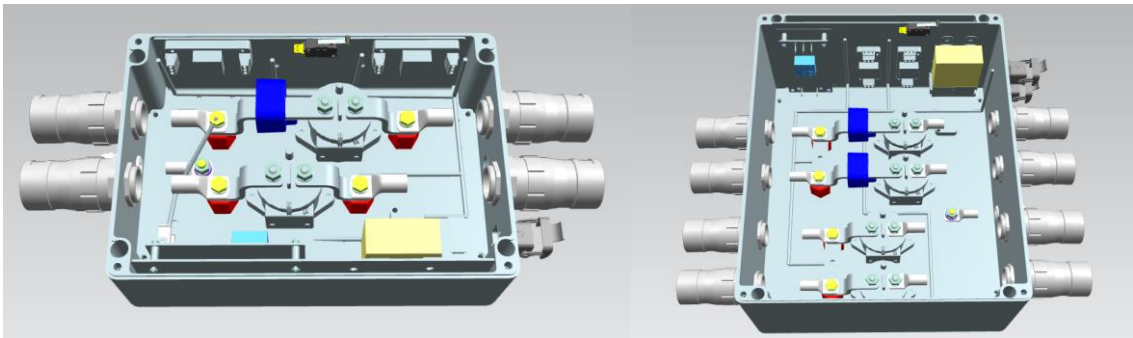
**Rys. 32.** Pozycje ręcznego rozłącznika zasilania zlokalizowanego na rozdzielnicy „HV BOX”  
Źródło: [4]

Pozycja „Włączony” oznacza, że rozłącznik posiada zwarte główne styki HV, a więc akumulatory trakcyjne są podłączone do głównego obwodu zasilania HV. W pozycji „Wylączony” rozłącznik ma rozwarne główne styki HV co oznacza, że zasilanie nie może być dystrybuowane do odbiorników. Rozłącznik w pozycji „Wylączony + rozładowanie” oznacza stan, w którym główne styki HV rozłącznika są rozwarne, a dodatkowo styki pomocnicze, do których podłączony jest stycznik obwodu rozładowania kondensatorów, są zwarte. W rezultacie kondensatory zlokalizowane



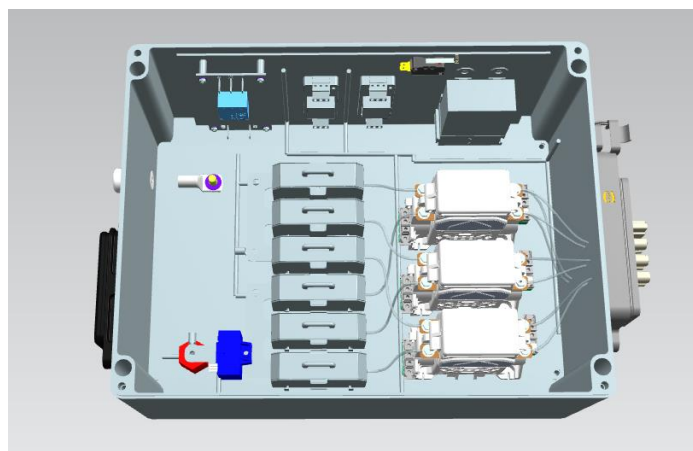
wewnątrz rozdzielnic jak i na wejściu urządzeń energoelektronicznych zostają rozładowane do napięcia bezpiecznego ( $< 60 \text{ V DC}$ ). Ze względów bezpieczeństwa rozdzielnica może zostać otwarta tylko w pozycji „Wyłączony + rozładowanie”.

„PLUG-IN BOX” jest to rozdzielnica obsługująca gniazdo ładowania, a „PANTO BOX” przeznaczona jest dla pantografu ładowania. Obie te rozdzielnice występują opcjonalnie wraz z przyłączem, jeśli jest ono wymagane. Zawierają styczniki, przetworniki pomiarowe napięcia i prądu, moduł sterujący pracą styczników oraz odczytujący pomiary. Modele 3D wnętrza obu rozdzielnic przedstawiono na rysunku 33.



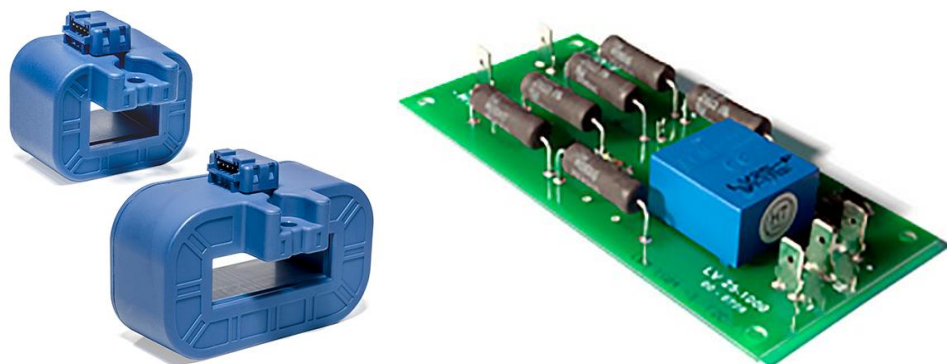
**Rys. 33.** Modele 3D wnętrza rozdzielnic „PLUG-IN BOX” (po lewej) i „PANTO BOX” (po prawej)  
Źródło: [4]

„HEATER BOX” jest to rozdzielnica bojlera, a więc elektrycznego urządzenia grzewczego, które podgrzewa płyn, który poprzez konwektory i nagrzewnice ogrzewa przestrzeń pasażerską i kabinę kierowcy autobusu. Rozdzielnica ta zawiera styczniki załączające poszczególne sekcje grzewcze bojlera, dzięki czemu możliwe jest sterowanie jego mocą. Wyposażona jest w bezpieczniki, sterownik oraz przetworniki pomiarowe. Na rysunku 34 przedstawiono model 3D wnętrza rozdzielnicy „HEATER BOX”.



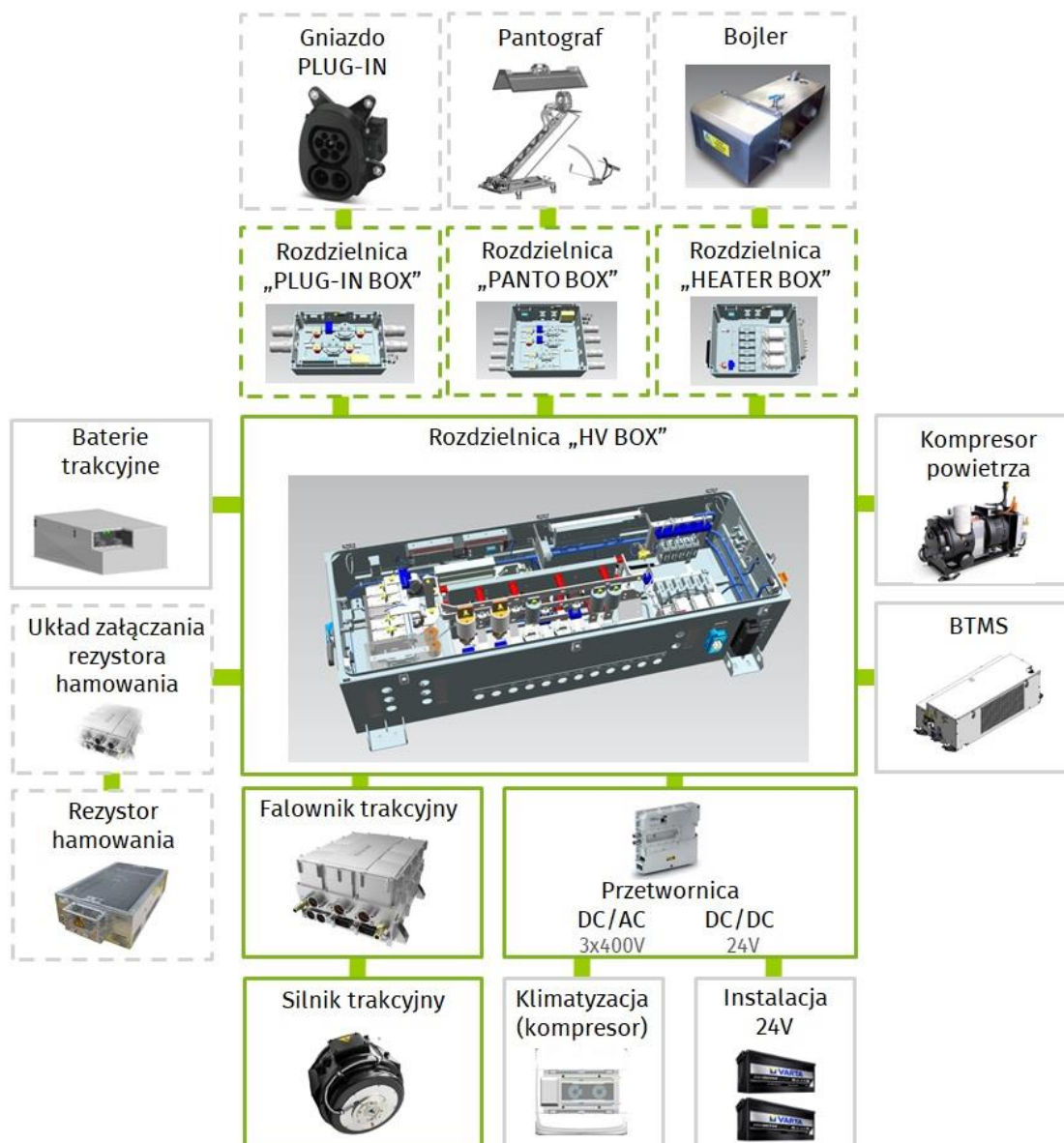
**Rys. 34.** Model 3D wnętrza rozdzielnicy „HEATER BOX”  
Źródło: [4]

Wszystkie wspomniane rozdzielnice wyposażone są w przetworniki napięcia i/lub prądu. Sygnałem wyjściowym wybranych przetworników prądowych jest napięcie w przedziale 0–5 V, które odczytywane jest za pomocą wejścia analogowego sterownika. Do pomiaru napięcia zastosowano przetworniki napięciowe, których sygnałem wyjściowym jest natężenie prądu w przedziale 0–25 mA dla zakresu napięcia mierzonego 0–800 V. Pomiar odbywa się poprzez odczytywanie przez sterownik spadku napięcia na rezystorze 100  $\Omega$ , proporcjonalnie do przepływającej wartości natężenia prądu wyjściowego przetwornika. Na rysunku 35 przedstawiono przykładowe przetworniki prądowe i napięciowe.



**Rys. 35.** Przykładowe przetworniki prądowe (po lewej) i napięciowe (po prawej)  
Źródło: [4]

Dla zaprojektowanego elektrycznego układu napędowego opracowano schemat ideowy połączonych elementów HV wraz z odbiornikami zastosowanych w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric, co przedstawiono na rysunku 36. Zieloną ramką zaznaczono elementy, które bezpośrednio stanowią przedmiot rozważań w niniejszej rozprawie, a szarą te, których zastosowanie narzucono na etapie projektu w związku ze standaryzacją rozwiązań. Linią ciągłą wskazano elementy występujące obligatoryjnie w każdym pojeździe, a przerywaną rozwiązania opcjonalne.



**Rys. 36.** Schemat ideowy elektrycznego układu napędowego zaprojektowanego dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric wraz z odbiornikami  
 Źródło: opracowanie własne

### 3.2. Oprogramowanie sterujące

Autobus elektryczny jest bardzo zaawansowanym technologicznie produktem, którego funkcjonowanie zależne jest w głównej mierze od oprogramowania. Tak jak pozostałe układy w autobusie, również elektryczny układ napędowy posiada oprogramowanie sterujące rozlokowane w wielu funkcjonalnych sterownikach. Wszystkie urządzenia energoelektroniczne, takie jak falownik trakcyjny czy przetwornice DC/DC i DC/AC posiadają własne, dedykowane i programowalne sterowniki, aby możliwe było realizowanie ich podstawowych funkcji. Rozdzielnice

zasilająco-sterujące posiadają własne sterowniki funkcjonalne aby realizować funkcje pomiarowe (np. odczyt napięcia i natężenia prądu) jak i sterujące (np. załączanie poszczególnych styczników). Dlatego wyposażone są w wejścia i wyjścia cyfrowe (pozwalające sterować stycznikami i odczytywać ich stan), a także wejścia analogowe pozwalającą na odczytanie wartości pomiarowych z przetworników napięcia oraz prądu, o których wspomniano w podrozdziale 2.4.5. Przykładowy sterownik wyposażony w moduły wejść i wyjść przedstawiono na rysunku 37.



**Rys. 37.** Przykładowy sterownik wyposażony w moduły wejść i wyjść stosowany w rozdzielnicach zasilająco-sterujących  
Źródło: [4]

W takim elektrycznym układzie napędowym potrzebny jest nadrzędny sterownik, którego rolą jest zbieranie wszystkich informacji wejściowych i realizowanie logiki zarządzania poszczególnymi procesami. W autobusie Solaris Urbino 9 LE electric taką funkcję powierzono Głównemu Komputerowi Napędowemu, który komunikuje się z pozostałymi sterownikami za pomocą magistrali CAN wg protokołu zgodnego z normą SAE J1939. Oprócz zarządzania bezpośrednio układem napędowym, jest on odpowiedzialny za komunikację dwustronną z Głównym Komputerem Pojazdowym, od którego otrzymuje informacje o konfiguracji autobusu i aktualnych komendach kierowcy, a także do którego wysyła komunikaty o usterkach czy awariach, które następnie prezentowane są na pulpicie. Oprogramowanie Głównego Komputera Napędu uwzględnia następujące algorytmy:

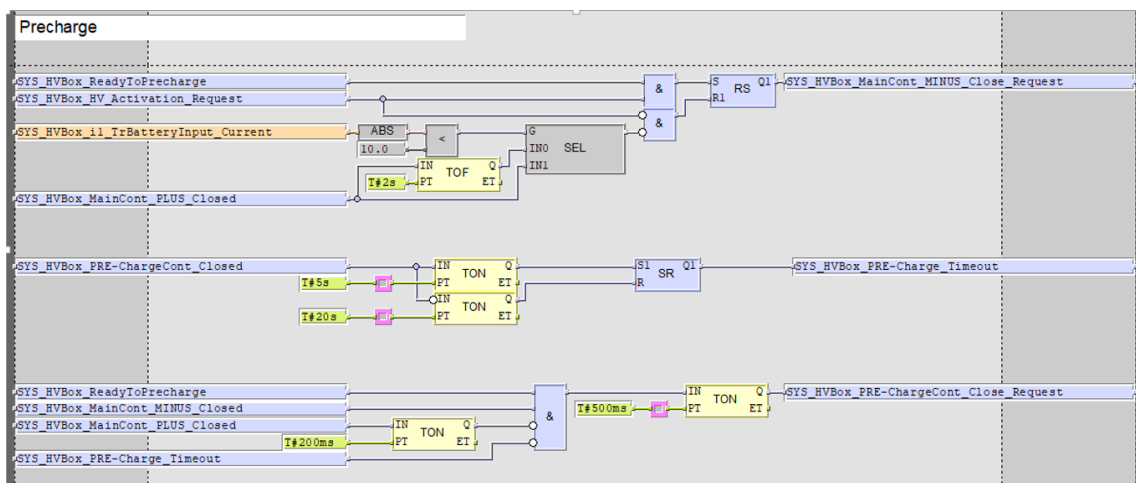
1. Załączenie zasilania 24 V DC sterowników elektrycznego układu napędowego i przeprowadzenie testu sprawności:
  - załączenie przekaźnika zasilania 24 V dla obwodu elektrycznego układu napędowego,

- diagnostyka poprawności komunikacji CAN ze sterownikami elektrycznego układu napędowego i ewentualne raportowanie błędów do Głównego Komputera Pojazdu,
  - diagnostyka poprawności działania przetworników napięciowych i prądowych w rozdzielnicach zasilająco-sterujących i ewentualne raportowanie błędów do Głównego Komputera Pojazdu,
  - diagnostyka poprawności działania styczników w rozdzielnicach zasilająco-sterujących i ewentualne raportowanie błędów do Głównego Komputera Pojazdu,
  - weryfikacja stanu obwodu bezpieczeństwa z uwzględnieniem statusu rozłącznika w „HV BOX” i wyłączników awaryjnych.
2. Załączenie i wyłączenie zasilania obwodu HV:
- ustawienie trybu pracy dla akumulatorów trakcyjnych – ładowanie lub rozładowanie (tryb jazdy),
  - przesłanie komendy do sterownika akumulatorów trakcyjnych o żądaniu załączenia ich styczników,
  - załączenie styczników głównego obwodu zasilania HV z uwzględnieniem fazy wstępnego ładowania kondensatorów,
  - wyłączenie styczników głównego obwodu zasilania HV z uwzględnieniem rozładowania kondensatorów,
  - ciągły monitoring komunikacji i poszczególnych etapów działania, tj. weryfikacja czy na żądanie załączenia stycznika pojawia się sygnał zwrotny o jego załączeniu, czy w trakcie fazy wstępnego ładowania wzrasta napięcie po stronie kondensatorów, czy dane z przetworników napięcia i prądu wskazują prawidłowe wartości w zakresie pracy napędu i czy nie dochodzi do przeciążenia poszczególnych obwodów oraz wykrycie nieprawidłowości, reakcja na nie i raportowanie błędów do Głównego Komputera Pojazdu.
3. Załączenie, wyłączenie i obsługa trybu jazdy:
- uruchomienie w falowniku trybu pozwalającego na jazdę,
  - uruchomienie iysterowanie układu chłodzenia napędu (pompy obiegowej cieczy chłodzącej oraz wentylatorów chłodnicy) zgodnie z wymaganiami utrzymania temperatury poszczególnych elementów,
  - ustawienie wartości maksymalnej prędkości pojazdu,

- zarządzanie limitami maksymalnego momentu napędowego i charakterystyką przyspieszenia pojazdu,
  - zarządzanie trybem blokady jazdy, m.in. podczas załączonego hamulca postojowego,
  - zarządzanie hamowaniem rekuperacyjnym,
  - wysterowanie kierunku jazdy autobusu,
  - załączenie przetwornicy DC/DC 24 V i zarządzanie napięciem pokładowym w oparciu o prąd ładowania akumulatorów pokładowych,
  - ciągły monitoring falownika trakcyjnego, przetwornicy DC/DC 24 V oraz układu chłodzenia napędu w zakresie poprawnej komunikacji, temperatury pracy, realizacji sterowania zgodnie z żądaniem oraz wykrycie nieprawidłowości, reakcja na nie i raportowanie błędów do Głównego Komputera Pojazdu.
4. Obsługa odbiorników pomocniczych:
- uruchomienie i zarządzanie procesem chłodzenia akumulatorów trakcyjnych,
  - uruchomienie i zarządzanie pracą kompresora powietrza,
  - uruchomienie i zarządzanie pracą sprężarki klimatyzacji przestrzeni pasażerskiej poprzez przetwornicę DC/AC 3x400 V AC z uwzględnieniem trybu „miękkiego startu”,
  - ciągły monitoring odbiorników w zakresie poprawnej komunikacji, temperatury pracy, realizacji sterowania zgodnie z żądaniem kierowcy lub nastawami oraz wykrycie nieprawidłowości, reakcja na nie i raportowanie błędów do Głównego Komputera Pojazdu.
5. Załączenie, wyłączenie i obsługa procesu ładowania:
- obsługa sterowania blokady gniazda ładowania oraz podnoszenia i opuszczania pantografu,
  - nawiązanie komunikacji ze sterownikiem ładowarki poprzez sterownik komunikacyjny ładowania,
  - ustawienie limitów napięcia oraz natężenia prądu ładowania,
  - ciągły monitoring procesu ładowania w zakresie poprawnej komunikacji, temperatury gniazda ładowania, realizacji sterowania zgodnie z żądaniem oraz wykrycie nieprawidłowości, reakcja na nie i raportowanie błędów do Głównego Komputera Pojazdu.
6. Monitorowanie stanu izolacji:

- uruchomienie układu kontroli stanu izolacji zlokalizowanego w rozdzielniczy „HV BOX”,
- ciągła obsługa komunikatów przesyłanych magistralą CAN z informacją o aktualnym poziomie rezystancji izolacji i ewentualna blokada trybu ładowania oraz przesłanie komunikatów o błędzie do Głównego Komputera Pojazdu.

Z uwagi na tajemnicę przedsiębiorstwa, szczegółowe algorytmy sterowania nie mogą być zaprezentowane w niniejszej rozprawie. Powyższe punkty określają jednak tematykę jaką należy uwzględnić tworząc oprogramowanie dla elektrycznego układu napędowego. Przykładowy algorytm napisany w języku graficznym FBD (ang. Function Block Diagram) dla Głównego Komputera Napędu przedstawiono na rysunku 38.



**Rys. 38.** Przykładowy algorytm napisany w języku graficznym FBD  
Źródło: [4]

## **4. Implementacja opracowanego układu w pojeździe oraz jego walidacja**

W niniejszym rozdziale zaprezentowano sposób implementacji, zaprojektowanych na wcześniejszym etapie rozwiązań, wraz z wizualizacją rozmieszczenia elementów HV w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric. Przedstawiono metody walidacyjne oraz wyniki badań wykonanych na prototypie zaprojektowanego pojazdu. Wykazano poprawność zaprojektowania rozdzielnic zasilająco-sterujących, doboru zestawu silnik-falownik oraz przetwornic DC/DC 24 V oraz DC/AC 3x400 V AC. Wskazano korzyści jakie uzyskano, dzięki nowemu modelowi autobusu w stosunku do poprzedniej generacji, ze szczególnym zwróceniem uwagi na te pochodzące z zastosowania modułowego elektrycznego układu napędowego.

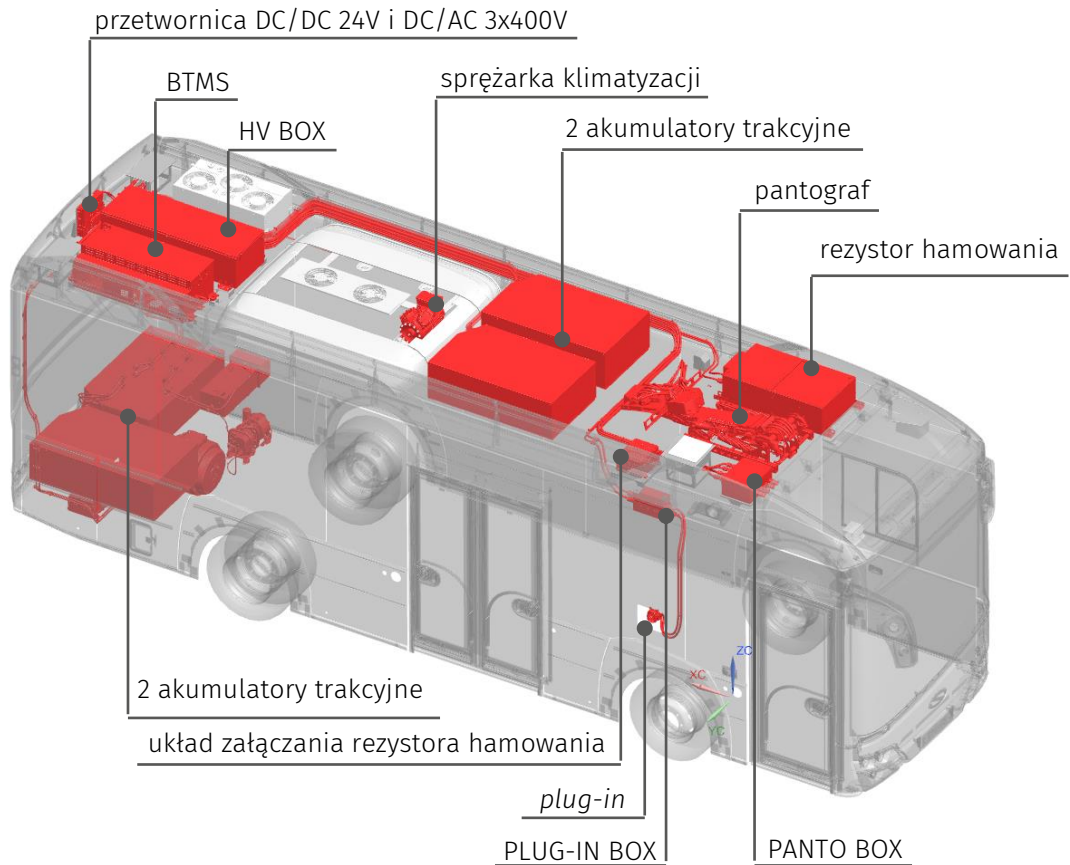
### **4.1. Projekt autobusu**

Dobrane na wcześniejszych etapach projektu silnik trakcyjny wraz z falownikiem, hybrydowe rozwiązanie przetwornicy DC/DC 24 V i DC/AC 3x400 V AC oraz zaprojektowane, modułowe rozwiązanie rozdzielnic zasilająco-sterujących, rozlokowano wraz innymi elementami w pojeździe, w sposób pozwalający na:

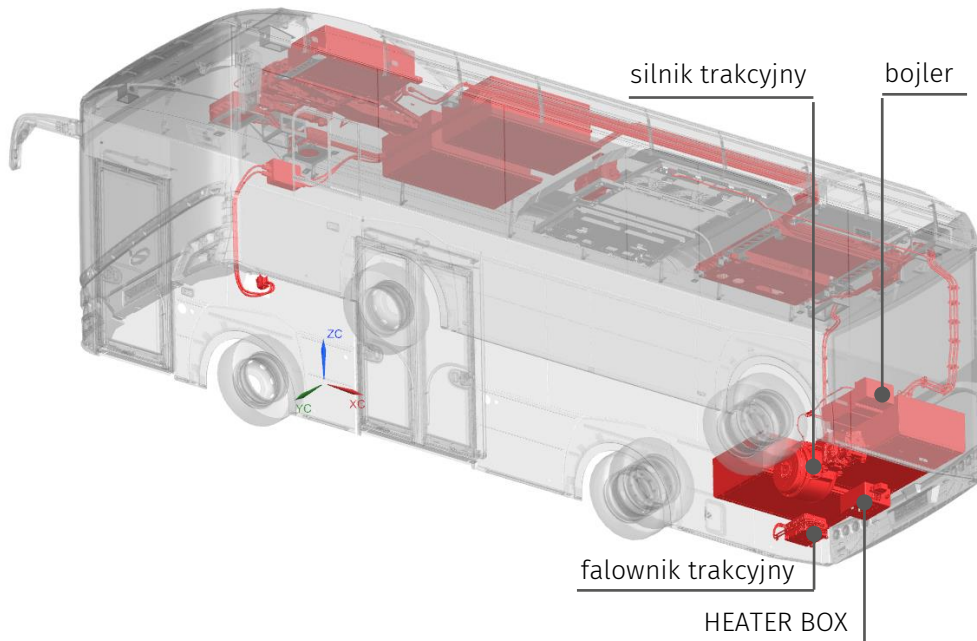
- odpowiedni rozkład masy umożliwiający osiągnięcie maksymalnej, możliwej prawnie dla tego typu pojazdu, liczby pasażerów,
- zastosowanie ustandaryzowanych akumulatorów trakcyjnych stosowanych w innych typach autobusów Solaris,
- zastosowanie zabudowy pantografu ładowania nad pierwszą osią autobusu,
- zastosowanie klimatyzacji z pompą ciepła stosowaną w innych typach autobusów Solaris,
- ustandaryzowaną zabudowę poszczególnych elementów, dla różnych wariantów oferowanych rozwiązań,
- ograniczenie do minimum długości połączeń elektrycznych HV.

Efekt prac wraz z opisem elementów obwodu HV przedstawiono na rysunkach 39 i 40.





**Rys. 39.** Rozmieszczenie elementów HV w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric – rzut z góry  
 Źródło: opracowano na podstawie [4]



**Rys. 40.** Rozmieszczenie elementów HV w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric – rzut z dołu  
 Źródło: opracowano na podstawie [4]

Autobus zaprojektowano pod względem konstrukcji mechanicznej, instalacji hydraulicznej i pneumatycznej, instalacji elektrycznej wysokiego oraz niskiego napięcia, a także wykonano specjalistyczne oprogramowanie dla poszczególnych sterowników. Modułowy elektryczny układ napędowy, pozwolił na rozmieszczenie elementów energoelektronicznych oraz rozdzielnic zasilająco-sterujących w pobliżu odbiorników przez nie zasilanych. Miało to bezpośredni wpływ na minimalizację długości instalacji elektrycznej HV.

#### **4.2. Walidacja rozwiązań w autobusie prototypowym**













Po zbudowaniu prototypu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric (przedstawionego na rysunku 41) przystąpiono do realizacji badań mających na celu walidację poprawności zaprojektowanych rozwiązań oraz słuszności zastosowanych metod projektowania i badawczych, a także technik obliczeniowych.



**Rys. 41.** Autobus prototypowy Solaris Urbino 9 LE electric rozpoczynający serię testów jezdnych  
Źródło: [4]

#### 4.2.1. Weryfikacja poprawności konstrukcji rozdzielnicy zasilająco-sterującej

Na końcowym etapie produkcji autobusu, przystąpiono do fazy uruchomień. Pierwszym zadaniem było zweryfikowanie fazy załączania obwodu HV podczas uruchomienia kompletnego elektrycznego układu napędowego zamontowanego w autobusie. Procedura załączania zasilania rozpoczyna się od fazy wstępnego ładowania kondensatorów. Aktywowano cykl uruchomieniowy i zweryfikowano poprawność komunikacji poszczególnych sterowników oraz sekwencji oprogramowania sterującego. Za pomocą urządzenia CAN Vector VN 1610 zarejestrowano sygnały istotne z punktu widzenia załączania obwodu HV. Listę sygnałów z oprogramowania Vector CANalyzer fun 9.0.53 przedstawiono na rysunku 42.

		Name	y
<input checked="" type="checkbox"/>		IN3_K4_DISCharge_Cont_NC	Not_Active
<input checked="" type="checkbox"/>		Battery_DischargeMode_Enable	Active
<input checked="" type="checkbox"/>		U1_TrBattery_Input_DCVoltage [V]	737.9
<input checked="" type="checkbox"/>		Battery_ReadyToDrive	Active
<input checked="" type="checkbox"/>		IN5_K21_Minus_Cont	Active
<input checked="" type="checkbox"/>		IN6_K22_Minus_Cont	Active
<input checked="" type="checkbox"/>		IN7_K3_PRECharge_Cont	Active
<input checked="" type="checkbox"/>		U2_DCLink_Voltage [V]	728.5
<input checked="" type="checkbox"/>		IN2_K1_Plus_Cont_NO	Active
<input checked="" type="checkbox"/>		HVBox_HV_Ready	Not Active
<input checked="" type="checkbox"/>		IN7_j1_Current_Battery [A]	-2.439999999999983
<input checked="" type="checkbox"/>		i1_TrBattery_Input_Current [A]	0

Rys. 42. Lista sygnałów istotnych z punktu widzenia załączania obwodu HV – zrzut ekranu z oprogramowania Vector CANalyzer fun 9.0.53

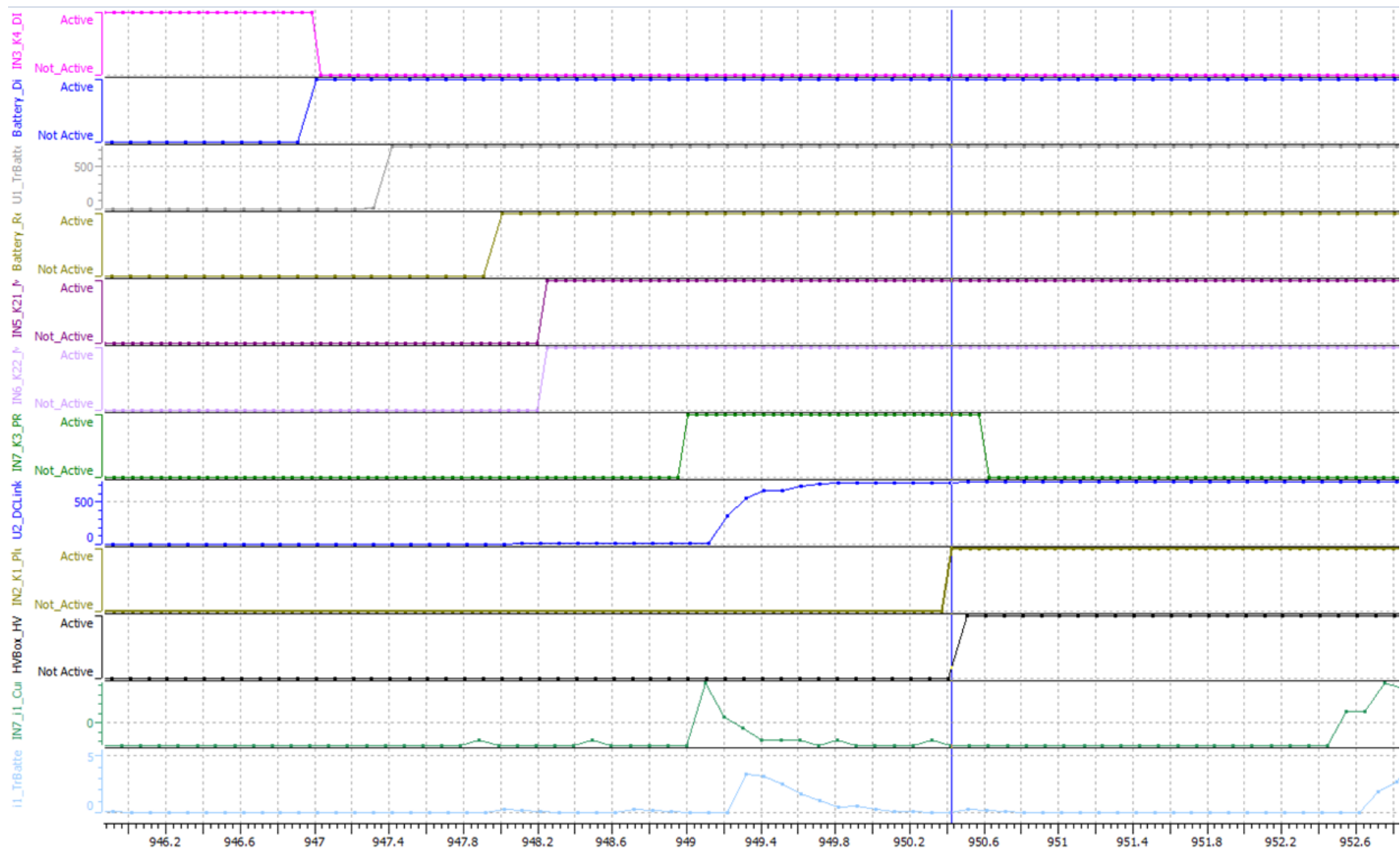
Źródło: opracowanie własne

Poniżej przedstawiono opis wymienionych na rys. 42 sygnałów:

- **IN3\_K4\_DISCharge\_Cont\_NC** – status trybu rozładowania (Not\_Active => stycznik K4 w stanie rozwartym),
- **Battery\_DischargeMode\_Enable** – żądanie trybu rozładowania akumulatorów trakcyjnych (Active => główny komputer napędowy wysyła żądanie trybu rozładowania do sterownika akumulatorów trakcyjnych),
- **U1\_TrBattery\_Input\_DCVoltage[V]** – wartość napięcia zmierzona za pomocą przetwornika LEMu1,

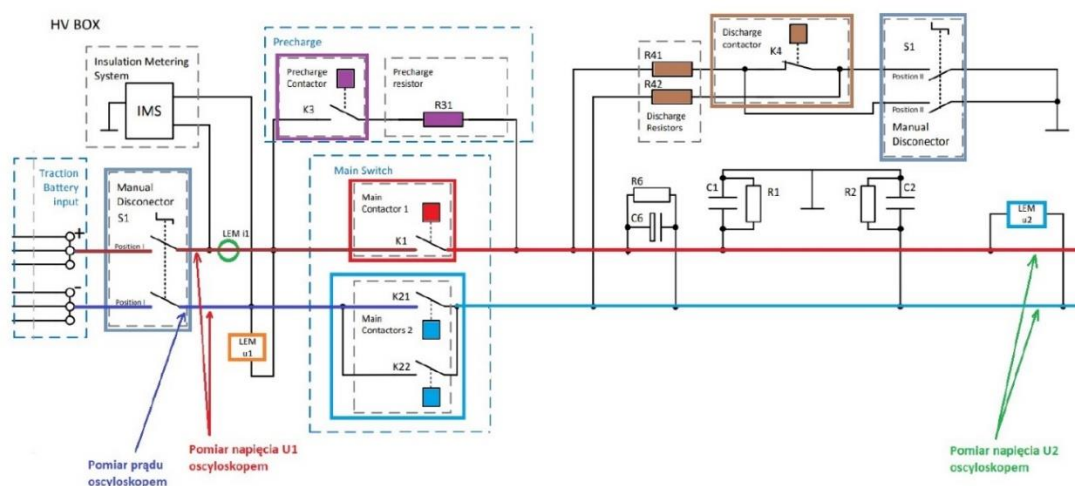
- **Battery\_ReadyToDrive** – potwierdzenie załączenia styczników akumulatorów trakcyjnych oraz skonfigurowania trybu rozładowania (Active => sterownik akumulatorów wysyła informację o potwierdzeniu skonfigurowania trybu rozładowania);
- **IN5\_K21\_Minus\_Cont** – potwierdzenie załączenia stycznika minusowego potencjału akumulatorów trakcyjnych K21 (Active => stycznik K21 załączony),
- **IN6\_K22\_Minus\_Cont** – potwierdzenie załączenia stycznika minusowego potencjału akumulatorów trakcyjnych K22 (Active => stycznik K22 załączony),
- **IN7\_K3\_PRECharge\_Cont** – potwierdzenie załączenia stycznika wstępnego ładowania K23 (Active => stycznik wstępnego ładowania K3 załączony)
- **U2\_DCLink\_Voltage[V]** – liczbowa wartość napięcia zmierzona za pomocą przetwornika LEMu2,
- **IN2\_K1\_Plus\_Cont\_NO** – potwierdzenie załączenia stycznika plusowego potencjału akumulatorów trakcyjnych K1 (Active => stycznik K1 załączony),
- **HVBox\_HV\_Ready** – potwierdzenie prawidłowego załączenia zasilania HV przez rozdzielnicę „HV BOX” (Not Active => obwód HV nie jest załączony lub trwa tryb wstępnego ładowania),
- **IN7\_i1\_Current\_Battery[A]** – wartość natężenia prądu zmierzona za pomocą przetwornika LEMi1 odczytana przez sterownik w rozdzielnicy (wartość przed kalibracją),
- **i1\_TrBattery\_Input\_Current[A]** – wartość natężenia prądu i1 odczytana przez Główny Komputer Napędu (wartość po kalibracji), a otrzymana za pomocą magistrali CAN od sterownika zamontowanego w rozdzielnicy.

Sekwencję załączania obwodu HV przedstawiono na rysunku 43. Uzyskanie statusu sygnału *HVBox\_HV\_Ready = Active* potwierdza poprawność przejścia procedury załączania obwodu HV, co jest jednoznaczne z potwierdzeniem poprawności wykonania oprogramowania oraz konfiguracji komunikacji CAN w tym zakresie.



Rys. 43. Wybrane sygnały z magistrali CAN zarejestrowane za pomocą CAN Vector VN 1610 w trakcie fazy wstępnego ładowania kondensatorów  
Źródło: opracowanie własne

Wiedząc, że proces załączenia obwodu HV przebiega prawidłowo pod względem sekwencji, w trakcie jego trwania w rozdzielniczy „HV BOX” wykonano pomiary napięć i prądu za pomocą oscyloskopów. Wyniki pozwoliły zweryfikować czy wartości rzeczywiste są zgodne z obliczeniami przeprowadzonymi w podrozdziale 3.4.2. Miejsce podłączenia sond oscyloskopów oznaczono strzałkami na schemacie zastępczym rozdzielniczy „HV BOX” (rys. 44).



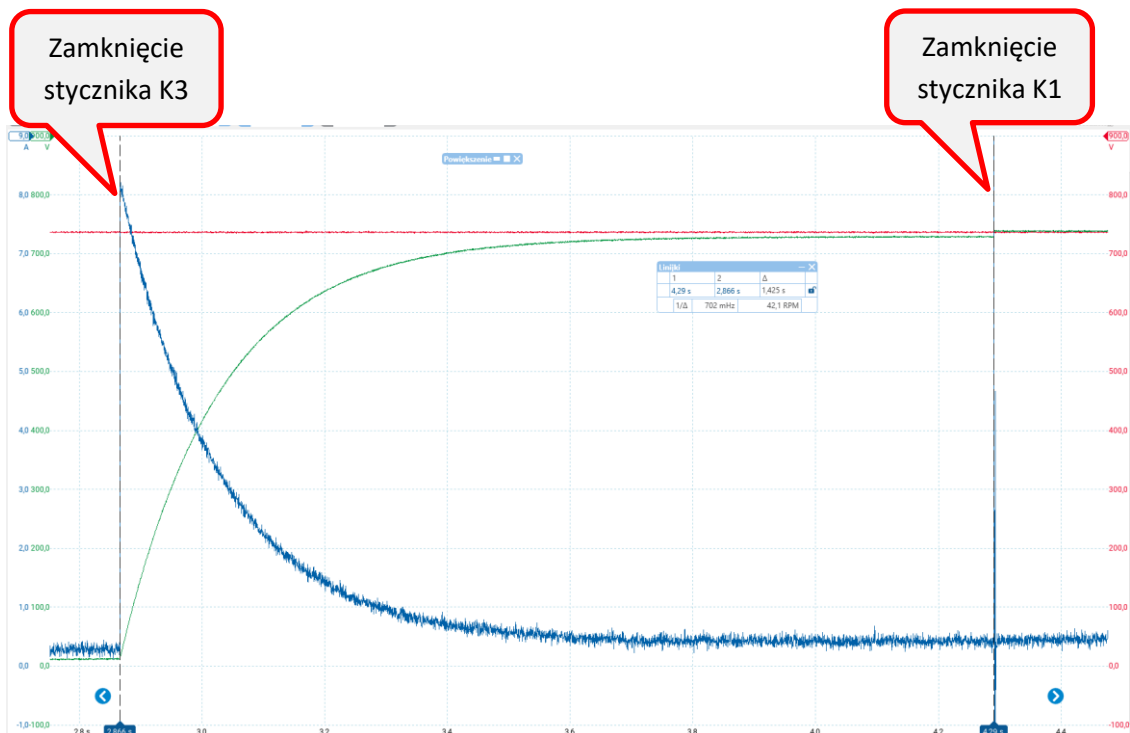
**Rys. 44.** Fragment schematu zastępczego rozdzielniczy „HV BOX” stosowanej w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric z zaznaczeniem podłączenia sond pomiarowych oscyloskopów  
Źródło: opracowanie własne

Pomiary wykonywano dwoma oscyloskopami:

- oscyloskop komputerowy PICOSCOPE 4444 z różnicowymi sondami napięciowymi oraz sondą prądową TA301 200/2000 A,
- oscyloskop Tektronix TPS 2014 z sondą prądową A622 100 A.

Przenalizowano pomiary napięć i natężenia prądu podczas fazy wstępnego ładowania kondensatorów wykonane Oscyloskopem PC PICOSCOPE 4444. W momencie rozpoczęcia badań, napięcie zasilania, a więc napięcie akumulatorów trakcyjnych wynosiło 737 V. Po zamknięciu stycznika wstępnego ładowania kondensatorów K3, natężenie prądu wzrosło do ok. 8 A. Stosując prawo Ohma łatwo obliczyć rezystancję rezystora wstępnego ładowania. Wynosi ona ok. 92  $\Omega$ . Uwzględniając, że zastosowano rezystor o rezystancji 100  $\Omega$  i tolerancji rezystancji na poziomie  $\pm 10\%$  można potwierdzić, że wartości te zawierają się w przedziale przewidywanym na wcześniejszym etapie projektowania. W dalszej części badania, natężenie prądu maleje do wartości bliskich 0 A wraz ze wzrostem poziomu naładowania kondensatorów zlokalizowanych w urządzeniach energoelektronicznych oraz w ramach filtra zastosowanego

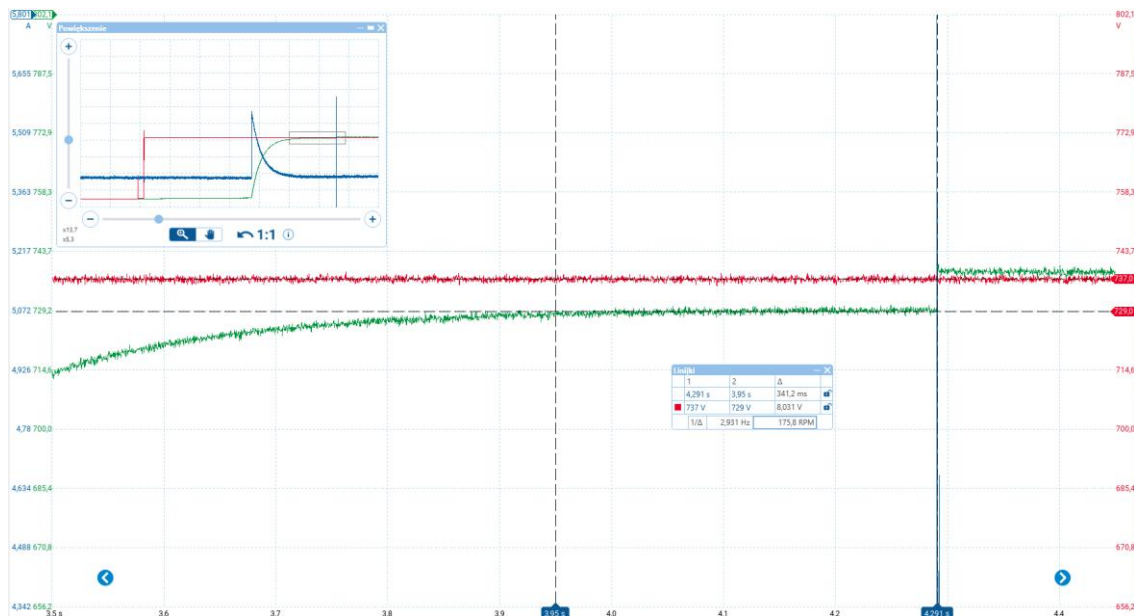
w rozdzielniczy „HV BOX”. Po czasie 1,425 s dochodzi do załączenia głównego stycznika K1 i rozłączenia stycznika wstępnego ładowania K3. Czas ten jest dłuższy od minimalnego czasu zakładanego na etapie projektowania i wynoszącego 1 s, co spełnia wymagania wystarczającego poziomu naładowania kondensatorów w trakcie fazy wstępnego ładowania. W rezultacie natężenie prądu przy którym następuje załączenie stycznika K1, a także impuls prądowy występujący bezpośrednio po jego załączeniu, powinny być mniejszej wartości niż wyliczono w podrozdziale 2.4.2. Czas trwania fazy wstępnego ładowania wynoszący 1,425 s jest efektem zastosowania dodatkowego programowego zabezpieczenia oraz opóźnień wynikających z czasu przetwarzania pomiarów i czasów komunikacji pomiędzy sterownikami. Wspomniane programowe zabezpieczenie polega na przyzwoleniu załączenie stycznika K1 wtedy gdy przyrost napięcia zmierzonego za pomocą przetwornika napięciowego LEMu2 będzie mniejsze niż 3 V w ciągu ostatnich 200 ms. Gwarantuje to, że stycznik K1 nie zostanie załączony przed upływem czasu równego  $5\tau$ . Przebieg napięć i natężenia prądu w trakcie fazy wstępnego ładowania kondensatorów przedstawiono na rysunku 45.



**Rys. 45.** Przebiegi napięć i natężenia prądu podczas fazy wstępnego ładowania zmierzone za pomocą oscyloskopu PICOSCOPE 4444 w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric

Źródło: opracowanie własne

Jak wspomniano w podrozdziale 2.4.2, ze względu na występowanie rezystorów wolnego rozładowania montowanych równolegle do kondensatorów, na rezystorze wstępnego ładowania dochodzi do ok. 1% spadku napięcia. Objawia się to tym, że kondensatory nie zostają naładowane do poziomu napięcia zasilania. W rezultacie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że w momencie załączenia stycznika K1 występuje ok. 8 V różnicy pomiędzy napięciem zasilania  $U_1$  a napięciem kondensatorów  $U_2$ . Brak dalszego dynamicznego narastania napięcia kondensatorów jest dowodem na istnienie ok. 1% spadku napięcia na rezystorze wstępnego ładowania, co wyjaśniono w podrozdziale 2.4.2. Potwierdzono tym samym, że rezystancja zastępcza rezystorów wolnego rozładowania wynosi ok. 10 k $\Omega$ . Wspomniane różnice napięć widoczne na wykresie z oscyloskopu, zaprezentowano na rysunku 46.



**Rys. 46.** Wykresy napięć zasilania i kondensatora w trakcie załączenia stycznika K1  
Źródło: opracowanie własne

W ostatniej fazie badań dokonano pomiaru natężenia prądu występującego w trakcie załączenia stycznika K1. Pomiar wykonano oscyloskopem Tektronix TPS 2014 z sondą prądową A622 100A. W chwili wykonywania pomiaru, tj. w momencie załączenia stycznika K1, napięcie zasilania  $U_1$  wynosiło 737 V natomiast napięcie  $U_2 = 729$  V. Zmierzony impuls prądowy osiągnął chwilową wartość maksymalną 96,8 A. Długość trwania tego impulsu prądowego wynosiła poniżej 400  $\mu$ s. Wynik pomiaru zarejestrowany za pomocą oscyloskopu przedstawiono na rysunku 47.





**Rys. 47.** Pomiar przebiegu prądu w momencie zamknięcia stycznika K1  
Źródło: opracowanie własne

Maksymalna zmierzona wartość natężenia prądu występująca w trakcie załączania stycznika K1 jest mniejsza od obliczonej w podrozdziale 3.4.2. i wynoszącej  $I_c(t) = 156,25$  A. Jest to rezultat niższego od obliczeniowego napięcia zasilania  $U_1$  w trakcie dokonywania pomiaru oraz dłuższego od obliczeniowego czasu trwania fazy wstępnego ładowania. Na wcześniejszym etapie projektu założono, że czas wstępnego ładowania trwający od 1 do 2 s jest czasem akceptowalnym, a maksymalny impuls prądowy nie może przekroczyć wartości 156,25 A. Wyniki badań eksperymentalnych potwierdzają zgodność z założeniami projektowymi.

#### 4.2.2. Weryfikacja poprawności doboru silnika i falownika trakcyjnego

Testy jezdne autobusu prototypowego Solaris Urbino 9 LE electric rozpoczęto od weryfikacji parametrów trakcyjnych, wyznaczonych w ramach obliczeń i analiz w podrozdziale 2.2.2. Pierwszym etapem badań było wyznaczenie współczynników oporów toczenia  $f_0$  oraz powietrza  $c_x$  metodą próby wybiegu dla potwierdzenia, że współczynniki nie wykraczają poza założone podczas obliczeń, maksymalne wartości literaturowe. Dla realizacji badań należy właściwie przygotować pojazd. Na potrzeby prawidłowego wykonania pomiarów należy wyłączyć wszystkie programowe funkcje hamowania silnika trakcyjnego, działające podczas jazdy.

Dokonano próby wybiegu prototypem autobusu Solaris Urbino 9 LE electric w pełni obciążonym, tj. do masy 16000 kg. Przeprowadzono je wielokrotnie na płaskiej asfaltowej nawierzchni w dwóch kierunkach, dla wyeliminowania wpływu ewentualnych nierówności drogi oraz siły wiatru. Pomiary prędkości i czasu wykonano za pomocą urządzeń GPS Vbox Racelogic oraz CAN Vector VN 1610.

Dla niskich prędkości początkowych, zawierających się w zakresie  $10-15 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ , opory powietrza są pomijalnie małe w porównaniu do oporów toczenia i można je przyrównać do zera. Podobnie można założyć, że dla takich prędkości, siły oporu toczenia  $F_t$  są stałe [48] i opisane wzorem (31).

$$F_t = \delta \cdot m \cdot a_{\text{sr}10-0} \quad (31)$$

gdzie:  $F_t$  – siła oporu toczenia [N],  $m$  – masa pojazdu [kg],  $\delta$  – współczynnik mas wirujących;  $a_{\text{sr}10-0}$  – średnie przyspieszenie pojazdu w trakcie wybiegu z  $10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  do  $0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  [ $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ]

Dla wyliczenia średniego opóźnienia  $a_{\text{sr}10-0}$  skorzystano ze wzoru (13). Wartość współczynnika mas wirujących  $\delta = 1,04$  dla masy pojazdu  $m = 16000$  kg wyliczono w podrozdziale 2.2.2 wg wzoru (16). Na podstawie powyższych założeń, można uprościć wzór na współczynnik oporu toczenia  $f_0$  do postaci opisanej wzorem (32).

$$f_0 = \frac{F_t}{m \cdot g} \quad (32)$$

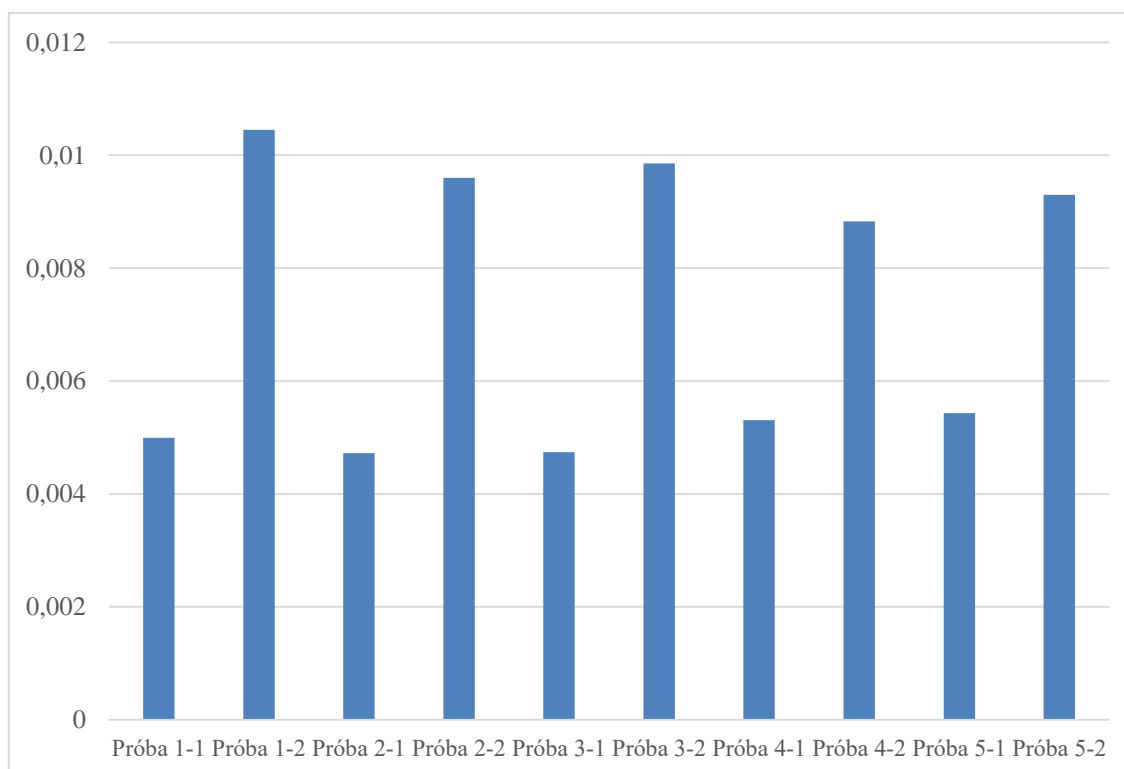
gdzie:  $f_0$  – współczynnik oporu toczenia przy prędkości  $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ;  $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ]

Wyniki pomiarów wybiegu z prędkości  $10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  do  $0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  oraz wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 20, a wyniki w postaci graficznej obliczonego, na podstawie prób wybiegu, współczynnika oporu toczenia  $f_0$  przedstawiono na rysunku 48. Zaobserwowano znaczące różnice wartości, w zależności od kierunku jazdy podczas wykonywanej próby wybiegu związane z główną wadą opisywanej metody tj. wpływem jakości nawierzchni oraz wiatru na wyniki pomiarów. Dla zniwelowania tych różnic wprowadzono przejazdy w obu kierunkach i dokonano uśrednienia wszystkich pomiarów. Otrzymano średnią wartość współczynnika oporu toczenia  $f_{0 \text{ sr}} = 0,00732$ . Zestawiając tę wartość z założeniami przyjętymi w podrozdziale 2.2.2, tj. że dla pojazdu użytkowego, współczynnik oporu toczenia opony na asfalcie wynosi od 0,006 do 0,01 [36], potwierdzono, że wyznaczona na podstawie prób wybiegu wartość zawiera się w tym przedziale.

**Tabela 20.** Wyniki pomiarów i obliczeń dla wybiegu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric z 10 do 0  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$

Oznaczenie próby (numer-kierunek)	Czas $t_{10-0}$ [s]	Śr. opóźnienie $a_{\text{sr}10-0}$ [ $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ]	Siła oporu toczenia $F_t$ [N]	Współczynnik oporu toczenia $f_0$
1-1	59,2	0,04692	784	0,00499
1-2	28,3	0,09815	1640	0,01045
2-1	62,6	0,04437	741	0,00472
2-2	30,8	0,09019	1506	0,00960
3-1	62,4	0,04452	744	0,00474
3-2	30,0	0,09259	1546	0,00985
4-1	55,7	0,04987	833	0,00531
4-2	33,5	0,08292	1385	0,00883
5-1	54,4	0,05106	853	0,00543
5-2	31,8	0,08735	1459	0,00930

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 48.** Zestawienie wartości współczynników oporu toczenia  $f_0$  obliczonego dla każdej z prób wybiegu  
Źródło: opracowanie własne

Siły oporów powietrza  $F_p$  nie można wyliczyć wprost na podstawie metody wybiegu. Należy wyliczyć siłę oporu całkowitego  $F_{\text{total}}$ , która na płaskiej nawierzchni składa się z oporów toczenia i właśnie oporów powietrza. Należy przy tym pamiętać, że siły oporu toczenia  $F_t$  dla wyższych prędkości zmieniają się zgodnie ze wzorem (33) [35]:

$$F_t = m g f_0 \left( 1 + \left( 0,0216 \cdot \frac{v}{|\hat{v}|} \right)^2 \right) \quad (33)$$

gdzie:  $v$  – prędkość pojazdu [ $\frac{m}{s}$ ],  $|\hat{v}|$  – wartość wektora prędkości [ $\frac{m}{s}$ ]

Siła oporu powietrza  $F_p$  przedstawia się natomiast wzorem (34) [35]:

$$F_p = \frac{1}{2} \rho A c_x v^2 \quad (34)$$

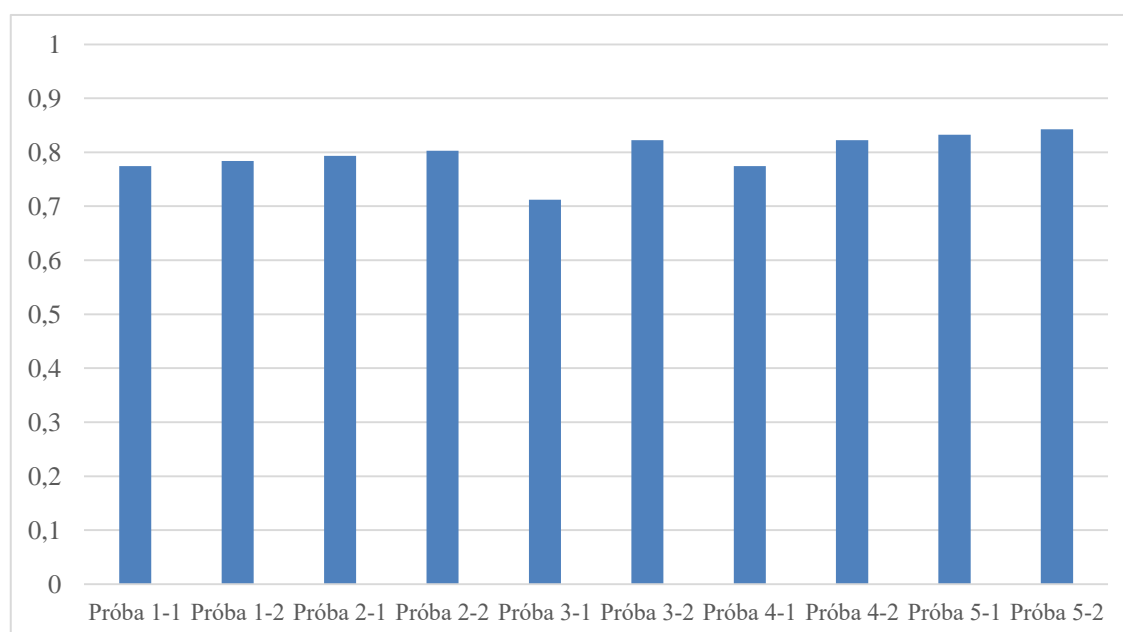
gdzie:  $F_p$  – siła oporu powietrza [N],  $\rho$  – gęstość powietrza [ $\frac{kg}{m^3}$ ],  $A$  – pole powierzchni czołowej pojazdu [ $m^2$ ],  $c_x$  – współczynnik oporu powietrza

Wzór ten odnosi się tylko do konwekcyjnego (inercyjnego) zachowania powietrza, z pominięciem oddziaływań dyfuzyjnych czyli związanych z lepkością obiektu. Im prędkość badanego obiektu jest niższa tym udział tych drugich jest większy [57]. Dla zredukowania wpływu oddziaływań dyfuzyjnych na wyznaczenie współczynnika oporów powietrza, pomiar opóźnienia wykonano podczas testu wybiegu przy maksymalnych prędkościach testowanego pojazdu, tj. z prędkości  $80 \frac{km}{h}$  do  $70 \frac{km}{h}$ . Wyliczony zgodnie ze wzorem (33) opór toczenia dla prędkości średniej mierzonego zakresu, tj.  $75 \frac{km}{h}$  ( $20,83 \frac{m}{s}$ ) i wyznaczonego współczynnika oporów toczenia  $f_{0\ sr} = 0,00732$  wynosi  $F_t = 1382$  N. W rezultacie zrealizowanych pomiarów czasu trwania zmiany prędkości z  $80 \frac{km}{h}$  do  $70 \frac{km}{h}$ , przy użyciu wzoru (13) obliczono opóźnienie  $a_{sr80-70}$ . Zgodnie ze wzorem (15), przy zerowej sile napędowej z silnika trakcyjnego, siły oporów ruchu  $F_{total}$  są równe ujemnej sile bezwładności pojazdu  $F_B$ . Siły oporów ruchu wyznaczono ze wzoru (12). Na płaskiej nawierzchni siła oporów powietrza  $F_p$  jest różnicą siły oporu całkowitego  $F_{total}$  i siły oporów toczenia  $F_t$  dla danej prędkości pojazdu. Przekształcając wzór (34) obliczono współczynnik oporów powietrza  $c_x$ . Wyniki badań próby wybiegu z prędkości  $80 \frac{km}{h}$  do  $70 \frac{km}{h}$  oraz wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 21, a wyniki w postaci graficznej obliczonego, na podstawie prób wybiegu, współczynnika oporu powietrza  $c_x$  przedstawiono na rysunku 49.

**Tabela 21.** Wyniki badań próby wybiegu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric z  $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  do  $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  oraz obliczeń  $a_{\text{sr}80-70}$ ,  $F_{\text{total}}$ ,  $F_p$ ,  $c_x$

Oznaczenie próby (numer-kierunek)	Czas $t_{80-70}$ [s]	Śr. opóźnienie $a_{\text{sr}80-70}$ [ $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ]	Siła oporów ruchu $F_{\text{total}}$ [N]	Siła oporu powietrza $F_p$ [N]	Współczynnik oporu powietrza $c_x$
1-1	15,5	0,17921	2994	1612	0,77442
1-2	15,4	0,18038	3013	1632	0,78376
2-1	15,3	0,18155	3033	1651	0,79322
2-2	15,2	0,18275	3053	1671	0,80280
3-1	16,2	0,17147	2864	1483	0,71228
3-2	15,0	0,18519	3094	1712	0,82235
4-1	15,5	0,17921	2994	1612	0,77442
4-2	15,0	0,18519	3094	1712	0,82235
5-1	14,9	0,18643	3114	1733	0,83232
5-2	14,8	0,18769	3135	1754	0,84243

Źródło: opracowanie własne



**Rys. 49.** Zestawienie wartości współczynników oporu powietrza  $c_x$  obliczonego dla każdej z prób wybiegu

Źródło: opracowanie własne

Analogicznie jak dla współczynnika oporów toczenia, również dla współczynnika oporów powietrza  $c_x$ , uśredniono wartości przejazdów wykonywanych w dwóch kierunkach i otrzymano  $c_{x\text{sr}} = 0,79603$ . Zestawiając tę wartość z założeniami przyjętymi w podrozdziale 2.2.2, tj. że współczynnik oporu powietrza autobusu zawiera się

w przedziale 0,6-0,8 [37], potwierdzono, że wyznaczona na podstawie prób wybiegu wartość spełnia to założenie.

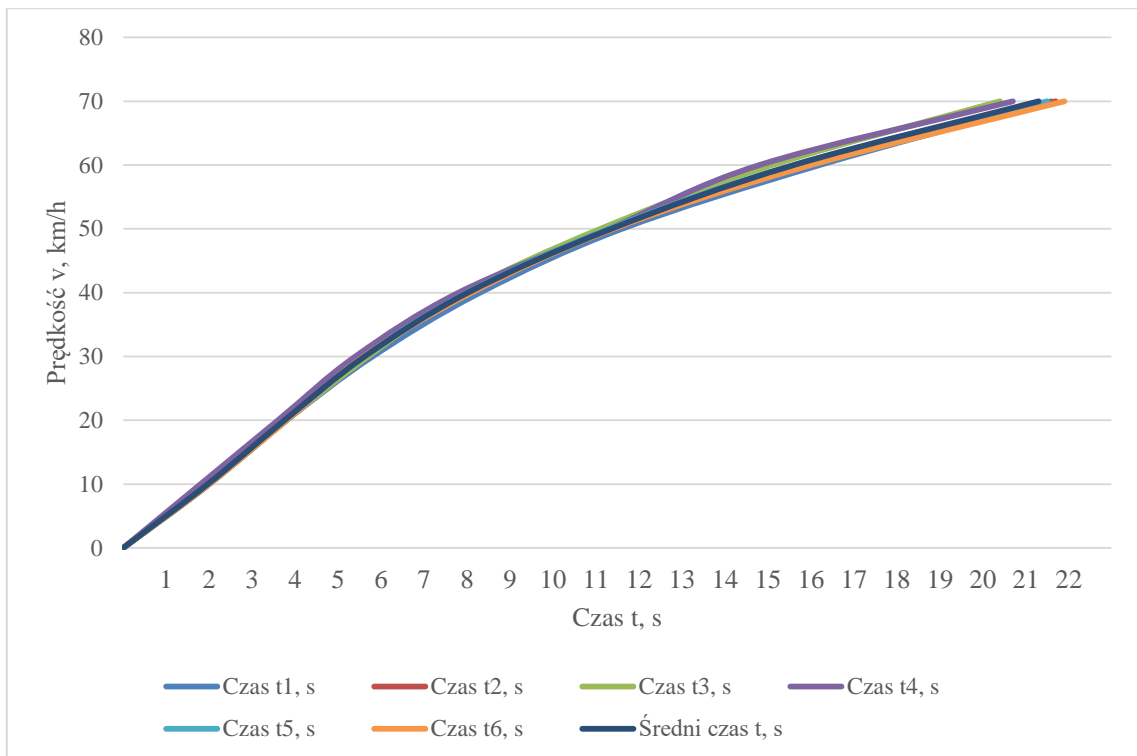
W trakcie testów jezdnych prototypu zweryfikowano czy pojazd osiąga przyspieszenia zgodne z obliczeniami wykonanymi w podrozdziale 2.2.5. Wykonano sześć przejazdów na płaskiej nawierzchni pojazdem w pełni obciążonym (16000 kg) przyspieszając od prędkości 0 do  $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  z maksymalnym przyspieszeniem, rejestrując czas trwania osiągnięcia poszczególnych poziomów prędkości z krokiem wynoszącym  $10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Wyniki pomiarów, wraz z uśrednioną wartością czasu trwania ze wszystkich przejazdów  $t$ , przedstawiono w tabeli 22.

**Tabela 22.** Zestawienie pomiarów czasu dla przyspieszeń pojazdu Solaris Urbino 9 LE electric od 0 do  $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  – autobus obciążony do masy 16000 kg

Przyspieszenia od 0 do $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ - pomiar czasu							
Prędkość $v \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]$	Czas $t1$ [s]	Czas $t2$ [s]	Czas $t3$ [s]	Czas $t4$ [s]	Czas $t5$ [s]	Czas $t6$ [s]	Średni czas $t$ [s]
0	0	0	0	0	0	0	0
10	2,0	2,0	2,0	1,8	2,0	2,0	2,0
20	3,8	3,7	3,8	3,6	3,8	3,8	3,8
30	5,8	5,6	5,7	5,4	5,6	5,6	5,6
40	8,3	8,0	7,9	7,8	8,0	8,1	8,0
50	11,6	11,4	11,1	11,3	11,3	11,4	11,4
60	16,2	15,9	15,1	14,8	15,6	16,0	15,6
70	21,6	21,7	20,4	20,7	21,5	21,9	21,3

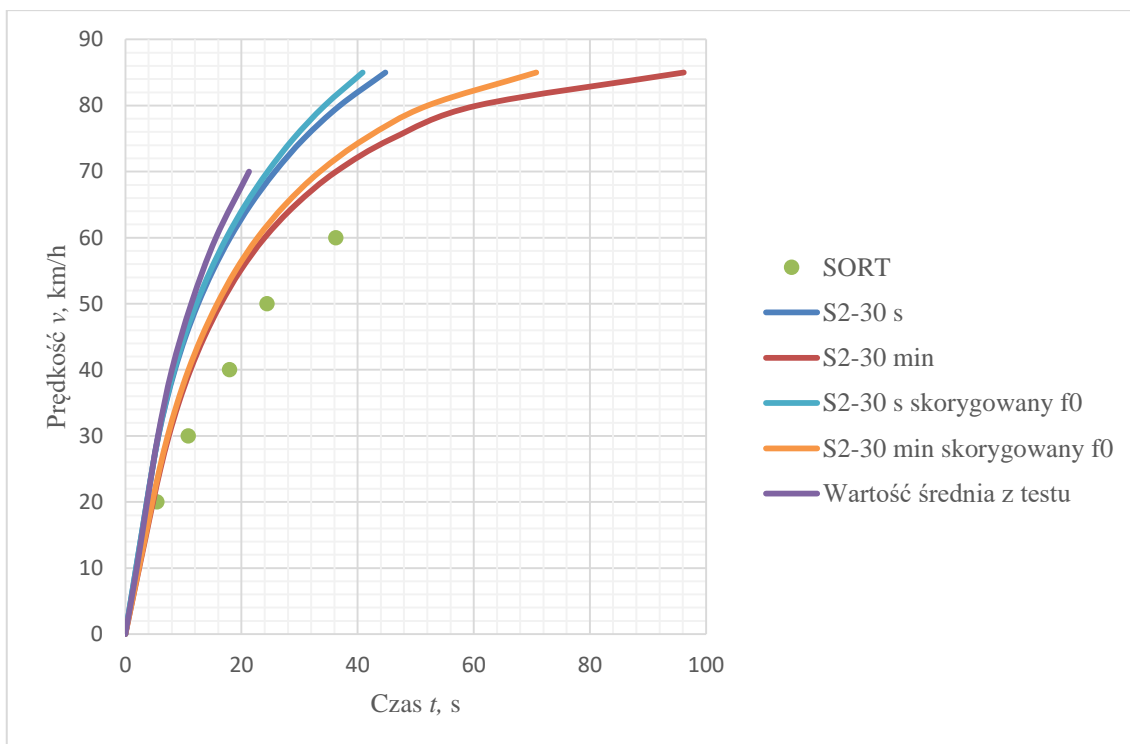
Źródło: opracowanie własne

Dla zwizualizowania wyników pomiarów oraz możliwości oceny ich powtarzalności, zestawiono je na wspólnym wykresie (rys. 50). Na podstawie wykresów z rysunku 50 zaobserwowano, że wszystkie przejazdy były powtarzalne (odchylenia standardowe pomiaru czasu dla wszystkich prędkości wynosiły poniżej 4%). Należy więc do dalszych analiz przyjąć wartości średnie ze wszystkich prób. Dla potwierdzenia zgodności wyników testu z symulacjami wykonanymi w podrozdziale 2.2.5. i przedstawionymi na rysunkach 18 i 19 zestawiono je ze średnimi wartościami czasu przejazdów oraz przyspieszeniami średnimi z tych prób wyznaczonymi za pomocą wzoru (17).

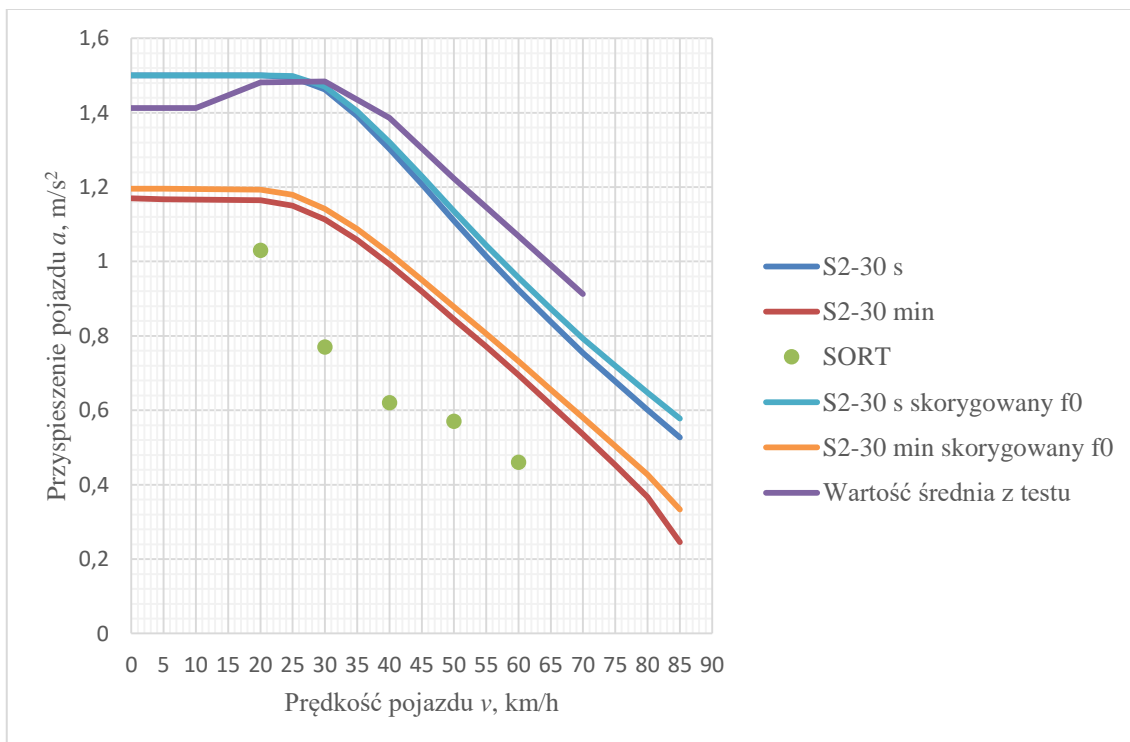


**Rys. 50.** Wykresy z pomiarów czasu dla przyspieszeń pojazdu Solaris Urbino 9 LE electric od  $0 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  do  $70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  – autobus obciążony do masy 16000 kg  
Źródło: opracowanie własne

Należy jednak pamiętać, że w podrozdziale 2.2.5. do symulacji przyjęto najwyższe wartości określone w literaturze dla współczynników oporu powietrza  $c_x = 0,8$  i toczenia  $f_0 = 0,01$ . Z obliczeń na podstawie przeprowadzonych badań metodą próby wybiegu ustalono, że dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric współczynniki te przyjmują wartości średnie  $c_{x\text{sr}} = 0,79603$  oraz  $f_{0\text{sr}} = 0,00732$ . Współczynnik oporów powietrza przyjmuje wartość bardzo zbliżoną do uwzględnionej w symulacji, ale współczynnik oporów toczenia jest mniejszy od wcześniej przyjętego. Dlatego należy wprowadzić korektę w symulacjach. W zestawieniu wykresów przedstawiono również wyniki symulacji ze skorygowaną wartością współczynnika oporów toczenia  $f_0 = 0,007$ . Całościowe zestawienie wykresów przedstawiono na rysunkach 51 i 52.



**Rys. 51.** Wyniki symulacji zmiany prędkości pojazdu w czasie dla trybów pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s zestawione z wartościami prędkości wynikającymi z SORT oraz średnimi wartościami z badań autobusu ( $m = 16000$  kg; R19,5 265/70;  $U = 650$  V DC,  $\alpha = 0\%$ )  
 Źródło: opracowanie własne



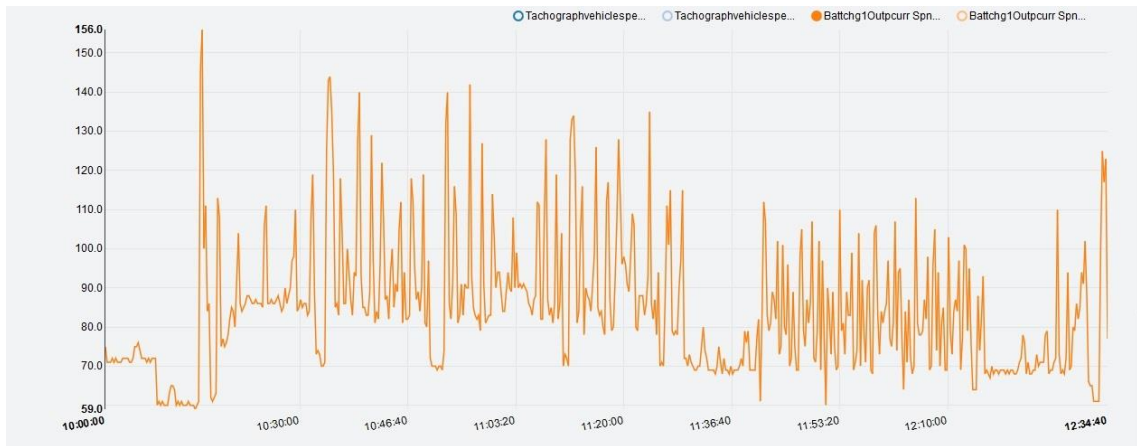
**Rys. 52.** Wyniki symulacji dla przyspieszenia średniego w funkcji prędkości dla trybów pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s zestawione z minimalnymi przyspieszeniami średnimi wg SORT oraz przyspieszeniami średnimi z badań autobusu ( $m = 16000$  kg; R19,5 265/70;  $U = 650$  V DC,  $\alpha = 0\%$ )  
 Źródło: opracowanie własne



Próby przeprowadzono z przerwami, podczas których temperatura silnika i falownika mogły spaść do stabilnych wartości, wyniki testu należy więc zestawić z symulacjami dla trybu pracy dorywczej silnika S2-30 s. Z wykresów zaobserwowano, że wartości średnie przyspieszeń podczas testów, w pierwszej fazie przyspieszania (do  $10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ) są niższe niż wyznaczono w symulacji. Może być to efektem dokładności pomiarowej, która dla niskich wartości prędkości i czasu trwania ma większy wpływ na wyniki pomiarów lub opóźnienia w komunikacji i przetwarzaniu danych przez sterowniki. W kolejnym etapie (powyżej  $10 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ) wartość przyspieszenia rośnie do  $1,48 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ , czyli wartości zbliżonej do programowego ograniczenia wprowadzonego przez producenta falownika i wynoszącego  $1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ . W późniejszym etapie (powyżej  $30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ) wartość przyspieszenia zaczyna spadać, jednak następuje to przy prędkości ok.  $5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  wyższej niż w wyniku to z symulacji. Wraz z narastaniem prędkości pojazdu, wartość przyspieszenia średniego z testów spada, ale również wolniej niż wynika to z symulacji. Powodem tego mogą być dokładności w charakterystyce trakcyjnej zestawu silnik-falownik, dokładności w wyznaczeniu współczynników oporów powietrza i toczenia, dokładności pomiarowe podczas testu jak i kombinacja wszystkich wymienionych. Różnice te nie są duże i wynoszą maksymalnie ok.  $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  w rezultacie zwiększając przyspieszenie pojazdu względem przeprowadzonych symulacji. Na podstawie pomiarów potwierdzono, że autobus spełnia wymagania trakcyjne, postawione w początkowej fazie projektu.

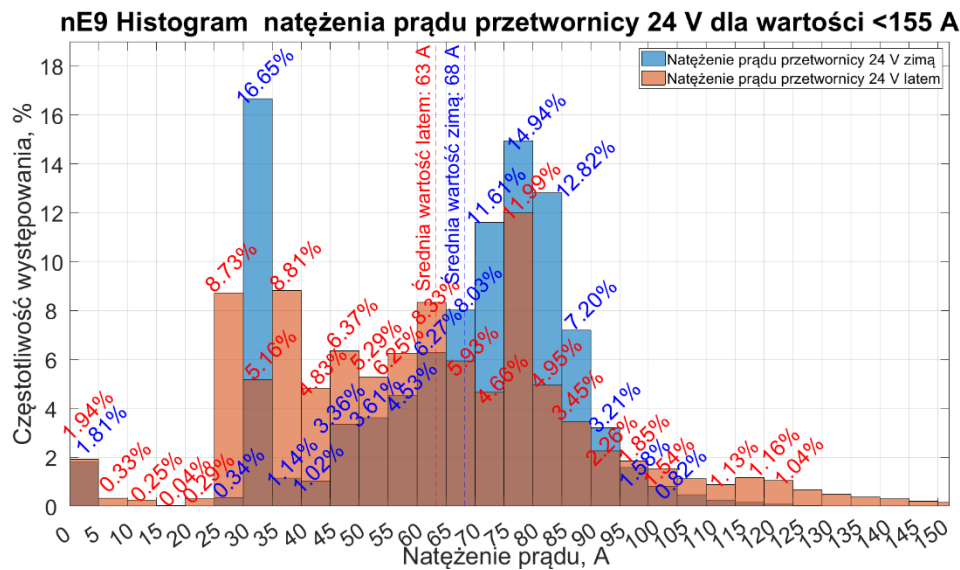
#### **4.2.3. Weryfikacja poprawności doboru przetwornicy DC/DC 24 V**

Wszystkie nowe autobusy elektryczne marki Solaris wyposażone są w system telematyczny eSConnect, a więc logowane były parametry autobusu również podczas testów przyspieszania prototypowego Urbino 9 LE electric. Wykorzystano te dane do weryfikacji maksymalnych natężeń prądów płynących z przetwornicy DC/DC 24 V. Wykres natężenia prądu w czasie wykonywania testów przyspieszania przedstawiono na rysunku 53.

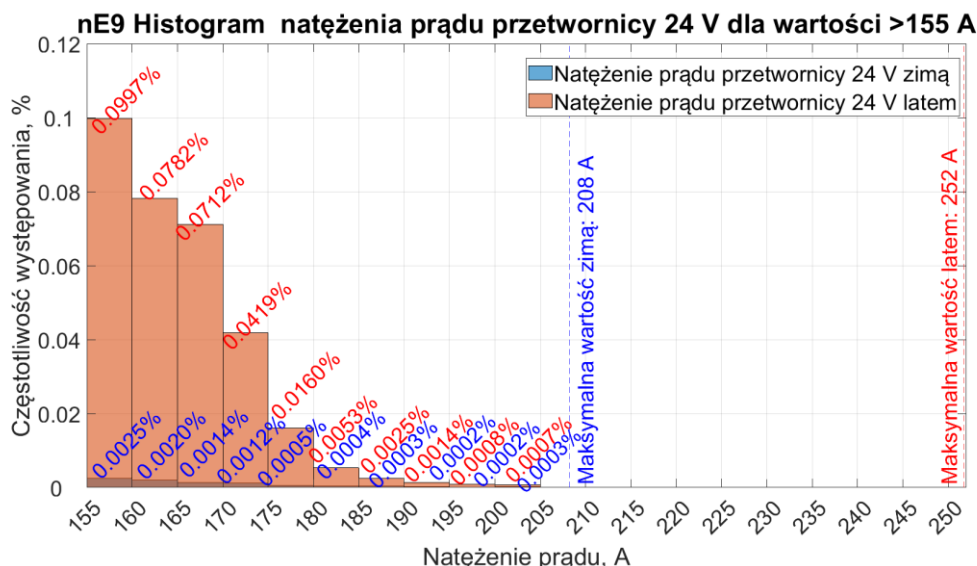


**Rys. 53.** Natężenia prądu płynącego z przetwornicy DC/DC 24 V autobusu Solaris E9 LE electric podczas testów przyspieszania, zarejestrowane przez system eSConnect  
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie analizy wykresu stwierdzono, że podczas testu najczęściej natężenie prądu wyjściowego przetwornicy oscylowało w zakresie 70 – 90 A, natomiast maksymalne natężenie prądu podczas testów nie przekroczyło wartości 160 A. W żadnym momencie nie osiągnięto maksymalnego natężenia prądu przetwornicy, które wynosi 200 A. Pomiary te udowodniły, że podczas użytkowania pojazdu nawet w sposób dynamiczny, tj. realizując test maksymalnego przyspieszenia, przetwornica DC/DC nie osiągnęła maksymalnej konstrukcyjnej wartości natężenia prądu. Warunki testu były specyficzne i krótkotrwałe. Nie pozwala to na jednoznaczne określenie czy przetwornicę dobrano właściwie do warunków eksploatacji autobusów miejskich w Europie. Dlatego dokonano analizy natężenia prądu pobieranego przez odbiorniki 24 V w trzech autobusach eksploatowanych w różnych polskich miastach w okresie zimy w grudniu oraz lata w sierpniu (sumarycznie ponad 2000 godzin pracy przetwornicy). Ze względu na brak pojazdów referencyjnych poza Polską, nie było możliwości zbadania zapotrzebowania na moc w innych warunkach klimatycznych. Maksymalne natężenie prądu przetwornicy wynosi 200 A i odczytując tylko te dane niemożliwe byłoby stwierdzenie czy i jak długo występują pobory prądu z akumulatorów pokładowych, dlatego autor rozprawy podczas analizy uwzględnił sumę sygnałów natężenia prądu przetwornicy oraz akumulatorów w trakcie, gdy przetwornica jest załączona. Wyniki histogramów przedstawiono na rysunkach 54 i 55.



**Rys. 54.** Histogram natężenia prądu pobieranego w instalacji 24 V DC grupy autobusów Solaris Urbino 9 LE electric w okresie zimy i lata  
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 55.** Histogram natężenia prądu > 155 A pobieranego w instalacji 24 V DC grupy autobusów Solaris Urbino 9 LE electric w okresie zimy i lata  
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie histogramów stwierdzono, że najczęściej występujące natężenie prądu pojawiają się w zakresie 30 – 35 A dla okresu zimy i 75 – 80 A dla okresu lata. Odchylenie standardowe dla okresu letniego wyniosło  $\sigma_{9,L} = 27,43$  A, a dla zimowego  $\sigma_{9,Z} = 20,37$  A. Wskazano również przedziały o wartości zbliżonej lub większej od 50%. Wyniki analizy statystycznej przedstawiono w tabeli 23.

**Tabela 23.** Analiza statystyczna zakresów natężenia prądu pobieranego przez autobus Solaris Urbino 9 LE electric dla okresu lata i zimy

Autobus i pora roku pomiarów	Najczęstszy przedział		Przedział ~50%		Przedział ~1 $\sigma$	
	Zakres prądu [A]	Częstotliwość występowania [%]	Zakres prądu [A]	Częstotliwość występowania [%]	Zakres prądu [A]	Częstotliwość występowania [%]
E9_Lato	75-80	11,99	25-65 45-85	53,77 53,77	35-90	70,86
E9_Zima	30-35	16,65	65-90	54,6	45-90	72,37

Źródło: opracowanie własne

Z rysunku 55 odczytano, że maksymalne wartości natężenia prądu występujące w zakresie pojedynczych zdarzeń osiągają do 208 A zimą i do 252 A latem. Mogą to być wartości chwilowe występujące podczas załączania odbiorników lub dłuższe, sporadycznie występujące zdarzenia. Wartości powyżej 200 A muszą być skompensowane przez akumulatory pokładowe, a więc należało zweryfikować, czy takie sytuacje nie występują zbyt często i nie trwają na tyle długo, żeby spowodować rozładowanie akumulatorów. Dlatego dokonano szczegółowej analizy czasu trwania obciążeń instalacji 24 V oraz ich liczby, z podziałem na zakresy po 10 A. Wyniki przedstawiono w tabeli 24 (dla okresu lata) i 25 (dla okresu zimy).

**Tabela 24.** Analiza zdarzeń obciążenia natężeniem prądu > 150 A dla autobusów Solaris Urbino 9 LE electric dla miesiąca sierpnia

Zakres, A	Liczba zdarzeń	Maks. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Min. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Średni czas zdarzenia, hh:mm:ss	Mediana czasu zdarzenia, hh:mm:ss
150-160	4702	00:02:20.0000	00:00:00.5000	00:00:02.6944	00:00:01.0000
160-170	2494	00:02:11.0000	00:00:00.5000	00:00:02.9302	00:00:01.0000
170-180	1329	00:01:14.0000	00:00:00.5000	00:00:02.1316	00:00:01.0000
180-190	335	00:00:11.5000	00:00:00.5000	00:00:01.1447	00:00:01.0000
190-200	97	00:00:04.0000	00:00:00.5000	00:00:01.1134	00:00:01.0000
200-210	22	00:00:03.5000	00:00:00.5000	00:00:01.5227	00:00:01.5000
210-220	4	00:00:03.0000	00:00:00.5000	00:00:01.7500	00:00:01.7500
220-230	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000
230-240	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000
240-250	1	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000	00:00:00.5000
250-260	1	00:00:02.5000	00:00:02.5000	00:00:02.5000	00:00:02.5000
>260	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000

Źródło: opracowanie własne

**Tabela 25.** Analiza zdarzeń obciążenia natężeniem prądu > 90 A dla autobusów Solaris Urbino 9 LE electric dla miesiąca grudzień

Zakres, A	Liczba zdarzeń	Maks. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Min. czas zdarzenia, hh:mm:ss	Średni czas zdarzenia, hh:mm:ss	Mediana czasu zdarzenia, hh:mm:ss
90-100	62695	00:04:21.5000	00:00:00.5000	00:00:01.9080	00:00:01.0000
100-110	23710	00:03:57.5000	00:00:00.5000	00:00:01.3512	00:00:01.0000
110-120	8649	00:03:00.0000	00:00:00.5000	00:00:01.2000	00:00:01.0000
120-130	3012	00:00:33.5000	00:00:00.5000	00:00:01.0444	00:00:00.5000
130-140	1069	00:00:06.5000	00:00:00.5000	00:00:00.8685	00:00:00.5000
140-150	482	00:00:04.5000	00:00:00.5000	00:00:00.8412	00:00:00.5000
150-160	220	00:00:03.0000	00:00:00.5000	00:00:00.7613	00:00:00.5000
160-170	108	00:00:03.0000	00:00:00.5000	00:00:00.7962	00:00:00.5000
170-180	48	00:00:04.0000	00:00:00.5000	00:00:00.9062	00:00:01.0000
180-190	24	00:00:02.5000	00:00:00.5000	00:00:00.7916	00:00:00.5000
190-200	12	00:00:02.0000	00:00:00.5000	00:00:00.7916	00:00:00.5000
200-210	7	00:00:04.5000	00:00:00.5000	00:00:01.4285	00:00:01.0000
>210	0	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000	00:00:00.0000

Źródło: opracowanie własne

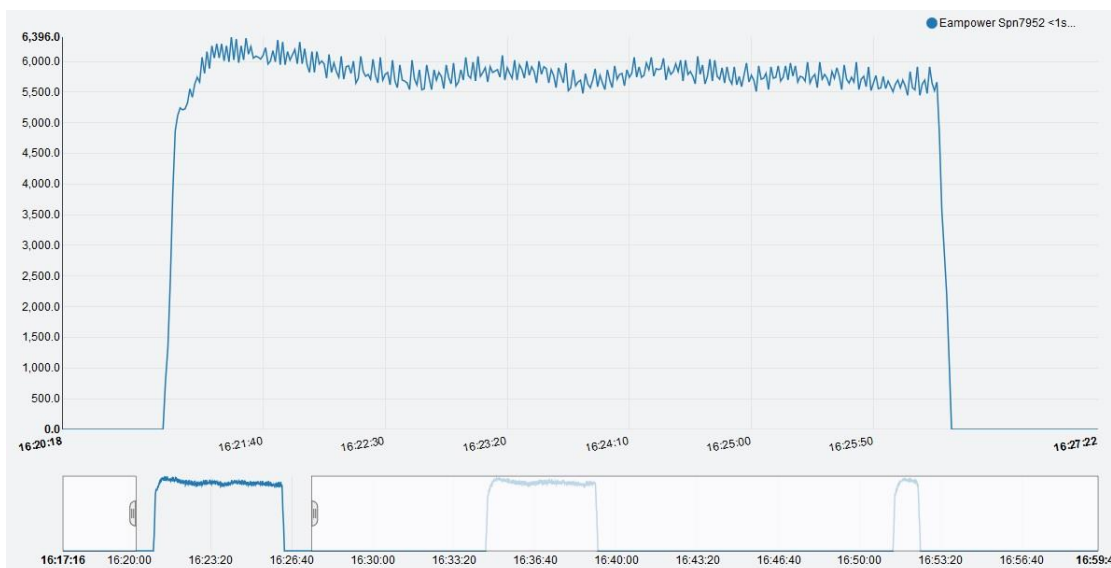
Analizując dane z tabel 24 i 25 zaobserwowano, podobnie jak przy badaniach przeprowadzonych w podrozdziale 2.3.3., że w każdym z przypadków istnieje taki przedział natężenia prądu o zakresie 10 A, w którym maksymalny czas zdarzenia wynosi powyżej 1 min (oznaczony kolorem szarym), a dla którego kolejny przedział (oznaczony kolorem beżowym) charakteryzuje się maksymalnym czasem znacząco niższym, przy czym liczba zdarzeń maleje co najmniej dwukrotnie. Uwzględniając, że dla obciążeń okazjonalnych trwających krócej niż 1 min, możliwe jest uzupełnienie brakującej mocy z akumulatorów, to na podstawie niniejszej analizy stwierdzono, że maksymalne natężenie prądu przetwornicy powinno wynosić co najmniej 180 A, ponieważ przedział 170 – 180 A dla okresu lata, stanowił najwyższą wartość trwającą dłużej niż 1 minutę. W podrozdziale 2.3.4. wyznaczono, że maksymalne natężenie prądu  $I_{max}$  przetwornicy DC/DC 24 V powinno wg metody obliczeniowej wynosić 180 A, a wg metody statystycznej 200 A. Zestawiając te wartości z wynikiem analizy eksploatowanych autobusów Solaris Urbino 9 LE electric stwierdzono, że obie metody wskazały właściwe wartości maksymalnego natężenia prądu dla doboru przetwornicy DC/DC 24 V. Należy zwrócić uwagę na fakt, że dokładność metod zawsze zależy od posiadanej wiedzy. Przy metodzie obliczeniowej istotna jest znajomość współczynników czasu wykorzystania odbiornika  $k_{ti}$ , oraz obciążenia odbiornika  $k_{obc i}$ , natomiast przy metodzie statystycznej, znajomość różnic analizowanej floty pojazdów w stosunku do nowo projektowanego. Dla

uzyskania większej pewności należy zastosować obie metody dla porównania wyników. W przypadku niewielkich różnic (do 20%) należy przyjąć wyższą wartość maksymalnego natężenia prądu przetwornicy  $I_{\max}$ , a dla większych rozbieżności, należy dokonać weryfikacji obliczeń w celu identyfikacji popełnionych błędów.

Autobusy różnią się pod względem wyposażenia i mogą zdarzyć się sytuacje, w których dodatkowe wyposażenie montowane na życzenie klienta będzie miało moc przekraczającą możliwości dobranej przetwornicy DC/DC, a czas trwania będzie na tyle długi, że akumulatory pokładowe nie będą w stanie pokryć tego zapotrzebowania. Wówczas należy dokonać zmiany oprogramowania sterującego, mającego na celu zmniejszenie chwilowego obciążenia, poprzez zastosowanie programowej metody priorytetyzacji (blokada działania jednego urządzenia podczas pracy drugiego) lub podłączyć do instalacji 24 V drugą przetwornicę DC/DC.

#### **4.2.4. Weryfikacja poprawności doboru przetwornicy DC/AC 3x400 V AC**

Dobrana przetwornica jest rozwiązaniem hybrydowym i oprócz wyjścia DC/DC 24 V posiada również wyjście 3x400 V AC, które przewidziano do zasilenia sprężarki klimatyzacji. Jak wspomniano w podrozdziale 2.3.5, dobrano przetwornicę, która pozwoli zasilić zarówno konwencjonalną klimatyzację o mocy sprężarki 5,8 kW jak i wersję z pompą ciepła o mocy sprężarki 7,2 kW. Autobus prototypowy wyposażono w konwencjonalną klimatyzację, dlatego tylko tę wersję przebadano na etapie realizacji tego pojazdu. W ramach testów uruchomiono układ klimatyzacji i przeanalizowano pobór mocy zarejestrowany za pomocą systemu eSConnect. Wykres przebiegu mocy w czasie, przedstawiono na rysunku 56. Z przebiegu wykresu mocy w czasie odczytać można, że przy włączeniu sprężarki klimatyzacji w początkowej fazie moc wzrasta do wartości niespełna 6,4 kW, po czym stabilizuje się w zakresie pomiędzy 5,5–6 kW. Przyjmując  $\cos \varphi = 0,9$  dla mocy 6,4 kW, z przekształcenia wzoru (21) wyliczono natężenie prądu wynoszące 10,26 A. Na podstawie wykonanego testu stwierdzono, że przetwornicę DC/AC o wyjściowym natężeniu prądu maksymalnym równym 15 A, dobrano właściwie dla klimatyzacji konwencjonalnej zastosowanej w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric.



Rys. 56. Przebieg poboru mocy sprężarki konwencjonalnej klimatyzacji zamontowanej w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric  
Źródło: opracowanie własne

### 4.3. Korzyści techniczne, technologiczne i ekonomiczne rozwiązania

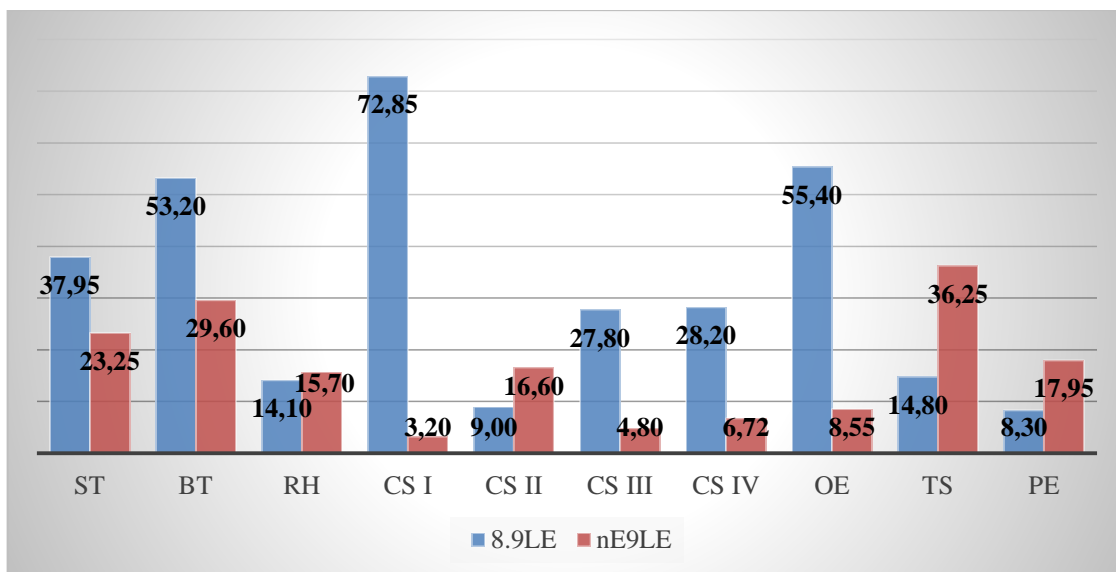
Autobus Solaris Urbino 9 LE electric jest następcą modelu Urbino 8,9 LE electric. Na początku projektu Zarząd firmy Solaris postawił cel, aby pojazd ten nie tylko nawiązywał swoim wyglądem do serii autobusów nowej generacji, ale był pod wieloma względami lepszy od swojego poprzednika. Oczekiwane korzyści zidentyfikowano podczas analizy konstrukcji istniejącego autobusu oraz w trakcie ankiet z pracownikami poszczególnych działów firmy Solaris, o czym napisano bardziej szczegółowo w podrozdziale 1.4. W niniejszym podrozdziale przedstawiono w jaki sposób je osiągnięto oraz zmierzono.

Ważnym celem nowo projektowanego autobusu było to, aby rozkład masy dla wszystkich oferowanych konfiguracji pojazdu pozwalał na osiągnięcie maksymalnej możliwej liczby pasażerów, ograniczonej dopuszczalną masą całkowitą pojazdu lub dostępnym miejscem, a nie ograniczeniami nacisków na poszczególne osie. Zastosowanie modułowego układu napędowego i właściwe rozmieszczenie poszczególnych elementów w autobusie, pozwoliło na osiągnięcie tego celu. Pokrewnym oczekiwaniem było uzyskanie takiej samej co w autobusie Urbino 8,9 LE electric lub większej liczby pasażerów dla wszystkich oferowanych konfiguracji pojazdu. Na podstawie symulacji określono, że autobus Urbino 9 LE electric, wyposażony w 4 akumulatory trakcyjne, może przewozić taką samą liczbę pasażerów co jego poprzednik, ale z 3 akumulatorami, o 4 pasażerów więcej, co stanowi wzrost możliwości przewozowych o 6%.

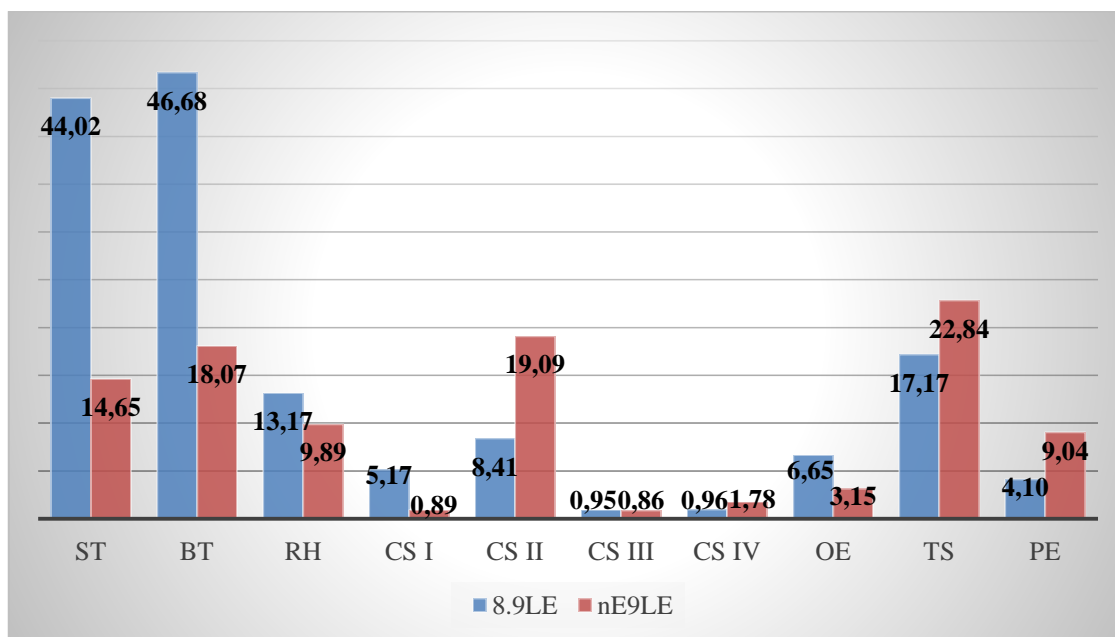
Ze względu na popularność autobusów elektrycznych wyposażonych w pantograf montowany na dachu w przedniej części pojazdu (nad przednią osią), możliwość jego oferowania mogła być dużym atutem. Brak możliwości takiego montażu w Urbino 8,9 LE electric, ze względu na rozmieszczenie elementów na dachu, bywał dla niektórych klientów wadą obniżającą konkurencyjność tego produktu. Podobnie, ze względu na rozmieszczenie elementów na dachu, nie było wystarczająco miejsca dla zaoferowania klimatyzacji pasażerskiej z pompą ciepła, która występowała już w pozostałych typach autobusów Solaris. Dodatkowym utrudnieniem było oczekiwanie Zarządu Solaris, aby lokalizacja poszczególnych elementów nie ulegała zmianie przy oferowaniu różnych wariantów rozwiązań, dzięki czemu ograniczeniu miała ulec liczba części potrzebnych do produkcji autobusów. Najtrudniejsze okazało się zaprojektowanie rozkładu dachu, na którym nie było dużo miejsca. Zasympulowano różne warianty, w rezultacie czego powstały 34 konfiguracje rozkładów elementów na dachu. Dzięki zastosowaniu modułowego układu napędowego, którego elementy zlokalizowano w większości poza dachem, możliwe stało się spełnienie wyżej wspomnianych wymagań.

Elementy modułowego układu napędowego rozmieszczono tak, aby ograniczyć do minimum długość przewodów elektrycznych. Przykładem dobrze obrazującym cel, jest umiejscowienie falownika trakcyjnego blisko silnika, ponieważ połączenie silnik-falownik wykonywane jest 3 przewodami o przekroju większym niż 2 przewody łączące falownik z rozdzielnicą „HV BOX”. Redukcja kosztów zakupu przewodów jest tutaj ewidentna. Miernikiem osiągnięcia celu stała się długość wszystkich zastosowanych w pojeździe przewodów HV wyrażona w metrach oraz masa miedzi w nich zastosowana, wyrażona w kilogramach. Długość przewodów przekłada się na koszt wytworzenia (dłuższe wiązki są droższe w procesie ich produkcji) i koszt montażu (rozłożenie dłuższych wiązek trwa dłużej i kosztuje więcej). Długość oraz przekrój przewodów wpływa na masę miedzi użytą do ich produkcji. Ma to bezpośredni wpływ na koszt, gdyż miedź jest jedną z najdroższych składowych wiązek elektrycznych. Ograniczenie ilości stosowanych przewodów elektrycznych przekłada się także na ograniczenie niekorzystnego wpływu na środowisko naturalne. Aby ocenić poziom korzyści, zestawiono dane dla obu autobusów, nowego Urbino 9 LE electric oraz jego poprzednika. Wyniki przedstawiono na rysunkach 57 i 58.



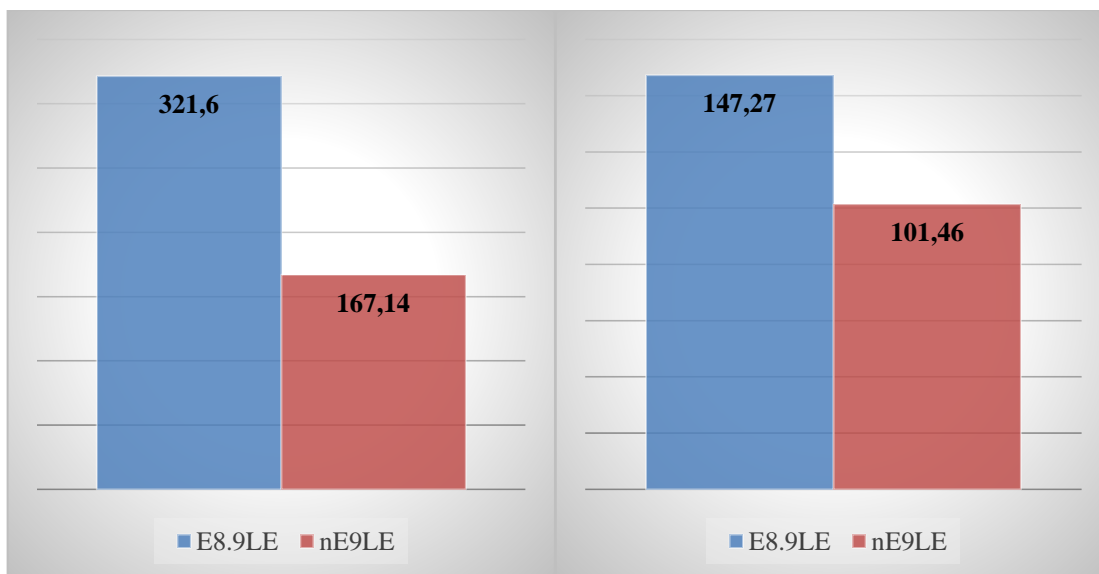


**Rys. 57.** Porównanie długości poszczególnych wiązek HV (wyrażonej w m) zastosowanych w autobusach Solaris Urbino 8,9 LE electric i Urbino 9 LE electric  
Źródło: opracowanie własne



**Rys. 58.** Porównanie masy miedzi poszczególnych wiązek HV (wyrażonej w kg) zastosowanych w autobusach Solaris Urbino 8,9 LE electric i Urbino 9 LE electric  
Źródło: opracowanie własne

Z zestawienia odczytano, że w autobusie Urbino 9 LE electric suma długości przewodów większości wiązek jest znacznie krótsza niż w autobusie poprzedniej generacji. W zestawieniu z przekrojem zastosowanych przewodów, przekłada się to również na zauważalne zmniejszenie ilości miedzi w wiązkach. Po zsumowaniu długości przewodów wiązek i masy miedzi w nich zawartych, otrzymujemy wartości dla pojazdów, które przedstawiono w zestawieniach na rysunku 59.



**Rys. 59.** Porównanie sumy długości przewodów wszystkich wiązek HV (wyrażonej w m) oraz masy miedzi (wyrażonej w kg) w nich użytych w autobusach Solaris Urbino 8,9 LE electric i Urbino 9 LE electric

Źródło: opracowanie własne

Z zestawień odczytano, że w autobusie Urbino 9 LE electric łączna długość wszystkich przewodów w wiązkach HV jest o 154,46 m krótsza niż w autobusie Urbino 8,9 LE electric, co stanowi redukcję o 48%, a masa miedzi zastosowana w tych wiązkach spadła o 45,81 kg czyli o 31%. Na podstawie analizy udowodniono, że zrealizowano cel jakim było zminimalizowanie długości przewodów HV, przekładające się na obniżenie kosztów instalacji elektrycznej pod względem zakupu jak i montażu, w porównaniu do autobusu poprzedniej generacji.

Modułowy układ napędowy przyniósł bezpośrednie korzyści po stronie redukcji kosztów. Jako, że nie można porównywać poszczególnych elementów pomiędzy generacjami autobusów, ponieważ niektóre funkcjonalności zostały przejęte przez inne elementy i takie porównanie nie byłoby obiektywne, zestawiono i porównano koszty całego układu napędowego (za wyjątkiem akumulatorów trakcyjnych) uwzględniającego urządzenia pomocnicze. Zestawienie wykonano tak, aby ujęte były w nim wszystkie tożsame funkcjonalności realizowane przez układ napędowy autobusów obu generacji. Ze względów na poufność tych danych nie ma możliwości ich przedstawienia w niniejszej rozprawie. Można jednak wskazać, że cały równoważny układ napędowy uwzględniający wszystkie elementy obwodu HV jest o 24% tańszy w stosunku do autobusu poprzedniej generacji, co jest dużym osiągnięciem. Zaletą związaną wprost z modułowym układem napędowym jest możliwość prostej podmiany poszczególnych

elementów w sytuacji, w której pojawi się nowe, lepsze technicznie bądź ekonomicznie, rozwiązanie. Dzięki temu nie ma konieczności wprowadzania kosztownych zmian w konstrukcji pojazdu.

Ważnym parametrem każdego układu napędowego jest jego sprawność. Dlatego zredukowanie (w stosunku do autobusu poprzedniej generacji) zużycia energii autor rozprawy wyznaczył sobie jako dodatkowy cel dla nowego produktu. Najbardziej odpowiednim miernikiem osiągnięcia tego celu są wyniki testów realizowanych wg procedury E-SORT. Procedurę przedstawiono w podrozdziale 2.2.5. Wyniki testów przeanalizowano dla obu generacji pojazdów. We wszystkich cyklach (SORT1, SORT2, SORT3) autobus Urbino 9 LE electric wykazał mniejsze zużycie energii w stosunku do poprzednika. Procentową redukcję zużycia energii przedstawiono w tabeli 26.

Tabela 26. Procentowa redukcja zużycia energii w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric w porównaniu do Urbino 8,9 LE electric, dla wszystkich cykli SORT

<b>SORT1</b>	<b>SORT2</b>	<b>SORT3</b>
22%	2%	4%

Źródło: opracowanie własne

Zaobserwowano, że największy uzysk miał miejsce dla cyklu SORT1 (aż 22%), dla którego występują niskie prędkości przejazdów, tj. średnia prędkość wynosząca  $12,1 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ . Autobus nowej generacji miał zbliżone zużycia energii w poszczególnych cyklach, a poprzednik w cyklu SORT1 miał zużycie wyraźnie wyższe niż w pozostałych cyklach. Na podstawie analizy sprawności silników i falowników stwierdzono, że dobrany do autobusu Urbino 9 LE electric zestaw silnik-falownik ma wysoką sprawność w szerszym zakresie prędkości obrotowych, w stosunku do równoważnego zestawu w autobusie poprzedniej generacji.

Wszystkie cele postawione nowemu autobusowi Urbino 9 LE electric zostały osiągnięte. Jest on wyraźnie lepszą konstrukcją w stosunku do poprzednika, a elektryczny modułowy układ napędowy w istotny sposób przyczynił się do realizacji tych celów.

## 5. Metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych

„Metodologia (*gr. methodos* = badanie + *logos* = słowo, nauka) jest nauką o czynnościach poznawczych badań naukowych oraz wytworach poznawczych tych czynności. Szczególnym zainteresowaniem metodologii są metody badawcze i ich wytwory w postaci faktów, czyli uzyskanych informacji, czy też danych przedstawionych jako jakościowe lub ilościowe zmienne i ich wskaźniki” [58].

Projektowanie wg profesora Wojciecha Gasparskiego, jednego z polskich prekursorów prakseologii, należy definiować wg trzech kontekstów:

- przedmiotu projektowania, w którym projektowanie dotyczy tworzonych przez człowieka obiektów (lub takich, które mają dopiero powstać),
- procesu dojścia do rezultatów projektowych, w którym kluczowa jest koncepcja projektowania i sposoby postępowania przy rozwiązywaniu problemów projektowych, co finalnie sprowadza się do opracowania dla osób projektujących wzorcowych procedur działania, uwzględniających opis zastosowanych metod i przyczyn ich zastosowania,
- podstaw metodologicznych, w którym projektowanie stanowi rodzaj postępowania indukcyjnego i jest sztuką dotarcia do rozwiązań najbardziej racjonalnych [59].

Metodologia projektowania jest przez profesora Gasparskiego przedstawiana jako dyscyplina naukowa, koncentrująca się na metodach i technikach działania podczas projektowania oraz tworzenia z nich procedur postępowania. Profesor klasyfikuje metodologie projektowania wg dwóch kryteriów, dzieląc je ze względu na:

### 1. Stopień uogólnienia:

- metodologia projektowania ogólna – traktująca o metodach projektowania uniwersalnych dla wszystkich rodzajów aktywności projektowych,
- metodologia projektowania szczegółowa – traktująca o metodach projektowania dotyczących konkretnych rodzajów aktywności projektowych lub dotyczących konkretnych rodzajów obiektów projektowania.

### 2. Przedmiot badań:

- metodologia projektowania pragmatyczna – podejmująca tematykę badań projektowania w ujęciu aktywności realizowanych przez projektantów i tworzenia z nich procesów projektowych poprzez normowanie i kodyfikację czynności,
- metodologia projektowania apragmatyczna – podejmująca tematykę badań projektowania skoncentrowanego na obiekcie projektowania w trakcie jego powstawania [59].

W niniejszej rozprawie poruszono *de facto* zagadnienia będące przedmiotem rozważań wszystkich wyżej wymienionych metodologii projektowania, wg klasyfikacji profesora Wojciecha Gasparskiego. Ze względu na stopień uogólnienia, większość rozważań dotyczy metodologii projektowania szczegółowej, gdyż tematem rozprawy jest metodologia projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych, a więc z definicji, konkretnego rodzaju obiektu projektowania. Należy zauważyć, że jak w każdym projekcie, również w tym będącym tematem niniejszej rozprawy, występują aktywności będące specyficzne dla obszaru metodologii projektowania ogólnej. Należą do nich m.in. określenie wymagań projektowych, zarówno funkcjonalnych jak i нефункциональных z podziałem na techniczne i ekonomiczne, czy dokonywanie wyborów najbardziej racjonalnego rozwiązania w oparciu o optymalizację wielokryterialną. Ze względu na kryterium przedmiotu badań poruszono tematy związane zarówno z metodologią projektowania apragmatyczną jak i pragmatyczną. W ramach tej pierwszej, zdefiniowano metody dotyczące tego co należy zrobić w ramach projektu, a w ramach drugiej przedstawiono techniki jak należy to zrobić. Podsumowując, niniejsza rozprawa stanowi kompleksowe ujęcie metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych.

W niniejszym rozdziale, przedstawiono uogólnienia dla aktywności realizowanych w ramach projektu układu napędowego dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric, jakie opisano we wcześniejszej części rozprawy. Uogólnienia powstały w ramach wnioskowania indukcyjnego, które w przeciwieństwie do dedukcyjnego, charakteryzuje się tworzeniem uogólnionych zasad i reguł na podstawie dokonanych obserwacji i analiz [26]. Niniejsza rozprawa jest zwieńczeniem nie tylko studiów III stopnia w ramach doktoratu wdrożeniowego, ale także efektem siedemnastoletniego doświadczenia zawodowego autora rozprawy, który od początku swej kariery zaangażowany był w szereg projektów rozwojowych dotyczących napędów konwencjonalnych, hybrydowych oraz elektrycznych. Projekt napędu elektrycznego autobusu Solaris Urbino 9 LE electric

pozwoilił na wykorzystanie tego doświadczenia dla opracowania napędu modułowego, ustrukturyzowanie wiedzy oraz opracowanie metodologii projektowania aby możliwe było jej rozpropagowanie.

## **5.1. Koncepcja układu napędowego**

Każdą koncepcję nowego rozwiązania należy rozpocząć od zdefiniowania zbiorów wymagań. Wymagania ze względu na ogólną hierarchię dzieli się na:

- wymagania biznesowe – definiują potrzeby, co musi zostać zrealizowane dla osiągnięcia wartości z zachowaniem konkretnych ograniczeń,
- wymagania interesariuszy – definiują potrzeby interesariuszy, które muszą zostać zrealizowane dla osiągnięcia realizacji wymagań biznesowych,
- wymagania rozwiązania – definiują konkretne cechy rozwiązania, które stanowi jedną z możliwych realizacji osiągnięcia wymagań biznesowych.

Wymagania rozwiązania zawsze muszą odnosić się do realizacji wymagań interesariuszy i wymagań biznesowych. Można je podzielić wg różnych kryteriów:

### 1. Funkcjonalności:

- wymagania funkcjonalne – określające konkretne funkcje jakie ma dostarczyć rozwiązanie,
- wymagania pozafunkcjonalne - określające konkretne cechy jakie musi spełniać rozwiązanie, w tym cechy jakościowe.

### 2. Pochodzenia:

- wymagania prawne – określające funkcje i cechy rozwiązania wymagane prawem, a więc obligatoryjne do spełnienia wg konkretnego rozporządzenia,
- wymagania norm – określające funkcje i cechy rozwiązania wymagane normą,
- wymagania przedsiębiorstwa – określające funkcje i cechy rozwiązania wynikające z oczekiwań klientów, przyjętych standardów, możliwości technologicznych i procesowych przedsiębiorstwa.

### 3. Rodzaju:

- wymagania techniczne – określające funkcje i cechy techniczne rozwiązania, takie jak przeznaczenie, parametry wykonania, parametry pracy, itp.,

- wymagania ekonomiczne – określające cechy ekonomiczne rozwiązania, takie jak koszt zakupu, czas dostawy, okres gwarancji itp.

#### 4. Poziomu:

- wymagania systemu – określające funkcje i cechy konieczne do spełnienia w celu zapewnienia współpracy rozwiązania z otaczającym środowiskiem,
- wymagania układu – określające funkcje i cechy konieczne do spełnienia przez elementy układu w celu zapewnienia ich poprawnej współpracy,
- wymagania elementu – określające funkcje i cechy dotyczące pojedynczego elementu.

Dla poprawnej realizacji projektu spełniającego wymagania biznesowe, należy zdefiniować wymagania rozwiązania w podziale na wszystkie powyższe kryteria. Dla projektu układu napędowego autobusów elektrycznych w pierwszej kolejności należy zidentyfikować wymagania na poziomie systemu, tj. takie, których spełnienie jest konieczne dla prawidłowej współpracy układu napędowego z innymi układami w autobusie lub ze względu na wymagania prawne konieczne dla dopuszczenia danego autobusu do ruchu. Dla autobusów dostarczanych na rynek europejski w zbiorze wymagań muszą znaleźć się co najmniej następujące pozycje:

- zasilanie urządzeń elektrycznych i elektronicznych niskiego napięcia w zakresie 16 – 32 V DC zgodnie z normą ISO 16750-2,
- komunikacja pomiędzy urządzeniami elektronicznymi zgodna z protokołem CAN wg normy SAE J1939,
- określenie klasy szczelności elementów wg normy EN 60529:2018,
- spełnienie wymagań regulaminów R10, R85 i R100 EKG ONZ.

Znając wymagania na poziomie systemu należy zdefiniować wymagania na poziomie układów i elementów. Niektóre prace można zrównoleglić, gdyż układ silnik-falownik może być dobierany niezależnie od przetwornic zasilania układów pomocniczych, jednak jeśli np. układ chłodzenia silnika i falownika będzie zasilany z przetwornicy DC/DC bądź DC/AC to ostateczne zatwierdzenie rozwiązania możliwe jest po określeniu wszystkich elementów składowych całego układu napędowego.

## 5.2. Silnik i falownik trakcyjny

Dobór zestawu silnik-falownik należy rozpocząć od określenia wymagań trakcyjnych stawianych projektowanemu autobusowi. Zaliczają się do nich maksymalna prędkość pojazdu na płaskiej nawierzchni oraz zdolność pokonywania wzniesień (krótkotrwała – 30 s i długotrwała – 30 min) z określoną prędkością. Przykładowe wartości na podstawie projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric przedstawiono w podrozdziale 2.2.1. Wymagania te należy przetransponować do wielkości fizycznych: momentu obrotowego i mocy mechanicznej, jakie musi osiągać silnik trakcyjny. Metodę postępowania krok po kroku z uwzględnieniem technik obliczeniowych zawierających wzory oraz informacje skąd pozyskać dane reprezentujące zmienne użyte we wzorach, opisano w podrozdziale 2.2.2. Znając wartości momentu obrotowego i mocy mechanicznej silnika trakcyjnego zapewniającego spełnienie wymagań trakcyjnych pojazdu należy przystąpić do wyboru tego elementu. Spełnienie parametrów momentu obrotowego oraz mocy mechanicznej wraz z wymaganiami określonymi na poziomie systemu jest konieczne dla zakwalifikowania silnika do dalszej oceny. Po odrzuceniu elementów niespełniających wymagań należy dokonać wyboru kryteriów oceny technicznej i ekonomicznej, które posłużą do wyboru optymalnego silnika. W tym celu autor zaproponował zastosować metodę optymalizacji wielokryterialnej sum ważonych z wykorzystaniem do normowania zmiennych metody unitaryzacji zerowanej. Jest to jedna z najczęściej stosowanych metod optymalizacji wielokryterialnej, gdyż jest bardzo intuicyjna. Osoby określające ważność poszczególnych kryteriów posługują się wagami, a oceny sprowadzane są do zunifikowanych wartości zawartych w przedziale od 0 do 1. Metoda ta jest często używana do oceny ofert przetargowych na autobusy miejskie, stąd jej popularność w środowisku specjalistów tej branży. Przedstawiono ją na przykładzie projektu w podrozdziale 2.2.3.

Po wyborze silnika trakcyjnego, należy do niego dobrać falownik, który zapewni osiągnięcie wymaganych parametrów elektrycznych oraz będzie wraz silnikiem dopasowany pod względem sprawności do najczęściej występujących prędkości dla typu projektowanego pojazdu. Dla określenia najczęściej występujących prędkości, należy wykonać histogramy prędkości autobusów eksploatowanych w najbardziej zbliżonych do nowo projektowanego pojazdu, warunkach drogowych. Obliczenie prędkości liniowej pojazdu na podstawie prędkości obrotowej wirnika silnika elektrycznego, przełożenia



przekładni osi napędowej i obwodu tocznego koła pozwala na weryfikację najwyższej sprawności układu w wymaganym zakresie prędkości pojazdu. Rozważać należy tylko falowniki spełniające określone wymagania i dla nich dokonać optymalizacji wielokryterialnej zestawu silnik-falownik. Komplet wymagań dla dobrego falownika, metody projektowe i badawcze oraz techniki obliczeniowe przedstawiono w podrozdziale 2.2.4.

Po dobraniu optymalnego, wg ustalonych kryteriów, zestawu silnik-falownik, należy dokonać kontrolnej weryfikacji czy pojazd w niego wyposażony osiągnie przyspieszenia oczekiwane od autobusów miejskich. Większość klientów akceptuje wartości przyspieszeń zdefiniowane w ramach procedury SORT stworzonej przez stowarzyszenie UITP. Należy upewnić się za pomocą symulacji, czy autobus wyposażony w wybrany zestaw silnik-falownik osiąga przyspieszenia co najmniej takie, jakie wskazano we wspomnianej procedurze SORT. Dla autobusów miejskich zaobserwowano, że jako pojazd z miejscami stojącymi, wymagane przyspieszenia nie należą do wysokich. Dlatego w większości przypadków moment obrotowy silnika elektrycznego wystarczający do pokonywania wzniesień na poziomie 12% z prędkością  $20 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  jest także wystarczający do zapewnienia wymaganych procedurą SORT przyspieszeń. Metody postępowania i techniki przeprowadzenia symulacji i weryfikacji teoretycznej przyspieszeń przedstawiono w podrozdziale 2.2.5.

### **5.3. Zasilanie układów pomocniczych**

Dobór przetwornicy DC/DC 24 V DC należy rozpocząć od określenia jej maksymalnego natężenia prądu wyjściowego. Jest to oprócz spełnienia wymagań określonych na poziomie systemu, najważniejszy parametr tego elementu. Należy tego dokonać poprzez wyznaczenie maksymalnego natężenia prądu potrzebnego do zasilania instalacji 24 V. Ze względu na ilość i różnorodność odbiorników podłączonych do tej instalacji, jest to trudne zadanie. Istnieją metody pozwalające na wyznaczenie wartości maksymalnego natężenia prądu przetwornicy w sposób najbardziej racjonalny przy założeniu, że krótko trwające przeciążenia będą kompensowane przez akumulatory pokładowe. Przedstawiane w literaturze metody bazują na obliczeniach. Autor rozprawy zaproponował wyznaczenie maksymalnego natężenia prądu przetwornicy metodą statystyczną. Charakterystykę obu metod przedstawiono w podrozdziale 2.3.1. Metoda obliczeniowa uwzględnienia współczynniki czasu wykorzystania i obciążenia

odbiornika, które odpowiednio pomniejszają wartość jego natężenia prądu znamionowego. Suma tak wyliczonych natężeń prądów obciążenia poszczególnych odbiorników stanowi wg metody wytyczną, że maksymalne natężenie prądu przetwornicy DC/DC 24 V powinno być większe od wyliczonego tą metodą natężenia prądu obciążenia instalacji 24 V DC. Metodę obliczeniową na przykładzie projektu przedstawiono w podrozdziale 2.3.2. Metoda statystyczna bazuje na analizie statystycznej danych pochodzących z floty pojazdów o zbliżonym wyposażeniu oraz miejscu użytkowania. Stanowi uzupełnienie metody obliczeniowej, wskazując ponadto jakie zakresy natężeń prądów występują najczęściej, pozwalając zwrócić uwagę na dobór takiej przetwornicy aby jej sprawność w tym zakresie była najwyższa. Należy skorzystać z histogramów o przedziałach 5 A oraz wyznaczyć zakres zbliżony do pojedynczego odchylenia standardowego od średniej natężenia prądu obciążenia. Racjonalnym jest dobrać przetwornicę, która w tym zakresie natężenia prądu będzie miała najwyższą sprawność. Wyznaczenie maksymalnego natężenia prądu dla przetwornicy DC/DC odbywa się w tej metodzie za pomocą analizy czasów trwania obciążeń w przedziałach 10 A. Zakłada się, że obciążenia trwające krócej niż 1 minutę mogą być uzupełniane przez akumulatory pokładowe, dlatego górna część przedziału, dla którego najdłuższe analizowane zdarzenie (spośród reprezentatywnych danych) trwało ponad 1 minutę, jest rekomendowaną maksymalną wartością natężenia prądu dla przetwornicy DC/DC 24 V. Metodę statystyczną na przykładzie projektu przedstawiono w podrozdziale 2.3.3.

Dla uzyskania większej precyzji wyznaczania maksymalnego natężenia prądu przetwornicy należy stosować obie metody, obliczeniową i statystyczną, jako wzajemnie się uzupełniające. Należy założyć, że jeśli różnice w wynikach tych metod różnią się mniej niż 20% to przy doborze przetwornicy DC/DC 24 V należy uwzględnić wartości wyższe spośród wyznaczonych dwiema metodami. W przeciwnym razie należy ponowić działania, gdyż istnieje duże prawdopodobieństwo, że na etapie obliczeń czy analiz doszło do błędu. Metodę wyznaczenia maksymalnego natężenia prądu przetwornicy DC/DC 24 V na podstawie obu metod przedstawiono na przykładzie projektu w podrozdziale 2.3.4.

Dla modułowego układu napędowego zaleca się stosowanie dedykowanych przetwornic DC/AC dla układów pomocniczych wyposażonych w silniki elektryczne. Daje to korzyści pod względem sprawności energetycznej jak i łatwości zarządzania wariantami rozwiązań, ponieważ odbiorniki występują razem z dedykowanymi przetwornicami. Analogicznie jak w przypadku przetwornicy DC/DC również podczas

doboru przetwornicy DC/AC należy rozpocząć od określenia jej maksymalnego natężenia prądu wyjściowego. Jest to o tyle prostsze, że do przetwornicy podłączony jest jeden odbiornik. Metodę określenia parametrów przetwornicy DC/AC przedstawiono na podstawie projektu w podrozdziale 2.3.5.

Po wyznaczeniu maksymalnych wartości natężenia prądu wyjściowego przetwornic i zestawieniu tego wymogu z pozostałymi wymaganiami stawianymi tego typu przetwornicom (przedstawionymi w podrozdziałach 2.3.4. i 2.3.5.), należy dokonać optymalizacji wielokryterialnej metodą sum ważonych z wykorzystaniem do normowania zmiennych metody unitaryzacji zerowanej. Zastosowane metody oraz wybrane kryteria oceny przedstawiono na przykładzie projektu w podrozdziałach 2.3.6. i 2.3.7. Ze względu na istnienie rozwiązań hybrydowych dla przetwornic DC/DC i DC/AC, w podrozdziale 2.3.8. przedstawiono metodę porównania takich rozwiązań z rozwiązaniami konwencjonalnymi. Nie zawsze rozwiązanie hybrydowe musi być optymalne. Zależy to od specyfiki rozwiązań i kryteriów oceny. Należy każdorazowo wykonać optymalizację wielokryterialną dla rozwiązań hybrydowych i konwencjonalnych.

## **5.4. Rozdzielnice zasilająco-sterujące**

Projektowanie rozdzielnic zasilająco-sterujących należy rozpocząć od szczegółowego rozpisania elementów HV występujących w pojeździe, z podziałem na te występujące zawsze oraz wariantowe. W każdym autobusie elektrycznym występować będą źródła energii elektrycznej, najczęściej akumulatory trakcyjne, falownik i silnik trakcyjny, przetwornice DC/DC 24 V i przetwornice DC/AC dla obwodów pomocniczych. Pozostałe urządzenia zależą od kompletacji wyposażenia autobusu oraz dobranych elementów. W przypadku autobusu bateryjnego występuje przynajmniej jedno przyłącze ładowania akumulatorów trakcyjnych (złącze lub/i pantograf). Dla wszystkich tych urządzeń należy przeanalizować następujące kwestie:

- dystrybucję energii, tj. z jakimi innymi elementami musi on być połączony oraz w jaki sposób,
- prawidłowość załączenia i odłączenia zasilania, tj. czy element wymaga załączania poprzez stycznik lub czy wymaga układu wstępnego ładowania kondensatorów,

- zabezpieczenie przeciwzwarceniowe, tj. jakie bezpieczniki należy zastosować dla poszczególnych obwodów,
- kontrolę stanu izolacji, tj. w jaki sposób monitorować czy nie dochodzi do obniżenia rezystancji izolacji poniżej wartości bezpiecznej,
- pomiar napięcia i natężenia prądu, tj. czy dany element lub obwód powinien być monitorowany ze względów na natężenie prądu, wartość napięcia oraz w jaki sposób należy reagować na nieprawidłowe wartości, a także czy dany element lub obwód powinien mieć wykonywane pomiary zużycia energii.

Po tak przeprowadzonej analizie należy narysować schemat ideowy rozdzielnic zasilająco-sterujących z uwzględnieniem ich modułowej budowy. Zaleca się rozważenie osobnych rozdzielnic zasilająco-sterujących dla obwodów opcjonalnych, tj. takich które występują tylko w niektórych wariantach pojazdów. Ostateczna ocena zasadności takiego rozwiązania zależy od skomplikowania danego obwodu, kosztów rozwiązania i popularności stosowanej opcji. Podlega ona każdorazowo decyzji zespołu projektowego.

Wiele zagadnień, takich jak dobór bezpieczników przeciwzwarceniowych, dobór styczników czy przetworników napięć i prądów, jest dobrze znanych i opisanych w literaturze naukowej. W procesie projektowania rozdzielnic zasilająco-sterujących układu napędu autobusu elektrycznego, wyróżnić należy dwa układy specyficzne dla tego typu rozwiązań. Zaliczają się do nich układ wstępnego ładowania kondensatorów oraz układ kontroli stanu izolacji, które w niniejszej rozprawie przedstawiono szczegółowo jako obszar wiedzy mało spopularyzowanej. Urządzenia energoelektroniczne, stosowane w pojazdach elektrycznych, wyposażone są na wejściu zasilania w kondensatory. Bezpośrednie podłączenie źródła zasilania skutkowałoby przepływem prądu o natężeniu rzędu kiloamperów w wyniku ładowania kondensatorów, czego rezultatem byłoby uszkodzenie elementów obwodu HV. Dla zabezpieczenia obwodu przed uszkodzeniami należy stosować układy wstępnego ładowania, których funkcja polega na krótkotrwałym dołączeniu rezystora wstępnego ładowania, ograniczającego natężenie prądu ładowania kondensatorów. Rezystancję rezystora wstępnego ładowania należy wyznaczyć na podstawie sumarycznej pojemności wszystkich odbiorników HV w pojeździe oraz oczekiwanego czasu trwania fazy wstępnego ładowania. Zalecany czas trwania fazy wstępnego ładowania to zakres od 1 do 2 sekund. Dla celów obliczeniowych należy przyjąć wartość 1 s, ponieważ w wyniku dokładności pomiarowych oraz czasu

przetwarzania informacji i komunikacji pomiędzy poszczególnymi sterownikami, należy spodziewać się opóźnień w stosunku do wartości obliczeniowych. W branży pojazdów elektrycznych przyjmuje się, że 99,3% wartości napięcia zasilania (odpowiednik pięciokrotności stałej czasowej) spowoduje przepływ prądu o natężeniu na tyle niskim, że nie spowoduje to uszkodzenia obwodu HV. W oparciu o wykonane obliczenia należy dokonać wyboru rezystora wstępnego ładowania po czym dokonać weryfikacji poprawności rozwiązania na podstawie symulacji ładowania kondensatorów, analizując napięcie i natężenie prądu w funkcji czasu. Dla potwierdzenia spełnienia głównej funkcji układu wstępnego ładowania, należy dokonać obliczenia natężenia prądu występującego w momencie przełączenia obwodu HV z obwodu wstępnego ładowania na tor główny oraz potwierdzenia, że wartość ta jest bezpieczna dla wszystkich elementów obwodu HV. Metodę postępowania oraz techniki obliczeniowe przedstawiono na podstawie projektu w podrozdziale 2.4.2.

Bezpieczeństwo jest priorytetem podczas eksploatacji pojazdów elektrycznych dlatego regulaminy EKG ONZ definiują szereg wymagań technicznych zapewniający odpowiedni poziom zabezpieczeń. Jednym z takich wymogów jest aby rezystancja izolacji dla obwodu HV spełniała określone wartości minimalne, które zdefiniowano w regulaminie R100. Określone są one w funkcji wartości rezystancji wyrażonej w ohmach na każdy 1 V napięcia zasilania. Autobus należy wyposażyć w układ monitorowania rezystancji izolacji, który w sytuacji jej obniżenia poniżej wartości minimalnych określonych w regulaminie, poinformuje kierowcę o usterce. W sytuacji usterki, zaleca się również uruchomienie blokady ładowania ze źródeł zewnętrznych jako potencjalnie niebezpiecznych. Jest to zabezpieczenie redundantne gdyż podczas podłączenia do ładowarki, ta, zgodnie z regulacjami, wykonuje każdorazowo pomiar stanu izolacji całego obwodu ładowania i nie dopuści do rozpoczęcia procesu ładowania bez pozytywnego zakończenia testu.

## **5.5. Opracowanie techniki integracji elektrycznego układu napędowego oraz oprogramowania**

Dobrane na wcześniejszym etapie projektu elementy, należy ze sobą połączyć poprzez rozdzielnicę zasilająco-sterującą wg stworzonego schematu ideowego. Na etapie jego

tworzenia, należy zaplanować racjonalnie pod względem długości przewodów, masy i dostępnego miejsca, rozlokowanie elementów układu, ponieważ jest to istotny czynnik decyzyjny podczas definiowania poziomu modularności rozdzielnic.

Opracowanie techniki integracji elektrycznego układu napędowego polega na przygotowaniu dokumentacji technicznej rozdzielnic zasilająco-sterujących uwzględniającej:

- dokumentację 3D rozdzielnic zasilająco-sterujących,
- dokumentację 2D wykonawczą detali rozdzielnic zasilająco-sterujących,
- dokumentację elektryczną wiązek rozdzielnic zasilająco-sterujących,
- dokumentację technologiczną montażu rozdzielnic zasilająco-sterujących, sposób testowania oraz kryteria oceny jakościowej.

Dla tak zaprojektowanego układu napędowego należy przygotować oprogramowanie sterujące, które musi uwzględniać co najmniej następujące obszary:

- załączenie zasilania 24 V DC sterowników elektrycznego układu napędowego i przeprowadzenie testu sprawności,
- załączenie i wyłączenie zasilania obwodu HV,
- załączenie, wyłączenie i obsługa trybu jazdy,
- obsługa odbiorników pomocniczych,
- załączenie, wyłączenie i obsługa procesu ładowania,
- monitorowanie stanu izolacji.

Metody postępowania i techniki integracji elektrycznego układu napędowego przedstawiono w rozdziale 3.

## **5.6. Projekt autobusu**

Na etapie projektu autobusu należy przygotować dokumentację techniczną zabudowy i podłączenia, falownika, silnika, przetwornic, urządzeń pomocniczych i zaprojektowanych wcześniej rozdzielnic zasilająco-sterujących, uwzględniającą:

- dokumentację 3D zabudów elementów, instalacji elektrycznej i hydraulicznej (dla układów napędowych chłodzonych cieczą),
- dokumentację 2D wykonawczą detali,
- dokumentację elektryczną wiązek,
- dokumentację instalacji hydraulicznej (dla układów napędowych chłodzonych cieczą),

- dokumentację technologiczną uwzględniającą sposób oraz umiejscowienie montażu poszczególnych elementów, sposób połączeń elektrycznych i hydraulicznych (dla układów napędowych chłodzonych cieczą), sposób testowania oraz kryteria oceny jakościowej.

Przykładowy rozkład elementów elektrycznego układu napędowego w autobusie przedstawiono w podrozdziale 4.1.

## **5.7. Walidacja rozwiązań**

Każdy proces projektowania musi zakończyć się walidacją rozwiązań i ewentualnym wdrożeniem poprawek. Jest to niezbędne aby zweryfikować poprawność metod postępowania oraz technik obliczeniowych realizowanych na wcześniejszych etapach projektowania. Dla układu napędowego autobusu elektrycznego należy w pierwszej kolejności zweryfikować poprawność działania rozdzielnic zasilająco-sterujących, tj. prawidłowość działania komunikacji oraz sekwencji programowych odpowiedzialnych za poszczególne funkcjonalności rozdzielnic, zaczynając od prawidłowego załączenia zasilania obwodu HV, poprzez poprawność pomiaru napięcia i natężenia prądu, po procesy dopinania akumulatorów trakcyjnych, ładowarek zewnętrznych czy uruchamiania urządzeń pomocniczych. W trakcie wykonywania badań eksperymentalnych należy dokonać pomiarów wartości wcześniej obliczanych, ze szczególnym uwzględnieniem fazy wstępnego ładowania kondensatorów i weryfikacji poprawności działania układu kontroli stanu izolacji. Należy potwierdzić, że wartości zmierzone odpowiadają wcześniej poczynionym założeniom oraz zweryfikować czy nie przekraczają wartości bezpiecznych. Metody pomiarowe oraz techniki obliczeniowe przedstawiono na podstawie projektu w podrozdziale 4.2.1. Po pozytywnym zakończeniu testów stacjonarnych, należy dokonać testów jezdnych. Ich pierwszym etapem jest weryfikacja, przyjętych na etapie obliczeń, literaturowych wartości współczynników oporów powietrza i oporów toczenia. Metodą wystarczającą do walidacji tych wartości, na potrzeby doboru układu napędowego, jest próba wybiegu. Po uaktualnieniu wartości współczynników należy dokonać ponownych symulacji teoretycznych dla przyspieszeń pojazdu. W kolejnym etapie należy wykonać testy przyspieszeń pojazdu na płaskiej nawierzchni oraz zestawić wyniki z wcześniej przygotowaną symulacją. W przypadku gdy zmierzone maksymalne przyspieszenia są zgodne z obliczeniami lub wyższe, należy wnioskować, że pojazd osiągnie wymagane parametry trakcyjne. Metody walidacyjne dla

zestawu silnik-falownik oraz techniki obliczeniowe przedstawiono na podstawie projektu w podrozdziale 4.2.2.

Walidacja poprawności doboru przetwornicy DC/DC 24 V nie jest możliwa do wykonania w pełni na pojeździe prototypowym. Można na nim sprawdzić konkretne scenariusze obciążeń, co jest pierwszym etapem weryfikacji. Należy wziąć pod uwagę, że przetwornica ta nie jest dobierana pod względem obciążenia na maksymalną wartość natężenia prądu wszystkich odbiorników zlokalizowanych w autobusie. Dlatego dla pełnej walidacji rozwiązania, należy przeprowadzić testy operacyjne na pierwszej serii produkcyjnej pojazdów, które dostarczone są do klientów. Dopiero na podstawie analizy wyników z eksploatacji pojazdów w skrajnych temperaturowo miesiącach (lato, zima), można ocenić czy sumaryczne obciążenie długotrwałe nie przekracza wartości maksymalnego natężenia prądu przetwornicy, a ewentualne przekroczenia tej wartości są na tyle krótkie, że zostaną skompensowane przez akumulatory pokładowe 24 V. Zaleca się aby wspomniane przekroczenia nie trwały dłużej niż czas 1 minuty, gdyż może to powodować w skrajnych warunkach rozładowywanie się akumulatorów lub znaczące skrócenie ich żywotności. Metody walidacyjne dla przetwornicy DC/DC, a także techniki obliczeniowe przedstawiono na podstawie projektu w podrozdziale 4.2.3.

Dla przetwornic DC/AC walidację należy przeprowadzić poprzez uruchomienie odbiornika z maksymalną mocą, możliwą do osiągnięcia w normalnej eksploatacji pojazdu. Należy zweryfikować natężenia prądu startowego oraz ciągłego. Obie te wartości powinny znajdować się poniżej maksymalnego natężenia prądu przetwornicy. W przypadku gdy natężenie prądu startowego jest zbyt duże a przetwornica DC/AC zasila tylko jeden odbiornik możliwe jest złagodzenie narastania prądu poprzez funkcję „miękkiego startu”. Metody walidacyjne dla przetwornicy DC/AC oraz techniki obliczeniowe przedstawiono na podstawie projektu w podrozdziale 4.2.4.



## 6. Podsumowanie i wnioski

Istotne przyspieszenie rozwoju technologicznego ogniw akumulatorowych, jakie obserwowane jest od początku dwudziestego pierwszego wieku, wpłynęło na znaczny wzrost sprzedaży autobusów elektrycznych. Kompleksowa wiedza na temat projektowania elektrycznych układów napędowych, łącząca wiele dyscyplin naukowych, stała się szczególnie istotna. Dlatego autor rozprawy podjął się zaprojektowania modułowego układu napędowego autobusu elektrycznego dla firmy Solaris Bus & Coach sp. z o.o., europejskiego lidera w zakresie produkcji nowoczesnych autobusów oraz trolejbusów, nieustannie rozwijającego kompetencje w obszarze elektromobilności. Jego celem w rozprawie doktorskiej było stworzenie metodologii projektowania układu napędowego autobusów elektrycznych na podstawie realizowanego projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric.

W pierwszej części rozprawy przedstawiono charakterystykę rynku autobusów miejskich, co pozwoliło zrozumieć wymagania biznesowe jakie stawiane są tym pojazdom. Przedstawiono również porównanie napędów konwencjonalnych z elektrycznymi, identyfikując różnice między nimi oraz dodatkowe funkcjonalności poza przeniesieniem momentu obrotowego na koła, które należy uwzględnić przy projektowaniu układu napędowego autobusów elektrycznych. Przeanalizowano istniejące rozwiązania identyfikując zalety i wady scentralizowanych i modułowych układów energoelektronicznych oraz jakie problemy należy rozwiązać projektując elektryczne autobusy miejskie.

W rezultacie przeglądu literatury oraz przeprowadzonych analiz sformułowano tezę pracy, wg której zastosowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego umożliwia w autobusach elektrycznych spełnienie następujących kryteriów: maksymalizacji liczby dostępnych wariantów konfiguracji podzespołów, zbalansowania rozkładu masy w pojeździe, a także minimalizacji długości przewodów elektrycznych wysokiego napięcia oraz kosztów produkcji. Dlatego modułowy układ napędowy wybrano jako ten, który stanowił przedmiot projektowania dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric.

**Opracowano autorską koncepcję** elektrycznego układu napędowego w ramach której **zdefiniowano wymagania** na poziomie systemu jakim jest autobus oraz samego układu napędowego, a także stworzono listę elementów potrzebnych do jego

skonstruowania. **Określono wymagania trakcyjne** dla projektowanego autobusu i na ich podstawie wyliczono wymagany moment obrotowy i moc mechaniczną silnika elektrycznego. Dla przeprowadzenia obliczeń należy wyznaczyć siły oporów toczenia, powietrza oraz wzniesienia. Wykazano przy tym, że dla pojazdu jakim jest autobus, dla spełnienia wymagań trakcyjnych, opory wzniesienia są dominujące. Dlatego wystarczające jest na etapie doboru silnika posługiwanie się literaturowymi wartościami współczynników oporów toczenia oraz powietrza. Znając zbiór wymagań dla silnika **dokonano optymalizacji wielokryterialnej, zaproponowaną przez autora**, metodą sum ważonych z wykorzystaniem do normowania zmiennych metody unitaryzacji zerowanej, otrzymując w rezultacie jedno optymalne rozwiązanie wg określonych kryteriów. Dla wybranego silnika dobrano falownik a cały zestaw poddano teoretycznej weryfikacji, sprawdzając za pomocą **przeprowadzonej symulacji** czy skompletowane rozwiązanie zapewnia wymagane przyspieszenie pojazdu. **Określono wymagania** dla przetwornicy DC/DC 24 V stosując metodę obliczeniową oraz **autorską metodę statystyczną**, która bazuje na analizie statystycznej poboru mocy we flocie autobusów o zbliżonej konfiguracji do projektowanego pojazdu. **Wskazano wymagania** dla przetwornicy DC/AC. Na ich bazie dokonano doboru przetwornic ponownie stosując do optymalizacji metodę sum ważonych. Dla wybranych elementów elektrycznego układu napędowego zaprojektowano rozdzielnicę zasilająco-sterującą, prezentując metody postępowania i techniki obliczeniowe ze szczególnym zwróceniem uwagi na układ wstępnego ładowania kondensatorów oraz układ kontroli stanu izolacji. Na podstawie projektu wykonano dokumentację techniczną rozdzielnic zasilająco-sterujących integrując wszystkie elementy obwodu HV. **Opracowano algorytmy** oraz dedykowane oprogramowanie dla sterowników rozdzielnic oraz Głównego Komputera Napędu. Wykonano dokumentację techniczną i technologiczną autobusu uwzględniającą wszystkie elementy elektrycznego układu napędowego, na podstawie której zbudowano prototyp pojazdu. Wykorzystano go do walidacji opracowanych rozwiązań. **Zweryfikowano poprawność działania** rozdzielnic zasilająco-sterujących oraz oprogramowania. **Opracowano metodykę** badawczą i **przeprowadzono badania eksperymentalne** weryfikujące poprawność odpowiedzi układu napędowego na żądania przesyłane przez sterowniki pojazdu. Do badań wykorzystano urządzenie monitorujące komunikację CAN Vector CANalyzer fun 9.0.53 oraz oscyloskopy PICOSCOPE 4444 i Tektronix TPS 2014. **Przeprowadzono testy drogowe** podczas których zbadano parametry trakcyjne zestawu silnik-falownik, dokonując w pierwszej kolejności

wyznaczenia współczynników oporów powietrza i oporów toczenia na podstawie próby wybiegu, a następnie wyznaczenia przyspieszenia na podstawie pomiarów zmiany prędkości w czasie. Do badań wykorzystano urządzenia GPS Vbox Racelogic oraz CAN Vector VN 1610. **Przeprowadzono badania obciążenia** przetwornic DC/DC oraz DC/AC wykorzystując do tego celu dane zgromadzone poprzez system telematyczny eSConnect oraz środowisko MATLAB, na potrzeby przeprowadzenia analizy statystycznej. Przeprowadzone badania potwierdziły poprawność zaprojektowania i doboru elementów elektrycznego układu napędowego potwierdzając zgodność z wymaganiami projektowymi.

W rozprawie podsumowano korzyści techniczne, technologiczne i ekonomiczne. **Wykazano**, że dzięki zastosowaniu modułowego układu energoelektronicznego zwiększono liczbę dostępnych wariantów autobusu poprzez możliwość oferowania klimatyzacji z pompą ciepła oraz pantografu na dachu w przedniej części pojazdu. Umożliwiono łatwą konfigurację podzespołów poprzez zastosowanie modułowych urządzeń energoelektronicznych. Modułowość rozwiązania pozwala podmieniać elementy układu na inne oraz montować tylko te rozdzielnice zasilająco-sterujące, które występują w danej konfiguracji pojazdu. Zapewniono zbalansowany rozkład masy pojazdu, który w stosunku do autobusu poprzedniej generacji, skutkował tą samą liczbą przewożonych pasażerów przy maksymalnym ilościowo wariancie akumulatorowym, a w wariancie z trzema akumulatorami polepszył możliwości przewozowe o 6%. Modułowość układu energoelektronicznego pozwoliła na racjonalne rozmieszczenie poszczególnych elementów ze względu na długość przewodów elektrycznych, co skutkowało ich redukcją o 48% względem autobusu poprzedniej generacji. Przełożyło się to na redukcję masy miedzi we wiązkach przewodów o 31%. Ten fakt oraz indywidualnie dobrane poszczególne elementy modułowego układu napędowego uwzględniające kryteria ekonomiczne, pozwoliły na redukcję kosztów o 24% względem układu napędowego autobusu poprzedniej generacji. Wszystkie wykazane korzyści autobusu Solaris Urbino 9 LE electric pozwoliły na potwierdzenie tezy postawionej przez autora niniejszej rozprawy.

W końcowej części rozprawy **sformułowano autorską metodologię projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych**. Na bazie uogólnień ze zrealizowanego projektu, przywołano metody projektowe i badawcze oraz techniki obliczeniowe, jakie zastosowano w trakcie projektowania.

Zaprojektowany elektryczny układ napędowy był przeznaczony dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric, którego premiera odbyła się 30.09.2021 roku. Pojazd ten cieszy się dużym zainteresowaniem klientów. Pomimo, że autobusy miejskie klasy midi, tj. o długości 9 - 10,5 m należą do niszowych, to w niespełna półtora roku od premiery dostarczono do klientów 20 pojazdów tego typu, a kolejnych 34 zostało zamówionych.

Opracowaną metodologię projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych wdrożono w Pionie Badań i Rozwoju firmy Solaris i wykorzystano w trakcie realizacji projektu Urbino 18 hydrogen. Kolejny model autobusu z jej wykorzystaniem jest w trakcie projektowania. Dowodzi to użyteczności opracowanej metodologii.

Naturalnym kierunkiem stanowiącym kontynuację działań przedstawionych w niniejszej rozprawie jest dalsze udoskonalanie i rozwój metodologii projektowania modułowych układów napędowych autobusów elektrycznych, w zakresie:

- autobusów elektrycznych wyposażonych w więcej niż jedną oś napędową,
- autobusów elektrycznych wodorowych,
- trolejbusów.

## 7. Bibliografia

- [1] Sierszyński M., Chełchowski Ł., Kaczmarczyk B., Muszyński P., Michalak D., Analiza wybranych przepisów i norm istotnych z punktu widzenia projektowania autobusów elektrycznych część 1, Przegląd elektrotechniczny, 8/2022, str. 158-162.
- [2] The first motorized bus, dating back to 1895, was a Benz - <https://www.mercedes-benz.com/en/exclusive/classic-magazine/the-first-motorized-bus-dating-back-to-1895-was-a-benz/> [dostęp: 12.02.2023].
- [3] Li J., Battery-electric transit bus developments and operations: A review, International journal of sustainable transportation, 2016, tom 10, nr. 3, str. 157-169.
- [4] Opracowanie własne Solaris Bus & Coach sp. z o.o.
- [5] Sierszyński M., Chełchowski Ł., Pikuła M., Michalak D., Sidorski F., Projektowanie i eksploatacja systemów przeznaczonych do autobusów z napędem alternatywnym, Napędy i sterowanie nr 11 2020, str. 85-91.
- [6] Dyr T., Abramowicz A., Projekt eBus jako instrument rozwoju transportu, Autobusy 7,8, 2016, str. 22-25.
- [7] Dziennik ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, Ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych, Warszawa 2018.
- [8] Wyszomirski O., Wołek M., Jagiełło A., Koniak M., Bartłomiejczyk M., Grzelec K., Gromadzki M., Elektromobilność w transporcie publicznym,, Polski Fundusz Rozwoju Warszawa 2018.
- [9] Doktoraty wdrożeniowe - czyli jak wygrać trzy razy, <https://www.gov.pl/web/edukacja-i-nauka/doktoraty-wdrozeniowe---czyli-jak-wygrac-trzy-razy> [dostęp: 15.05.2022].
- [10] Schönknecht A., Babik A., Rill V., Electric powertrain system design of BEV and HEV applying a multi objective optimization methodology, Transportation Research Procedia 14, 2016, str. 3611 – 3620.
- [11] Grunditz E. A., Design and assessment of battery electric vehicle powertrain, with respect to performance, energy consumption and electric motor thermal capability, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2016.
- [12] Kabalan B., Systematic methodology for generation and design of hybrid vehicle powertrains, Université de Lyon, 2020.
- [13] Husain I., Electric and hybrid vehicles: design fundamentals, CRC press, 2021.

- [14] Koch A., Teichert O., Kalt S., Ongel A., Lienkamp M., Powertrain optimization for electric buses under optimal energy-efficient driving, *MDPI Energies*, 2020, str. 1-19.
- [15] Du J., Jingfu C., Song Z., Gao M., Ouyang M., Design method of a power management strategy for variable battery capacities range-extended electric vehicles to improve energy efficiency and cost-effectiveness, *Energy*, Tom 121, 15 Luty 2017, str. 32-42.
- [16] Al-Ogaili A. S., Al-Shetwi A. Q., Al-Masri H. M. K., Babu T. S., Hoon Y., Alzaareer K., Babu N. V. P., Review of the estimation methods of energy consumption for battery electric buses with design choices and predictive driving, *MDPI Energies*, 2021, 14, 7578, str. 1-28.
- [17] Kivekäs K., Lajunen A., Baldi F., Vepsäläinen J., Tammi K., Reducing the energy consumption of electric buses, *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, tom 68, nr. 12, grudzień 2019, str. 11409-11419
- [18] Connor W. D., Wang Y., Malikopoulos A. A., Advani S. G., Prasad A. K., Impact of connectivity on energy consumption and battery life for electric vehicles, *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT VEHICLES*, tom 6, nr 1, marzec 2021, str. 14-23.
- [19] Cunanan C., Tran M., Lee Y., Kwok S., Leung V., Fowler M., A review of heavy-duty vehicle powertrain technologies: diesel engine vehicles, battery electric vehicles and hydrogen fuel cell electric vehicles, *MDPI Clean Technologies*, 2021, str. 474–489.
- [20] Mahmoud M., Garnett R., Ferguson M., Kanaroglou P., Electric buses: A review of alternative powertrains, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 62, wrzesień 2016, str. 673-684.
- [21] Manzolli J. A., Trovao J. P., Antunes C. H., A review of electric bus vehicles research topics – methods and trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, tom 159, maj 2022, 112211, str. 1-17.
- [22] Verbrugge B., Hasan M. M., Rasool H., Geury T., Baghdadi M., Hegazy O., Smart Integration of electric buses in cities: a technological review, *MDPI Sustainability* 2021, 13, 12189, str. 1-23.
- [23] Deng R., Liu Y., Chen W., Liang H., A survey on electric buses—energy storage, power management, and charging scheduling, *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, tom 22, nr. 1, styczeń 2021, str. 9-22.

- [24] Kangl C., Kiml G., Eun-Jun-Jungl, Kiml T., Kim S., Kim H., Study of the development of DC-DC converter for electric bus, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Oct. 9-12, Seoul, Korea, 2012, str. 744-747.
- [25] Sidorov K., Golubchik T., Yutt V., Method for calculating the power circuit characteristics of the isolated DC-DC converters for electric and hybrid vehicles, Indian Journal of Science and Technology, tom 8(27), październik 2015, str. 1-8.
- [26] Bocheński J. M., Współczesne metody myślenia, Wydawnictwo "W drodze", 1988.
- [27] Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train - <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R100r2e.pdf>, [dostęp: 05.06.2022].
- [28] ISO16750-2:2012, Road vehicles — environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 2: Electrical loads.
- [29] SAE J1939, Recommended practice for a serial control and communications vehicle network, 2018.
- [30] EN60529:2018, Degrees of protection provided by enclosures (IP Code).
- [31] Sierszyński M., Chelchowski Ł., Kaczmarczyk B., Muszyński P., Michalak D., Analiza wybranych przepisów i norm istotnych z punktu widzenia projektowania autobusów elektrycznych część 2, Przegląd elektrotechniczny, 8/2022, str. 163-167.
- [32] Electromagnetic compatibility - <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2019/E-ECE-324-Add.9-Rev.6.pdf>, [dostęp: 05.06.2022].
- [33] Uniform provisions concerning the approval of internal combustion engines or electric drive trains intended for the propulsion of motor vehicles of categories M and N with regard to the measurement of net power and the maximum 30 minutes power of electric drive trains - <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R085r1e.pdf>, [dostęp: 05.06.2022].
- [34] Fuć P., Lijewski P., Bajerlein M., Galant M., Siedlecki M., Ekologiczne i ekonomiczne aspekty eksploatacji różnych konfiguracji napędów autobusów miejskich, Combustion Engines, R. 54, nr 3, 2015, str. 810-815.
- [35] Chelchowski Ł., Sierszyński M., Czop P., Adamczyk D., Banasiewicz M., Projektowanie elektrycznego układu napędowego autobusów miejskich, Przegląd elektrotechniczny, 8/2022, str. 154-157.
- [36] Wrzecioniarz P. A., Ambroszko W., Pindel A., „Granice oporów ruchu w pojazdach. Opór toczenia, Autobusy 12/2018 str. 256-259.

- [37] Wrzecioniarz P. A., Ambroszko W., Pindel A., Granice oporów ruchu w pojazdach. Opór aerodynamiczny, *Autobusy* 12/2018 str. 252-255.
- [38] Paszko M., Analiza wpływu warunków atmosferycznych na opór aerodynamiczny autobusu miejskiego” *Autobusy* 12/2016 str. 1266-1268.
- [39] ISO13443:1996, Natural gas — Standard reference conditions.
- [40] Połoński M., Analiza wielokryterialna – wstęp do zagadnienia, [http://mieczyslaw\\_polonski.users.sggw.pl/Analiza%20wielokryter%20wstep1.pdf](http://mieczyslaw_polonski.users.sggw.pl/Analiza%20wielokryter%20wstep1.pdf) [dostęp: 19.07.2022].
- [41] Stanujkic D., Zavadskas E. K., A modified weighted sum method based on the decision-maker's preferred levels of performances, *Studies in informatics and control*, grudzień 2015, str. 461-469.
- [42] Kukuła K., Metoda unitaryzacji zerowanej na tle wybranych metod normowania cech diagnostycznych, *Acta Scientifica Academiae Ostroviensis* nr 4, 1999, str. 5-31.
- [43] Popescu M., Induction motor modelling for vector control purposes, Helsinki University of Technology, Helsinki 2000.
- [44] UITP project “E-SORT” cycles for electric vehicles, International Association of Public Transport (UITP), 2017.
- [45] UITP Project ‘SORT’ Standardised On-Road Test cycles, International Association of Public Transport, 2014.
- [46] Prochowski L., *Mechanika ruchu*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2016.
- [47] Wrzecioniarz P. A., Ambroszko W., Górniak A., Energy efficient design of powertrain and body, Wrocław University of Technology, Wrocław 2011.
- [48] Prugar E., Ciesiołkiewicz A., Jeszka P., Żmudka Z., Sładkowski S., Określenie parametrów kinematycznych i wyznaczanie oporów ruchu pojazdu samochodowego metodą wybiegu, *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Energetyka* z. 101, 1987, str. 89-121.
- [49] Denton T., *Automobile electrical and electronic systems*, third edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- [50] Ocioszyński J., *Elektrotechnika i elektronika pojazdów samochodowych*, WSiP, Warszawa 1996.
- [51] Bolkowski S., *Elektrotechnika*, WSiP, Warszawa 2005.
- [52] Osowski J., Szabat J., *Podstawy teorii obwodów Tom 1*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.



- [53] Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction - <https://unece.org/sites/default/files/2021-05/R107r7e.pdf> [dostęp: 13.12.2022].
- [54] Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking - <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2015/R013r8e.pdf> [dostęp: 13.12.2022].
- [55] Li-Ion BMS - <http://liionbms.com/php/precharge.php> [dostęp: 29.12.2022].
- [56] How to design a precharge circuit for hybrid and electric vehicle applications, <https://www.sensata.com/sites/default/files/a/sensata-how-to-design-precharge-circuits-evs-whitepaper.pdf> [dostęp: 13.12.2022].
- [57] Maciejewski M., O zależności współczynnika oporu aerodynamicznego od prędkości jazdy, *Czasopismo techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej* 2012, str. 267-281.
- [58] Apanowicz J., *Metodologia ogólna*, Wydawnictwo Diecezji Pelplińskiej BERNARDINUM, Gdynia 2002.
- [59] *Opracowanie zbiorowe, redakcja: Stabryła A., Metodologia projektowania systemów organizacyjnych przedsiębiorstwa*, Wydawnictwo C.H. Beck 2015.