



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA: AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

**AUTOREFERAT ROZPRAWY
DOKTORSKIEJ**

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

1. 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.”

2. Motywacja

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 ogniwa 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 inżyniersko-technicznych oraz ekonomię 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.

3. Cel i teza pracy

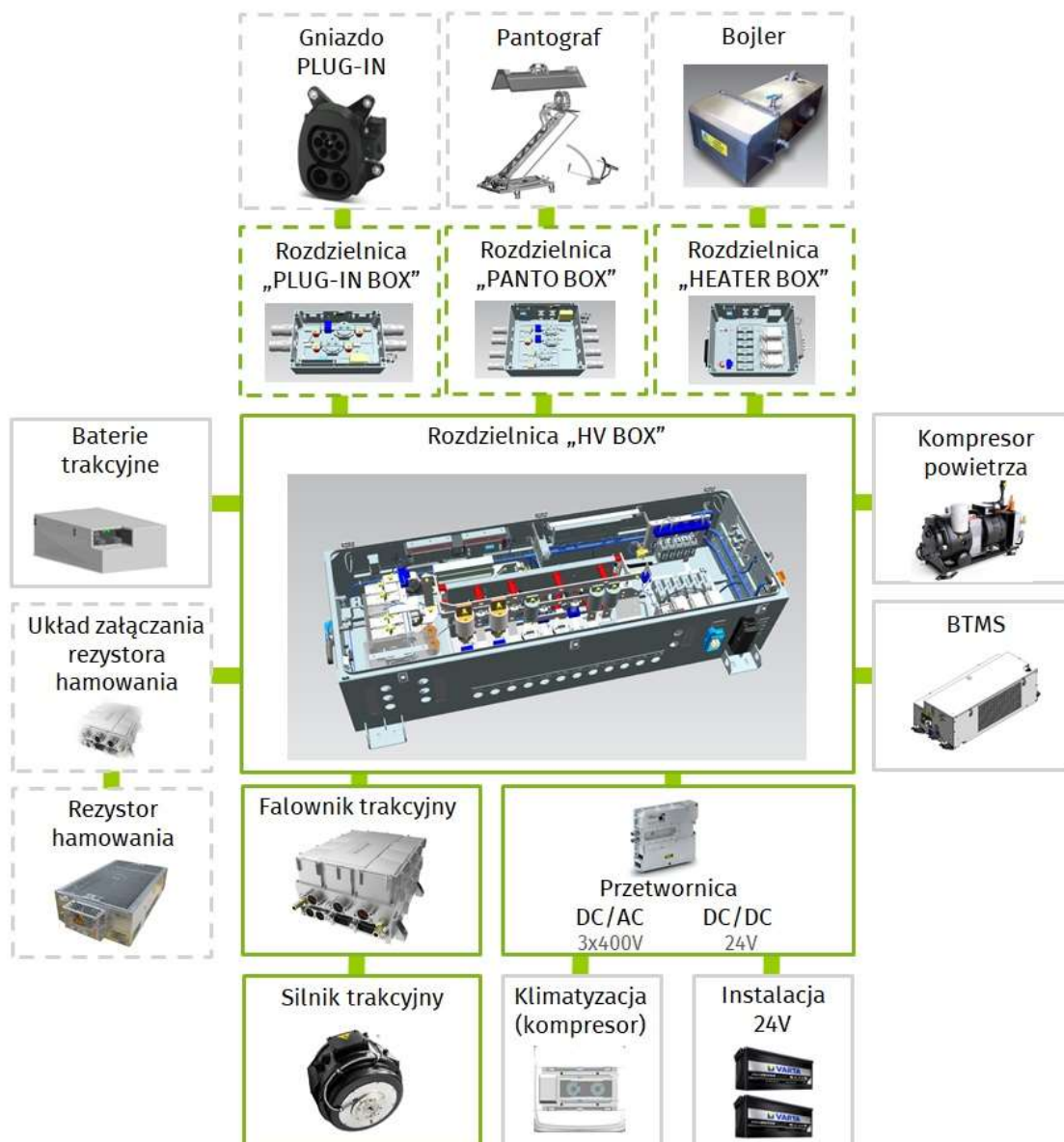
Celem rozprawy doktorskiej jest *opracowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych na podstawie realizacji projektu autobusu Solaris Urbino 9 LE electric*. Takie podejście pozwoli na kompleksowe ujęcie aspektów projektowania napędów elektrycznych w otoczeniu biznesowym 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 umożliwi 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*.

4. Najważniejsze wyniki pracy

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 wskazano, jakie problemy należy rozwiązać projektując elektryczne autobusy miejskie.

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. Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy elektrycznego układu napędowego zaprojektowanego dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric wraz z odbiornikami. Zieloną ramką zaznaczono elementy, które bezpośrednio stanowią przedmiot rozważań w 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. 1. Schemat ideowy elektrycznego układu napędowego zaprojektowanego dla autobusu Solaris Urbino 9 LE electric wraz z odbiornikami
 Źródło: opracowanie własne

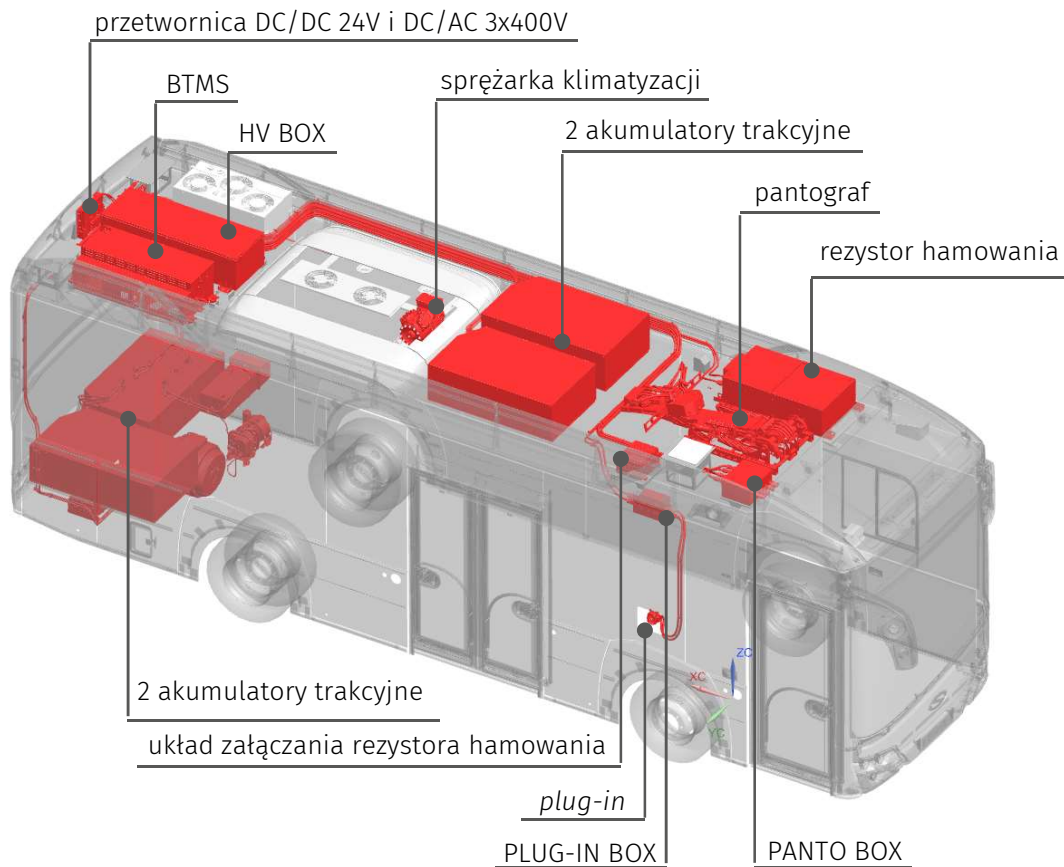
Powstało modułowe rozwiązanie pozwalające na skonfigurowanie dwunastu różnych wariantów układu napędowego, które zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Warianty występowania opcjonalnych elementów wysokiego napięcia w autobusie elektrycznym Solaris Urbino 9 LE electric

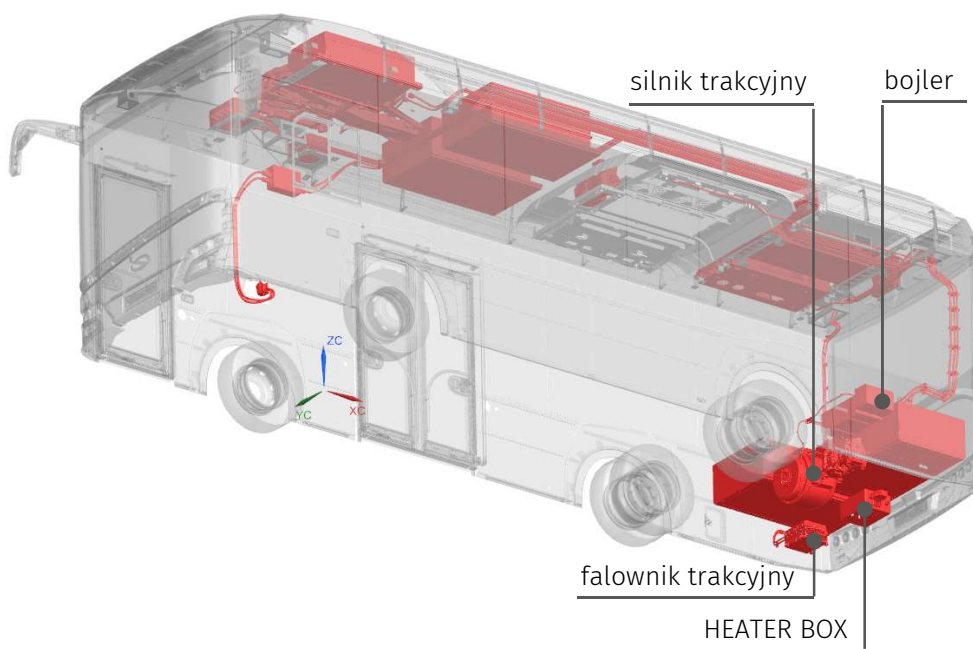
L.p.	Układ załączania rezystora hamowania	Układ ładowania <i>plug-in</i>	Układ ładowania pantografem	Układ zasilania bojlera
1.		X		
2.			X	
3.		X	X	
4.		X		X
5.			X	X
6.		X	X	X
7.	X	X		
8.	X		X	
9.	X	X	X	
10.	X	X		X
11.	X		X	X
12.	X	X	X	X

Źródło: opracowanie własne

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 (zdefiniowane w procedurze SORT). **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 rozdzielnice zasilająco-sterujące, 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 wysokiego napięcia. **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. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono model autobusu Solaris Urbino 9 LE electric uwzględniający rozmieszczenie komponentów wysokiego napięcia.



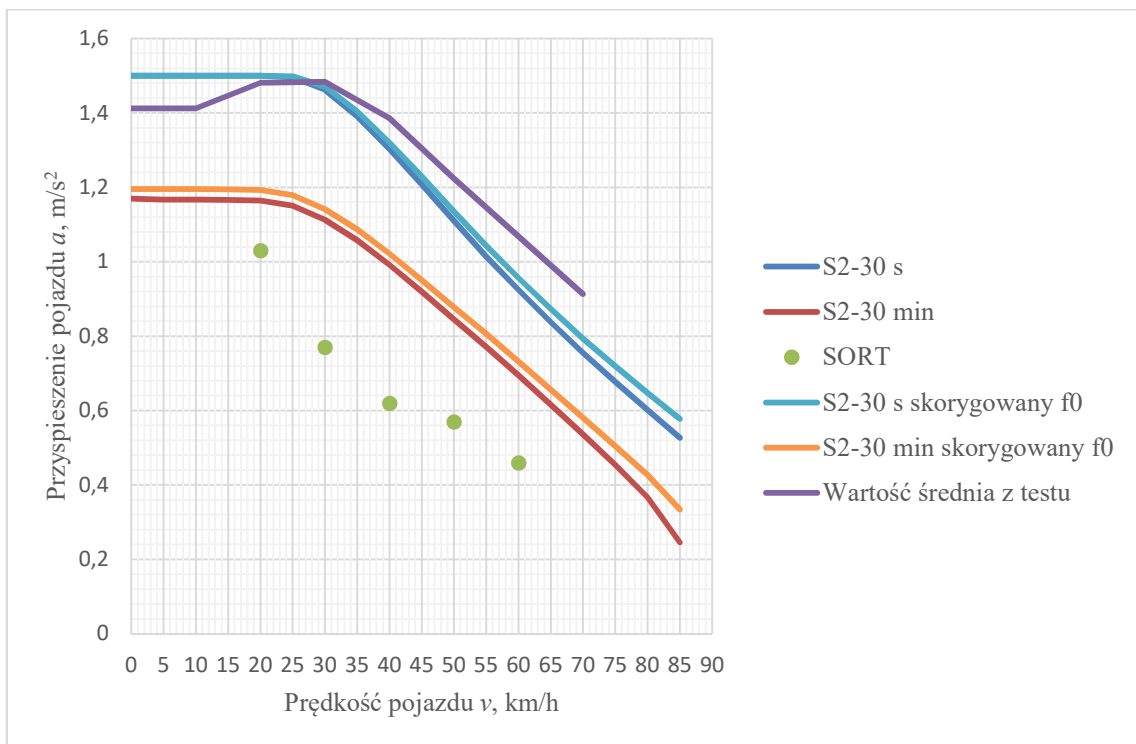
Rys. 2. Rozmieszczenie elementów wysokiego napięcia w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric – rzut z góry
 Źródło: opracowano na podstawie [4]



Rys. 3. Rozmieszczenie elementów wysokiego napięcia w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric – rzut z dołu
 Źródło: opracowano na podstawie [4]

Na podstawie przygotowanego projektu w firmie Solaris zbudowano prototyp autobusu, który wykorzystano 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.

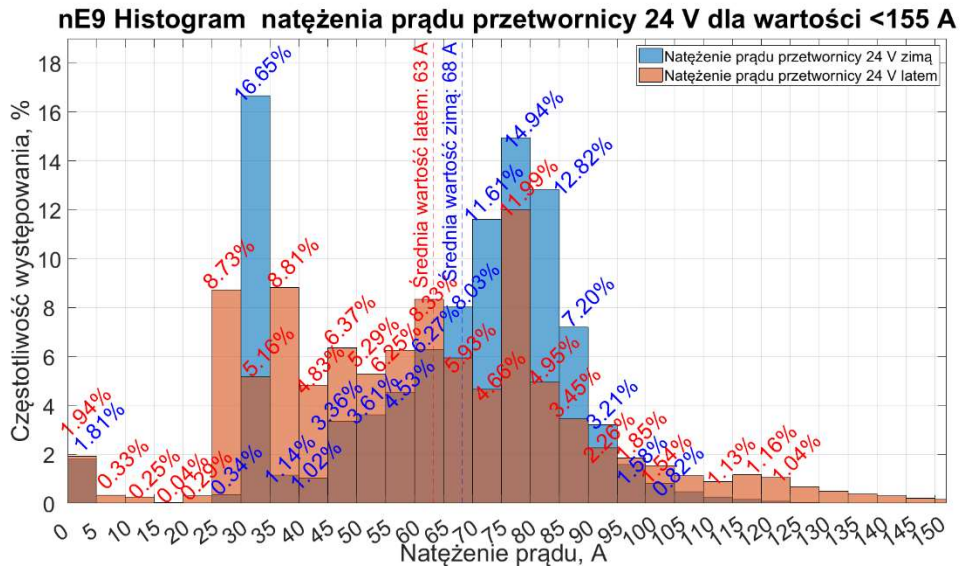
Przeprowadzono testy drogowe podczas których zbadano parametry trakcyjne zestawu silnik-falownik, dokonując w pierwszej kolejności wyznaczenia współczynników oporów powietrza i oporów toczenia na podstawie próby wybiegu, a następnie wyznaczenia przyspieszenia na podstawie pomiarów zmiany prędkości w czasie. Do badań wykorzystano urządzenia GPS Vbox Racelogic oraz CAN Vector VN 1610. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki symulacji dla przyspieszenia średniego w funkcji prędkości, przeprowadzonej w części teoretycznej rozprawy, zestawione z wynikami przyspieszenia średniego zebranymi w trakcie badań autobusu prototypowego.



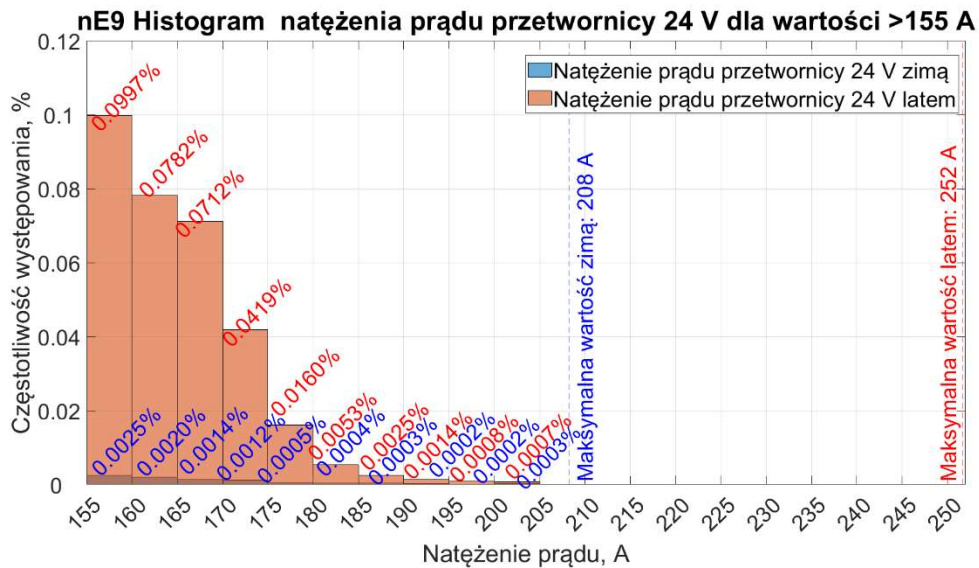
Rys. 4. Wyniki symulacji dla przyspieszenia średniego w funkcji prędkości dla trybów pracy dorywczej silnika S2-30 min i S2-30 s zestawione z minimalnymi przyspieszeniami średnimi wg SORT oraz przyspieszeniami średnimi z badań autobusu ($m = 16000$ kg; $R_{19,5} 265/70$; $U = 650$ V DC, $\alpha = 0\%$)
Źródło: opracowanie własne

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. Na rysunkach 5 i 6

zaprezentowano histogramy natężenia prądu pobieranego w instalacji 24 V DC grupy preseryjnych autobusów Solaris Urbino 9 LE electric.

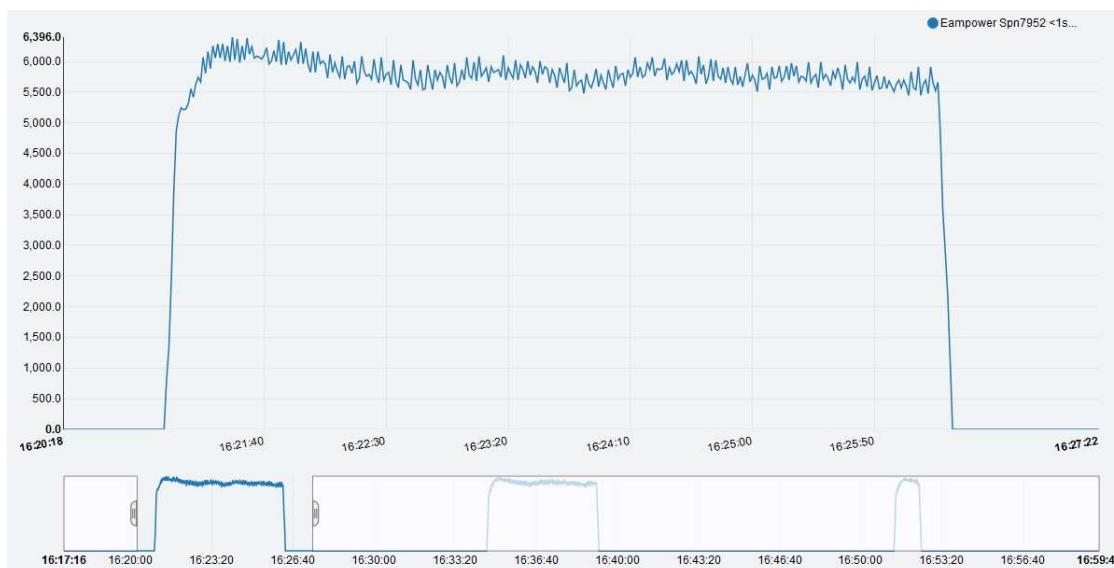


Rys. 5. Histogram natężenia prądu pobieranego w instalacji 24 V DC grupy autobusów Solaris Urbino 9 LE electric w okresie zimy i lata
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. 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 rysunku 7 przedstawiono przebieg poboru mocy sprężarki konwencjonalnej klimatyzacji zamontowanej w prototypowym pojeździe i zasilanej z przetwornicy DC/AC 3x400V.



Rys. 7. Przebieg poboru mocy sprężarki konwencjonalnej klimatyzacji zamontowanej w autobusie Solaris Urbino 9 LE electric
Źródło: opracowanie własne

5. Podsumowanie

Autor rozprawy zrealizował cel, jakim było **sformułowanie autorskiej metodologii 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.

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, skutkowałam 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 rozprawy.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć autora należy zaliczyć:

- opracowanie metodologii projektowania modułowego układu napędowego autobusów elektrycznych,
- opracowanie wymagań i koncepcji elektrycznego układu napędowego,
- dokonanie optymalizacji wielokryterialnej metodą sum ważonych z wykorzystaniem metody unitaryzacji zerowanej do normowania zmiennych, celem doboru komponentów elektrycznego układu napędowego,
- określenie wymagań dla przetwornicy DC/DC 24 V stosując autorską metodę statystyczną,
- opracowanie metodyki badawczej i wykonanie badań eksperymentalnych oraz testów drogowych autobusu elektrycznego z modułowym układem napędowym,
- udowodnienie postawionej tezy i uzyskanie znacząco lepszych wyników we wszystkich kryteriach oceny zaprojektowanego autobusu.

6. Wykaz publikacji autora

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. Sierszyński M., Chełchowski 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
3. Chełchowski Ł., Sierszyński M., Czop P., Adamczyk D., Banasiewicz M., Projektowanie elektrycznego układu napędowego autobusów miejskich, Przegląd elektrotechniczny, 8/2022, str. 154-157
4. Al-Saadi M., Patkowski B., Zaremba M., Karwat A., Pol M., Chełchowski Ł., Van Mierlo J., Berecibar M., Slow and fast charging solutions for Li-ion batteries of electric heavy-duty vehicles with fleet management strategies, Sustainability, 2021 vol. 13, str. 1-35
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. Sierszyński M., Chełchowski Ł., Pikuła M., Michalak D., Sidorski F., Projektowanie i eksploatacja systemów przeznaczonych do autobusów z napędem alternatywnym, Maszyny Elektryczne : zeszyty problemowe 2019 nr 1, str. 61-68
7. Patkowski B., Adamczyk D., Sidorski F., Sierszyński M., Pikuła M., Chełchowski Ł., Michalak D., Analysis of necessary sensors in city e-buses for observing the environment for each level of autonomy, 32nd international Electric Vehicle Symposium : international battery, hybrid

and fuel cell electric vehicle symposium : Lyon, France, May 19–22, 2019,
str. 1-12

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.