

Wrocław, dn. 02 maj 2024 r.

dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr.

Politechnika Wrocławska

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 14.05.2024

nr zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Piotra Dukalskiego

pt. „System rozwiązań konstrukcyjnych do projektowania silników elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy dla zastosowań w elektromobilności”

wykonanej pod kierunkiem dra hab. inż. Romana Kroka prof. PŚl.

Opiekunem pomocniczym był prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

*Niniejszą recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej
pismo RDAEETK.512.1.2024 z dnia 11 marca 2024 r.
na podstawie uchwały Rady Dyscypliny nr 10/2024 z dn. 20 lutego 2024 r.*

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Praca dotyczy aktualnej, intensywnie rozwijanej w ostatnich latach dziedziny analizy i projektowania silników elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy stosowanych do napędów pojazdów mechanicznych.

Koncepcja napędu samochodu elektrycznego z silnikami zabudowanymi w piastach kół prezentowana była od ponad 150 lat i mimo zmian w technice oraz motoryzacji jest ciągle aktualna oraz inspirująca w obecnych badaniach. Wynikami tych prac zainteresowane są fabryki produkujące pojazdy mechaniczne różnych wielkości i zastosowaniach, w których stosuje się bezpośredni napęd kół tych pojazdów eliminując przekładnie mechaniczne.

Układ napędowy samochodu elektrycznego musi spełniać wymagania drogowe związane z pokonywaniem przeszkód oraz dynamiką jazdy w zależności od klasy i przeznaczenia pojazdu. Maszyny elektryczne powinny pracować również jako prądnice zapewniające hamowanie rekupeacyjne, które zgodnie z najnowszymi trendami w elektromobilności obejmuje możliwie największą część procesu hamowania pojazdu.

Wymagania te są szczególnie trudne do spełnienia dla maszyn o kompaktowej konstrukcji, takich jak silniki do zabudowy w piastach kół, których masa zainstalowana jest w części nieresorowanej pojazdu, a wymiary ograniczone są wymiarami felg, sposobem umieszczenia układu hamulcowego i elementów zawieszenia.

Wszystkie wymienione powyżej czynniki sprawiają, że silniki do zabudowy w piastach kół pracują ze stosunkowo dużą gęstością prądu i dużą częstotliwością zasilania, co skutkuje

generowaniem znacznych strat mocy w uzwojeniu i magnetowodzie oraz wzrostem ich temperatury pracy istotnym szczególnie dla magnesów trwałych.

Praca doktorska związana jest z określeniem kierunków rozwoju konstrukcji silników do zabudowy w piastach kół pojazdów mechanicznych uwzględniających zmienne warunki pracy oraz oceny korzyści płynących z zastosowania opracowanych systemów rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych.

Zagadnienia te wpisują się w dyscyplinę naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i techniki kosmiczne, nie stanowią problemu wyłącznie teoretycznego, ale mają duże znaczenie dla praktyki. Prezentowane wyniki świadczą o istotnym znaczeniu i aktualności prowadzonych badań naukowych a ich rozwój jest w pełni uzasadniony. Dlatego uważam, że podjęta problematyka badań jest trafna, potrzebna i na czasie.

2. Cel i teza naukowa rozprawy

Praca Pana mgr inż. Piotra Dukalskiego jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniami analizy teoretycznej oraz zastosowaniami konstrukcji silników elektrycznych do bezpośredniego napędu w kołach pojazdów mechanicznych dla różnych warunków pracy.

Autor sprecyzował tezę naukową rozprawy (str. 21), która brzmi:

Opracowana metoda analizy systemów rozwiązań konstrukcyjnych silnika do zabudowy w piaście koła, wykorzystująca:

- *analizę wyników badań laboratoryjnych silnika z odpowiednio rozmieszczonymi czujnikami temperatury,*
- *sprzężony model elektromagnetyczny i cieplno-przepływowy, skalibrowany pomiarami wykonanymi na zbudowanych prototypach, umożliwiający przeprowadzenie badań silnika przy odwzorowaniu rzeczywistych warunków pracy występujących w samochodzie*

pozwoli na tworzenie nowych rozwiązań konstrukcyjnych poprawiających parametry elektromechaniczne i cieplne silnika. Metoda umożliwi przeprowadzenie analizy systemu rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu redukcję masy silnika, zmniejszenie jego temperatury pracy oraz rozszerzenie zakresu pracy silnika.

Dla udowodnienia tezy pracy Autor przyjął następujący zakres badań:

1. Opracowanie silnika modelowego oraz zbudowanie modeli fizycznych w celu oceny technologii produkcji opracowanych rozwiązań konstrukcyjnych.
2. Zabudowę wielu czujników temperatury w silniku modelowym (czujniki pomiaru temperatury w magnesach trwałych, w żłobkach, na rdzeniu magnetycznym stojana, oraz na elementach układu chłodzenia).
3. Przeprowadzenie badań laboratoryjnych silnika modelowego oraz modeli fragmentów silnika.

4. Opracowanie sprzężonych modeli obliczeniowych silników w środowisku programu ANSYS Motor CAD - modele obwodów elektromagnetycznych oraz modele cieplno – przepływowe.
5. Weryfikację modeli symulacyjnych z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych odpowiedników fizycznych.
6. Wykonanie obliczeń silników przy:
 - a) zalaniu czoł uzwojenia żywicą epoksydową o różnej przewodności cieplnej,
 - b) zastosowaniu radiatorów na czołach uzwojenia,
 - c) zastosowaniu izolacji ceramicznych pomiędzy uzwojeniem stojana i układem chłodzenia,
 - d) różnych długościach rdzenia magnetycznego,
 - e) zmianie liczby par biegunów p,
 - f) magnesach trwałych każdego bieguna jednolitych i podzielonych na fragmenty;
7. Przeprowadzenie badań symulacyjnych w programie ANSYS Motor CAD w stanach ustalonych oraz wykonanie badań symulacyjnych wpływu zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych silnika na jego parametry pracy. Symulacje obejmują pracę silnika w samochodzie osobowym, typu SUV oraz w samochodzie dostawczym poruszającym się w cyklach jazdy miejskiej, okołomiejskiej, po autostradzie oraz na podjazdach po nachyleniu.
8. Wykonanie i badanie laboratoryjne silnika prototypowego na podstawie wniosków z przeprowadzonych badań symulacyjnych.

Zagadnienie naukowe, jakie Autor postawił do rozwiązania, zostało określone logicznie i precyzyjnie. Prezentowane wyniki symulacji komputerowych oraz wyniki pomiarów na modelach fizycznych, mające na celu udowodnienie postawionej tezy, przedstawiono w sposób czytelny i przejrzysty.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowana praca napisana jest na 217 stronach, ma 16 rozdziałów merytorycznych (w tym jeden z wnioskami), bardzo obszerny wykaz literatury (195 pozycji w tym 23 pozycje współautor-skie Doktoranta) oraz wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów.

Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac związanych z rozwojem metod analizy stanów pracy oraz zastosowaniem wyników obliczeń do opracowania konstrukcji i technologii maszyn elektrycznych pracujących w bezpośrednich napędach kół pojazdów mechanicznych.

W rozdziale 2 bardzo obszernie opisano stan zagadnienia, wymieniono zalety i wady silników elektrycznych zabudowanych w piaście oraz wybrane aspekty projektowania tego typu silników.

Przedstawiono wybrane aspekty projektowania silników do zabudowy w piastach kół samochodów elektrycznych stanowiące duże wyzwanie dla konstruktorów i technologów wymagających podejścia kompleksowego i wymuszają zastosowanie kompaktowej budowy. System

rozwiązań konstrukcyjnych oraz technologicznych często ogranicza możliwości projektu obwodu elektromagnetycznego i pośrednio decyduje o parametrach silnika.

Badania takich silników wymagają dużych nakładów finansowych i wielodyscyplinarnej pracy zespołowej specjalistów różnych dziedzin. W pracy przedstawiono rozwiązania zespołu zastosowane w silnikach prototypowych przeznaczonych do samochodów elektrycznych opracowanych w Sieci Badawczej Łukasiewicz -Górnośląski Instytut Technologiczny - Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych.

W rozdziale 4 Doktorant opisał stanowisko badawcze prototypowych silników w laboratorium Centrum Maszyn i Napędów Elektrycznych Sieci Badawczej Łukasiewicz Górnośląskiego Instytutu Technologicznego. Do pomiaru parametrów elektromechanicznych stosowano wysokiej klasy analizator mocy LEM D6000 wraz z przetwornikami prądowymi. Taki układ umożliwił pomiar:

- a) napięcie i prądów silnika oraz mocy czynnej i współczynnika mocy,
- b) napięcia i prądu pobieranego przez sterownik oraz mocy pobieranej przez cały napęd elektryczny,
- c) wielkości mechanicznych - momentu i prędkości obrotowej.

Ze względu na wykonanie poszerzonych badań termicznych silnik wyposażono w dużą liczbę czujników do pomiaru temperatury. Zastosowano małej wielkości czujniki rezystancyjne Pt100. Czujniki podłączono do wielokanałowego rejestratora umożliwiającego archiwizację temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych.

Ponieważ silnik zasilany jest napięciem o wysokiej częstotliwości, wykonano dodatkowo pomiar temperatury magnesów trwałych umieszczonych w wirniku zewnętrznym.

W rozdziale 5 przedstawiono konstrukcję badanego silnika. Opisano topologię różnych rozwiązań konstrukcyjnych napędów pojazdów elektrycznych, zilustrowanych wieloma rysunkami szczegółowymi, od najbardziej zbliżonych do znanych napędów spalinowych do rozwiązań napędu bezpośredniego, w którym wszystkie elementy mechaniczne, uczestniczące w przeniesieniu momentu obrotowego pomiędzy silnikiem a kołem są wyeliminowane.

W rozdziale 6 przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne zmniejszające opory cieplne pomiędzy uzwojeniem stojana a układem chłodzenia. Część rozwiązań konstrukcyjnych jest przedmiotem przyznanych patentów.

Pokazano zastosowanie żywicy epoksydowej do wypełnienia przestrzeni między czołami uzwojenia a elementami obudowy stojana, które odbierają ciepło np. kadłubem silnika lub konstrukcją wsporczą z kanałami przepływu cieczy chłodzącej. Korzystne jest również wypełnienie żywicą przestrzeni wewnątrz żłobka, pomiędzy uzwojeniem a izolacją żłobkową i rdzeniem magnetycznym stojana.

W pracy przedstawiono wyniki prób termicznych trzech żywic epoksydowych o różnych parametrach fizycznych. Testy polegały na wykonaniu prób nagrzewania modelu wycinka stojana uzwojonego, na którym umieszczono czujniki temperatury Pt100. Żywice różniły się między innymi przewodnością cieplną. Odniesieniem były wyniki pomiarów przeprowadzone na modelu wycinka stojana uzwojonego, który nie został zalany w żywicy epoksydowej.

W rozprawie zaproponowano zastosowanie dodatkowego radiatora bocznego, który ma na celu poprawienie odbioru ciepła z czoł uzwojenia. Rozwiązanie to stanowi przedmiot patentu Pat.233086.

Kolejnym rozwiązaniem jest zastosowanie przekładki ceramicznej pomiędzy radiatorem bocznym a czołami uzwojenia. Przekładka ceramiczna wypełnia przestrzeń pomiędzy radiatorem bocznym, a czołami uzwojenia. Rozwiązanie pozwala na zastąpienie przestrzeni pomiędzy radiatorem bocznym a czołami uzwojenia, która jest wypełniona żywicą epoksydową, pierścieniem wykonanym z materiału dielektrycznego o większej przewodności cieplnej niż żywica. Jako materiał do wykonania rozpatrywanego elementu wybrano tlenek glinu (Al_2O_3) - dielektryk o bardzo dobrych właściwościach termicznych.

Kolejnym rozwiązaniem jest zastosowanie w silniku izolacji żłobkowej ceramicznej wykonanej z korundu, której przewodność cieplna jest zbliżona do przewodności cieplnej rdzenia magnetycznego.

W rozdziale 7 i 8 rozprawy Doktorant opisał modele obliczeniowe oraz ich kalibrację z wynikami badań laboratoryjnych oczujnikowanego silnika prototypowego. Modele obliczeniowe wykonano w środowisku programu ANSYS Motor CAD.

Zaletą programu jest możliwość sprzężenia obliczeń modelu obwodu elektromagnetycznego oraz obliczeń modelu termicznego.

Model obliczeniowy składa się z trzech modeli, wykonanych w modułach:

- a) Emagnetic,
- b) Thermal,
- c) Lab.

Sprężony model elektromagnetyczno-cieplny umożliwia obliczenie charakterystyk pracy silnika. Moduły Emagnetic oraz Thermal wykorzystano do kalibracji modeli symulacyjnych z wykorzystaniem wyników prób nagrzewania przeprowadzonych w laboratorium. Po kalibracji, na podstawie przygotowanego modelu obwodowo-polowego utworzono model rozpatrywanego silnika w module Lab. Model ten posłużył zarówno do wykonania obliczeń charakterystyk statycznych silnika oraz symulacji jego pracy w cyklach jazdy samochodów (przedstawionych w kolejnych rozdziałach).

W rozdziale 9 przedstawiono modele obliczeniowe systemów rozwiązań konstrukcyjnych. Rozwiązania te zwiększają skuteczność odprowadzania ciepła z kluczowych części silnika i zwiększają zakres jego bezpiecznej pracy.

Obliczenia przeprowadzono dla 10 modeli o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, które zweryfikowano na podstawie wyników badań laboratoryjnych.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu różnych rozwiązań konstrukcyjnych silnika na parametry ruchowe obliczono charakterystyki elektromechaniczne w pełnym zakresie zmian prędkości obrotowej. Stosując sprzężony model elektromagnetyczno-cieplny silnika w obliczeniach uwzględniono wpływ zmiany temperatury w elementach silnika na kształt charakterystyk. Do rozważań przyjęto pracę ciągłą (S1) oraz założono, że temperatura maksymalna w uzwojeniu nie może przekroczyć $T_{Cu} \leq 160^{\circ}\text{C}$, natomiast temperatura magnesów trwałych nie może przekroczyć wartości $T_{mag} \leq 110^{\circ}\text{C}$. W obliczeniach pokazano zmianę zakresu dopuszczalnej pracy silnika przy zastosowaniu różnych systemów rozwiązań konstrukcyjnych.

W rozdziałach 10 – 12 przeprowadzono analizę wpływu rozwiązań konstrukcyjnych silnika na jego pracę w samochodzie poruszającym się w różnych scenariuszach jazdy.

Do analizy termicznej silnika podczas jazdy samochodu wykorzystano moduł Lab programu ANSYS Motor-CAD, który pozwala na przeprowadzenie symulacji na sprzężonym modelu elektromagnetyczno-cieplnym silnika. W badaniach silnika elektrycznego można zadać różne cykle stosując model utworzony dla wybranego typu samochodu. Na podstawie przebiegu prędkości pojazdu w rozpatrywanym cyklu jazdy, program oblicza zapotrzebowanie na moment obrotowy. Obliczenia można przeprowadzić uwzględniając sprzężenie pola elektromagnetycznego z polem temperatury. Takie obliczenia uwzględniają wpływ temperatury na parametry pracy obwodu elektromagnetycznego.

Symulacje przeprowadzono dla scenariuszy jazdy:

- Artemis Urban – cykl jazdy w warunkach miejskich,
- Artemis Motorway 150 – cykl jazdy uwzględniający jazdę po autostradzie,
- Cykl US06 – jazda bardzo dynamiczna
- Podjazdy o różnym nachyleniu drogi 12 %, 17 %, 20 %.

W rozprawie zamieszczono wyniki symulacji przeprowadzonych dla samochodu Nissan Leaf oraz samochodu typu SUV.

Przeprowadzona w rozdziałach analiza pracy silnika obejmowała rozwiązania konstrukcyjne:

- zmianę długości rdzenia magnetycznego silnika $L_{Fe}=45\text{ mm}$, $L_{Fe}=50\text{mm}$ i $L_{Fe}=60\text{mm}$,
- zastosowanie wybranych systemów rozwiązań zmniejszających opór cieplny między uzwojeniem a układem chłodzenia (model 1, model 2, model 8, model 9),

- zmianę obwodu elektromagnetycznego wynikającą ze zwiększenia liczby par biegunów magnetycznych.

Przeprowadzone analizy podsumowano szczegółowymi wnioskami mającymi szczególne znaczenie dla konstruktorów tego typu maszyn.

W rozdziałach 13 i 14 przedstawiono analizę wyników badań laboratoryjnych 3 prototypowych silników elektrycznych do zabudowy w piastach kół samochodów elektrycznych. Na podstawie wyników badań silników prototypowych przedstawiono wnioski dotyczące konstrukcji i technologii tych maszyn min. wykonanie maszyn o mniejszych gabarytach i mniejszej masie.

W rozdziale 15 przeprowadzono analizę pracy nowego silnika do zabudowy w piaście koła samochodu dostawczego. W projekcie wykorzystano wyniki opracowane w niniejszej pracy doktorskiej. W opracowywanym napędzie zastosowano dwa silniki elektryczne zamontowane w tylnej osi napędowej samochodu. Napęd elektryczny ma współpracować z oryginalnym silnikiem spalinowym samochodu i umożliwiać jego pracę jako napęd elektryczny lub napęd hybrydowy.

Dla trzech, różnych napięć zasilania wykonano analizę pracy silnika elektrycznego w napędzie samochodu Fiat Ducato w różnych cyklach jazdy: Artemis Urban, Artemis Road i Artemis Motorway. Wyniki badań podsumowano interesującymi wnioskami praktycznymi dla projektantów tego typu maszyn.

W rozdziale 16 Doktorant przedstawia 12 wniosków i uwag końcowych w postaci bardzo szczegółowo opisanych wyników. Opracowane zasady pozwoliły na stworzenie nowych rozwiązań konstrukcyjnych o lepszych parametrach elektromechanicznych i cieplnych silnika. Stworzone modele obliczeniowe i przeprowadzone analizy rozwiązań konstrukcyjnych pozwalają zmniejszyć masę i temperaturę pracy silnika.

Praca realizowana jest w Sieci Badawczej Łukasiewicz - Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych Komel, gdzie Doktorant jest pracownikiem. Z tego powodu prace badawcze o większym zakresie realizowane są zespołowo. Jest to działanie pozytywne bo w zespole można podejmować znacznie większy zakres badań. Wieloma pracach badawczymi Doktorant kierował i mógł realizować własne koncepcje.

Do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej i wkład Doktoranta w rozwój nauki można zaliczyć:

1. Opracowanie sprzężonych modeli: elektromagnetycznego, cieplnego i przepływowego silnika zabudowanego w piaście koła samochodu w programie ANSYS Motor Cad. Dla fragmentów silnika z nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi opracowano autorskie sieci cieplne uzupełniające klasyczne moduły dostępne w programie.
2. Opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych możliwych do wykorzystania przy budowie silników do zabudowy w kole samochodu.

3. Bezpośredni udział w zbudowaniu serii prototypów silników do zabudowy w kole samochodu z wdrożonymi nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi oraz dodatkowo modeli fizycznych fragmentów silnika przeznaczonych do badań (np. modelu fragmentu stojana do badań technologii nakładania warstwy korundu stanowiącej izolację żłobkową).
4. Opracowanie koncepcji i udział w budowie stanowiska pomiarowego z silnikiem zabudowanym w feldze koła samochodu z dużą ilością rozmieszczonych czujników do pomiaru temperatury we wszystkich elementach stojana i wirnika silnika. Stanowisko badawcze umożliwiło przeprowadzenie pomiarów silnika w pełnym zakresie zmiany momentu i prędkości obrotowej podczas jego pracy w kole samochodu.
5. Weryfikacja i kalibracja modelu silnika na podstawie wyników bardzo wielu pomiarów w stanach cieplnie ustalonych i nieustalonych, skutkujące uzyskaniem bardzo dużej dokładności odwzorowania zarówno parametrów elektromechanicznych, jak i temperatur elementów silnika.
6. Przeprowadzenie wielu badań symulacyjnych silnika zabudowanego w piaście koła w różnych typach samochodów (osobowy, SUV, dostawczy) i różnych cyklach jazdy (cykl miejski, mieszany, autostradowy) oraz na podjazdach i wzniesieniach nachylonych pod różnym kątem. Na podstawie uzyskanych wyników badań wykazano możliwości znacznej poprawy parametrów elektromechanicznych oraz stanu cieplnego silnika z opracowanymi przez Doktoranta innowacyjnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi i udoskonaleniu technologii jego wykonania. Dodatkowo na podstawie wyników badań określono kierunki możliwych dalszych innowacji konstrukcji tego typu silników elektrycznych zmierzające do poprawy jego parametrów.

4. Dorobek naukowy Doktoranta

Doktorant jest współautorem 14 publikacji w renomowanych czasopismach oraz konferencjach krajowych i zagranicznych. Jest współautorem 1 zgłoszenia patentowego oraz 8 patentów (w latach 2016 do 2022) udzielonych przez Urząd Patentowy RP, które ściśle związane są z tematem pracy doktorskiej.

Był kierownikiem projektu i zespołu, który w 2020 r. za pracę „*Silnik do zabudowy w kołach samochodów elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy*” (bardzo powiązaną z tematem rozprawy doktorskiej) otrzymał bardzo prestiżową Nagrodę Badawczą Simensa.

Dorobek naukowy oceniam bardzo pozytywnie ale niestety Doktorant nie ma żadnej publikacji indywidualnej.

5. Konkluzja

Stwierdzam, że rozprawa jest opracowana starannie. Układ pracy jest logiczny, a strona graficzna wzorowa. Wnioski w poszczególnych rozdziałach oraz wnioski końcowe są poprawne i interesujące.

W tekście można zauważyć „niezręczne” (żargonowe) sformułowania, które nie obniżają mojej pozytywnej oceny pracy.

Wyniki uzyskane w rozprawie potwierdzają, że teza pracy została udowodniona, a założone cele pracy osiągnięte.

Doktorant wykazał się dobrą znajomością najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie, a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów.

Doktorant wykazał się również dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i technik programowania. Praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Stwierdzam, że rozprawa pt. **„System rozwiązań konstrukcyjnych do projektowania silników elektrycznych o zwiększonej gęstości mocy dla zastosowań w elektromobilności”** stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia wszystkie wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Piotra Dukalskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.