

Projekty PBL jako przykład nowoczesnego kształcenia zindywidualizowanego w obszarze energoelektroniki

Streszczenie. W artykule przedstawiono metody nowoczesnych form kształcenia zapewniających indywidualne podejście do wymagań studenta na przykładzie kształcenia „Project/Problem Based Learning” realizowanego w Politechnice Śląskiej w ramach Inicjatywy Doskonałości Uczelnia Badawcza. W artykule opisano trzy przykładowe projekty zrealizowane w ostatnim czasie, związane z zagadnieniami energoelektroniki, napędu elektrycznego i robotyki.

Abstract. Modern educational methods ensuring individualized approach for student's expectations, based on Project/Problem based Learning realized recently at the Silesian University of Technology under Initiative of Excellence – Research University are described in the paper. Three examples of recently realized projects, focused on area of power electronics, electrical drives are presented. (PBL Activities as an example of modern individual education in area of power electronics).

Słowa kluczowe: projekty PBL, Inicjatywa doskonałości, kształcenie zindywidualizowane, energoelektronika.

Keywords: PBL projects, excellence initiative, individualized teaching, power electronics.

Wstęp

Kształcenie studentów, w szczególności na poziomie studiów technicznych pierwszego stopnia (inżynierskich) wymaga coraz bardziej zindywidualizowanego podejścia do procesu kształcenia. Wynika to głównie ze zróżnicowanych oczekiwań studentów w zakresie rezultatów kształcenia. Oczekiwanie te można w dość ogólnym podejściu podzielić na trzy grupy. Pierwsza z nich to studenci o najniższych oczekiwaniach, których celem jest ukończenie studiów wraz z uzyskaniem tytułu zawodowego i podjęcie pracy zawodowej. Druga grupa, to studenci nieco bardziej wymagający, często planujący kontynuację edukacji na studiach magisterskich, ale nie wykazujący własnej inicjatywy w zakresie oferowanych treści kształcenia. Ta grupa studentów uczęszcza zazwyczaj na zajęcia oferowane w podstawowym toku kształcenia, a w zakresie treści obieralnych kieruje się decyzją większości (lub bazuje na krążących w środowisku opiniach, co do preferencji w zakresie przedmiotów). Trzecia grupa jest grupą niezbyt liczną, ale za to najbardziej wymagającą. To zazwyczaj kilka procent studentów danego kierunku, którzy mają określone oczekiwania w zakresie treści kształcenia, które chcieliby zgłębić, a jednocześnie grupa zainteresowana niekonwencjonalnymi metodami kształcenia. Spośród nich najczęściej rekrutują się kandydaci na studia doktoranckie, podejmowane zarówno w macierzystej uczelni, jak i w innych ośrodkach akademickich, w tym zagranicznych. Studenci zaliczani do tej grupy najczęściej już na bardzo wczesnych etapach edukacji udzielają się w organizacjach studenckich, działają w kołach zainteresowań, biorą udział w mobilnościach międzynarodowych oraz wnioskuje i podejmują kształcenie IOS (indywidualna organizacja toku studiów). Dużą popularnością wśród tej grupy studentów cieszą się ostatnio zajęcia realizowane w formie PBL (Project lub Problem Based Learning), którym poświęcono niniejszy artykuł.

Struktura i tematyka projektów PBL

Tematyka zajęć PBL może pochodzić zarówno od grup studenckich, jak i od kadry akademickiej pełniącej rolę mentorów i opiekunów w trakcie realizacji zajęć. Projekty, których przykłady podano w artykule zrealizowane zostały w ramach konkursu projektów zorganizowanego przez Politechnikę Śląską w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza (IDUB) [1]. Projekty PBL w ramach tej inicjatywy planowane były do realizacji

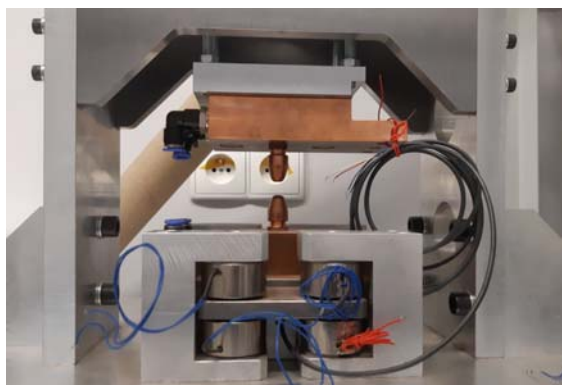
jako zajęcia interdyscyplinarne w wymiarze pełnego semestru, realizowane pod opieką maksymalnie trzech opiekunów przez grupę liczącą od 4 do 6 studentów. Interdyscyplinarność polegała na skomponowaniu zespołu studentów z różnych kierunków i różnych lat studiów. Podobnie wymagania stawiane były opiekunom – obszar zainteresowań komplementarnie pokrywający tematykę projektu. W ramach każdego projektu zaakceptowanego do realizacji studenci otrzymywali środki finansowe na zakup materiałów niezbędnych do realizacji (w przypadku opisywanych projektów był to budżet w wysokości do 5 tys. zł) oraz dostęp do bazy laboratoryjnej uczelni, natomiast opiekunom przyznawane były godziny dydaktyczne (dla realizowanych projektów opiekunowie mieli do dyspozycji łącznie 60 godzin dydaktycznych).

Tematyka projektów wspieranych w ramach IDUB obejmuje całe spektrum zagadnień technicznych dotyczących badań prowadzonych na wszystkich wydziałach uczelni z możliwością ich realizacji zarówno w języku polskim, jak i angielskim. Przykładowe zagadnienia zgłoszone do jednego z poprzednich konkursów (5 edycja) w zakresie elektroniki i automatyki to: układ sztucznych płuc dla manekina termicznego, projekt koncepcyjny autonomicznego robota czyszczącego, projekt koncepcyjny pojazdu AGV, silnik jonowy jako źródło zasilania pneumatycznego, czy badania docisku aerodynamicznego pojazdu wyścigowego. Do wspomnianego konkursu zgłoszono 76 projektów zaakceptowanych do realizacji. Należy zauważyć, że liczba zgłaszanych projektów rośnie w kolejnych edycjach, co świadczy o coraz większej popularności tej formy kształcenia (przykładowo, w II edycji, w ramach której realizowany był jeden z projektów opisywanych w dalszej części artykułu zgłoszono tylko 20 pomysłów), a w edycji VII aż 107 [2].

Bardzo istotnym aspektem realizacji projektów PBL jest fakt ich łączności z realizacją prac badawczych i projektów naukowych oraz innych form aktywności studenckiej – np. działalności studenckich kół naukowych. Dzięki temu tematyka projektów jest aktualna, nowatorska oraz, co jest wymogiem konkursów IDUB, interdyscyplinarna. Pozwala zatem na pozyskanie aktualnej wiedzy oraz poszerzenie horyzontu podejmowanych zagadnień, ich wzajemnego przenikania się oraz umiejętności podziału kompetencji na poszczególne członków zespołu. Te wszystkie elementy budują wysoką wartość dydaktyczną projektów PBL.

Electrohammer czyli docisk elektromagnetyczny

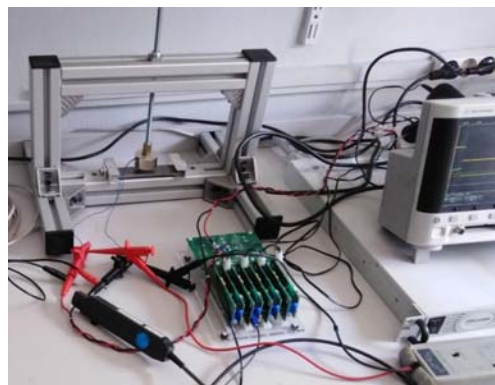
Pierwszy z opisywanych projektów PBL zrealizowany został przy współpracy z Siecią Badawczą Łukasiewicz – Instytutem Spawalnictwa (obecnie Górnośląski Instytut Technologiczny). Projekt dotyczy opracowania docisku elektromagnetycznego elektrod zgrzewarki rezystancyjnej. Procesy zgrzewania rezystancyjnego wymagają nie tylko odpowiednio dużego prądu zgrzewania, ale również odpowiednio dużej, występującej w stosunkowo krótkim czasie, siły docisku [3]. Obecnie stosowane systemy docisku elektrod, to oprócz wychodzących z użycia systemów pneumatycznych i hydraulicznych, systemy oparte na serwonapędach. Systemy te jednak mają liczne wady (do głównych należy mała dynamika systemu) [4]. Rozwój systemów elektromagnetycznych, w szczególności w zakresie sterowania i zasilania, może zapewnić wytworzenie w krótkim czasie dostatecznie dużej siły przyciągania. Zakres prądów, sił i czasów zgrzewania może przyjmować dość szeroki zakres. Przykładowo dla blach stalowych o grubości 1,5 mm prąd zgrzewania to około 10 kA w czasie około 300 ms, a wymagana siła docisku oscyluje w zakresie od 1 kN do 3 kN. W ramach projektu istotne znaczenie miały tylko dwa ostatnie parametry (prąd zgrzewania nie był brany pod uwagę). Do badań wykorzystano dedykowany model zgrzewarki opracowany w Łukasiewicz – Instytucie Spawalnictwa, przedstawiony na Rys. 1 (widoczne są cztery przednie elektromagnesy oraz system elektrod miedzianych). Stanowisko zawierało ruchomą elektrodę połączoną z płytą stalową umieszczoną na czterech wspornikach zawierających po dwa elektromagnesy każdy (przyciągający i odciągający). Płyta ta połączona była z tensometrycznym czujnikiem siły C9C firmy HBM [5].



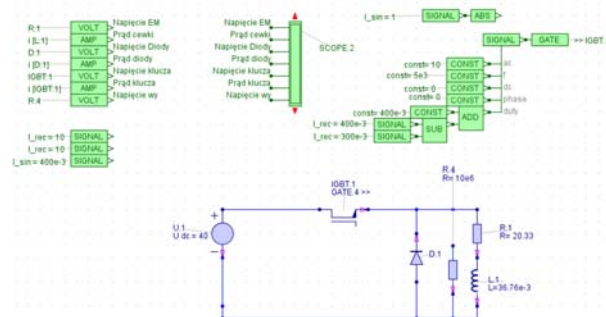
Rys. 1. Model zgrzewarki dedykowany do badania siły docisku

W projekcie skupiono się przede wszystkim na opracowaniu systemu dwustanowego sterowania elektromagnesami (zamknięcie i otwarcie), zakładając, że docelowo system wyposażony zostanie jeszcze w czujnik przemieszczenia pozwalający na sterowanie automatyczne w pętli sprzężenia zwrotnego (detekcja przemieszczenia elektrody). Regulację siły docisku zrealizowano metodą amplitudową zmieniając podawane napięcie zasilania w zakresie od 0 do 60 V. Dodatkowo zapewniono regulację prądu elektromagnesu poprzez sterowanie PWM z częstotliwością 2-5 kHz. Sterowanie elektromagnesami zrealizowano za pomocą przerywaczy tranzystorowych (odrębnych dla każdego elektromagnesu). Badania eksperymentalne poprzedzono symulacją GeckoCircuits badając wpływ indukcyjności elektromagnesu na dynamikę procesu przełączania oraz przeprowadzono badania eksperymentalne pojedynczego elektromagnesu. Na Rys. 2 przedstawiono fragment stanowiska do testowania

pojedynczego elektromagnesu z widocznym zespołem ośmiu przerywaczy tranzystorowych, a na Rys. 3 odpowiadający im układ symulacyjny, opracowany w środowisku GeckoCircuits.



Rys. 2. Stanowisko do testowania przerywaczy tranzystorowych



Rys. 3. Model symulacyjny GeckoCircuits pojedynczego łącznika

Badania symulacyjne pozwoliły na określenie wpływu indukcyjności elektromagnesu na szybkość jego załączenia i wyłączenia (stromość narastania i opadania prądu). Badania wykazały, że przy zastosowanych częstotliwościach przełączeń wpływ indukcyjności jest znikomy.

W drugim etapie przeprowadzone zostały badania mające na celu detekcję położenia elektrody z czujników przemieszczenia oraz wartości siły z tensometru i sprzężenie tych informacji ze sterowaniem PWM. Do tego celu opracowano odpowiednie oprogramowanie do akwizycji danych z tensometru (pomiar wymagał zastosowania odpowiedniego systemu wzmacniaczy) oraz algorytmu sterowania. Ze względu na złożoność zagadnienia detekcji przemieszczenia elektrod w projekcie zdecydowano się na sterowanie elektromagnesów wyłącznie na podstawie danych z tensometru (wyposażenie układu w czujniki przemieszczenia będzie przedmiotem przyszłych prac). Należy w tym miejscu dodać, że realizacja projektu w części praktycznej została dość mocno zakłócona ograniczeniami wynikającymi z pandemii COVID-19, przez co pewne założenia początkowe zostały skorygowane i dostosowane do faktycznych możliwości realizacji.

Docelowo studenci opracowali system sterujący elektromagnesami w sposób manualny (bez sprzężenia zwrotnego z zadawaniem długości trwania docisku między elektrodami oraz pomiarem siły docisku z tensometru w czasie pomiaru. Takie podejście pozwoliło na dobranie wypełnienia i amplitudy zasilania elektromagnesów tak, aby uzyskać żądane wartości siły. Jednocześnie zaprojektowano sterowanie w taki sposób, że zakończenie

cyklu docisku wywoływało automatycznie zadziałania magnesów odciągających. Kompletne stanowisko testowe przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Oprzyrządowane stanowisko do badania siły docisku

Realizacja projektu pozwoliła studentom na zmierzenie się z zagadnieniami z różnych obszarów: mechaniki, metrologii, energoelektroniki, automatyki oraz programowania. Zagadnienia te obejmowały zarówno aspekty teoretyczne, jak i realizację gotowych prototypów.

Lewidron

Drugim projektem, który zrealizowano w ramach IDUB z zakresu energoelektroniki był projekt lewidrona czyli rodzaju pojazdu unoszącego się nad powierzchnią (podłożem miedzianym) na zasadzie siły lewitacji elektromagnetycznej. Lewidron działa na zasadzie rotacji z dużą prędkością magnesów trwałych nad blachą miedzianą, w której indukowane prądy wirowe powodują wytworzenie siły odpychającej magnesy od powierzchni blachy.

Określono, że dron będzie wyposażony w 4 dyski wirujące magnesami trwałymi, a ich prędkość obrotowa podczas pracy osiągnie około 3000 obr/min. Do budowy drona wykorzystane zostały komercyjne produkty dedykowane do dronów tj. sterowniki prędkości oraz silniki bezszczotkowe. Założono, że dron nie będzie posiadał zasilania bateryjnego, a będzie zasilany bezpośrednio z zasilacza laboratoryjnego o dużej mocy w celu zmniejszenia jego masy własnej, co jednocześnie powinno przełożyć się na mniejszą moc silników.

Korzystając z teorii podobieństwa określono, że siła lewitacji F_z powinna być poprawnie przybliżona za pomocą równania (1) przy założeniu, że grubość płyty jest dużo większa niż głębokość wnikania wyindukowanego prądu.

$$(1) \quad F_z = k\sigma pn \left(\frac{B}{d}\right)^2$$

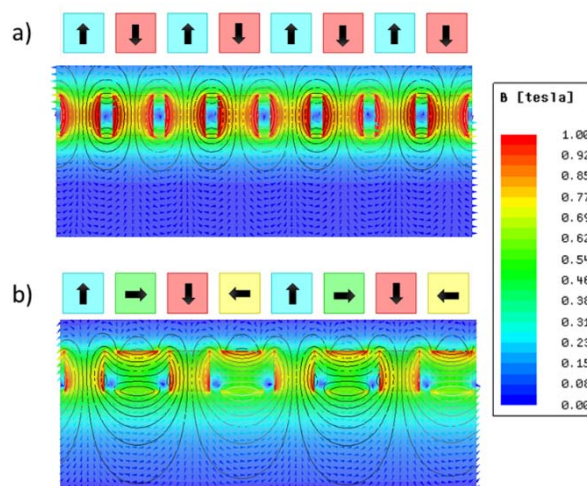
gdzie:

σ - konduktywność płyty [S/m], p - liczba par biegunów, n - prędkość obrotowa [obr/min], B - indukcja magnetyczna działająca na płytę [T], d - odległość między talerzami a płytą [m], k - stała, zależna od kształtu i rozmiaru magnesów oraz ich rozłożenia [m].

Opracowane zostały modele numeryczne w Ansys Maxwell, bazujące na metodzie elementów skończonych (MES) w celu określenia momentu obrotowego oraz siły lewitacji. Przeprowadzone zostały wielowariantowe symulacje określające wpływ wymiarów magnesów trwałych, ich konfiguracji, rozstawu oraz odległości na siłę lewitacji. W badaniach rozważano naprzemienne ustawienie magnesów (Rys. 5a) oraz magnesy ułożone w

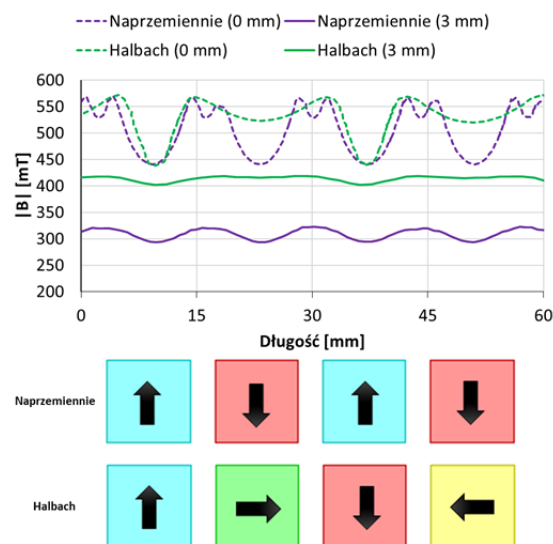
macierz Halbacha [6] (Rys. 5b) dla których przykładowy rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż obwodu dla rozstawu magnesów 5 mm został przedstawiony na Rys. 5.

Na potrzeby wstępnej analizy porównawczej konfiguracji magnesów założono, że magnesy będą sześcianami o wymiarach 10x10x10mm w klasie N42.



Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej wytworzonej przez magnesy trwałe a) ułożone naprzemiennie, b) ułożone w macierz Halbacha.

W celu określenia dla której z konfiguracji przedstawionych na Rys. 5. należy prowadzić dalsze analizy wyznaczony został rozkład indukcji wzdłuż linii magnesów po obwodzie dysku z magnesami dla dwóch przypuszczalnie skrajnych odległości: 0 mm tuż przy powierzchni magnesów oraz w odległości 3 mm będącą największą zakładaną odległością dla lewitacji (Rys. 6.).

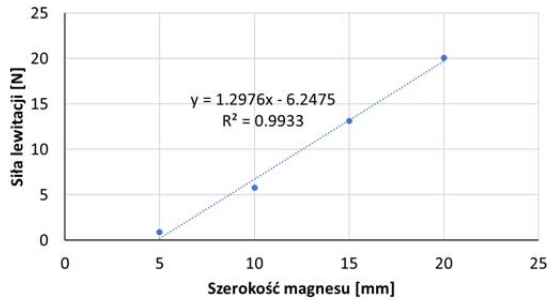


Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż środków magnesów po obwodzie dysku dla 4 kolejno ułożonych magnesów w konfiguracji naprzemiennej i w macierzy Halbacha.

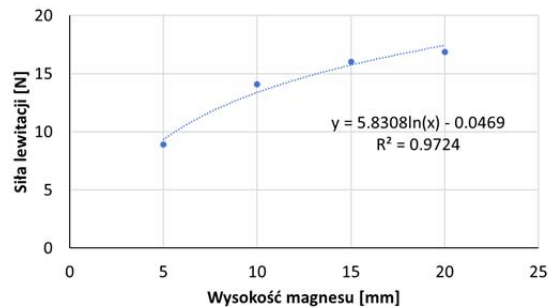
Powyższa analiza pokazała, że dla analizowanych przypadków średnie wartości modułu indukcji magnetycznej przypadające na parę biegunów są zbliżone dla odległości 0 mm i wynoszą 515 mT. Natomiast w większej odległości (3 mm) różnica jest znacząca i dla naprzemiennej konfiguracji ustawienia magnesów średnia wartość jest równa 310 mT, zaś dla macierzy Halbacha jest o 30% większa (412 mT).

Przyglądając się jednak równaniu (1) i biorąc pod uwagę jedynie liczbę par biegunów oraz indukcję magnetyczną można zauważyć, że przy tej samej całkowitej liczbie magnesów w macierzy Halbacha osiągana jest dwa razy mniejsza liczba par biegunów. Powoduje to, że magnesy ułożone w macierz powinny wytwarzać ponad 41% większą wartość indukcji magnetycznej, aby uzyskać większą siłę lewitacji.

Po wskazaniu korzystniejszej konfiguracji sprawdzono w jaki sposób na siłę lewitacji wpływa szerokość magnesów (Rys. 7) oraz ich wysokość (Rys. 8) poprzez analizę parametryczną za pomocą symulacji MES.



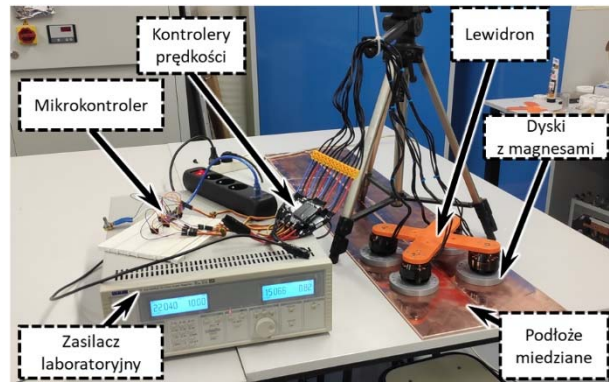
Rys. 7. Zależność pomiędzy szerokością magnesów a siłą lewitacji.



Rys. 8. Zależność pomiędzy wysokością magnesów a siłą lewitacji.

Przeprowadzona analiza pokazała, że zwiększenie szerokości magnesów wpływa pozytywnie na siłę lewitacji i powoduje jej liniowy wzrost (Rys. 7). Należy jednak przy tym pamiętać, że przy założeniu stałej powierzchni dysku, będzie to jednocześnie prowadzić do całkowitego zmniejszenia liczby magnesów umieszczonych w dysku a tym samym zmniejszenia liczby par biegunów. Zwiększanie wysokości magnesów powoduje wzrost siły lewitacji jednak jest to wzrost nieliniowy (Rys. 8). Wynika to z dużego mniejszego udziału fragmentów magnesu oddalonego od miedzianej płyty (pole magnetyczne maleje z kwadratem odległości), a co za tym idzie kontrybucja jest niewspółmiernie mała dla wysokich magnesów. Ponadto wyższy magnes będzie miał proporcjonalnie większą wagę, lecz nieproporcjonalnie mniejszy udział w wytworzonej sile lewitacji. Oszacowano, że najkorzystniejsze do zastosowania będą magnesy neodymowe o wymiarach 10x10x10 mm w możliwie najwyższej klasie np. N45, N48.

Na podstawie wyników uzyskanych z przeprowadzonej analizy, w tym rezultatów modelowania numerycznego oraz uwzględniając przyjęte na początku założenia opracowano końcowy prototyp układu lewitacyjnego, składającego się z 4 wirujących dysków z magnesami trwałymi ustawionego nad miedzianym podłożem oraz zasilanego z zasilacza zewnętrznego. Wygląd stanowiska przedstawiony został na Rys. 9. Na stanowisku widoczny jest również statyw umożliwiający bezkolizyjne doprowadzenie energii do układu napędowego.



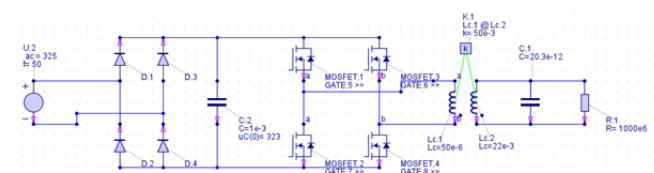
Rys. 9. Stanowisko z lewidronem.

Cewka Tesli

Ostatni z projektów omawianych w ramach niniejszego artykułu, jest poświęcony cewce Tesli. Ponieważ projekty PBL przewidziane są do realizacji w ciągu jednego semestru należy mieć na uwadze konieczność wprowadzenia uproszczeń wynikających z ograniczeń czasowych. Jednym z takich uproszczeń była konieczność wykorzystania istniejącego już falownika do zasilenia wspomnianego już cewki Tesli. Z tego powodu wykorzystano dostępny w Katedrze falownik pełnomostkowy wykonany z modułów IGBT, wyposażony w zabezpieczenia na poziomie drzajwerów, w tym zabezpieczenia przed zwarciami skrośnymi, nadprądowe czy termiczne. Dzięki temu studenci, niezbyt obcy z projektowaniem takich falowników mogli w pełni poświęcić się sterowaniu przekształtnika oraz zbadaniu układu do zasilenia cewki Tesli. Wadą tego rozwiązania była częstotliwość pracy falownika. Mógł on pracować z częstotliwością do 40 kHz.

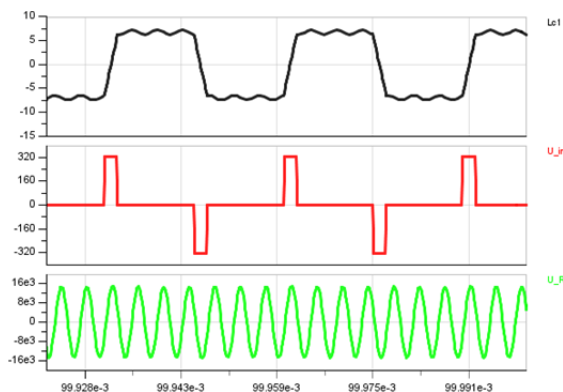
Studenci wykonali cewkę solenoidalną stanowiącą uzwojenie strony wtórnej o wysokości 800 mm i średnicy zewnętrznej 75 mm, a uzwojenie zostało nawinięte drutem o średnicy 1 mm, który został pokryty lakierem elektroizolacyjnym. Do wykonania torusa wykorzystano aluminiową rurę wentylacyjną o średnicy 100 mm i długości 3 m. Dla tak skonstruowanej cewki wraz z torusem określono, że częstotliwość drgań własnych wynosi około 240 kHz.

W celu dopasowania częstotliwości przełączeń falownika do częstotliwości drgań własnych cewki studenci opracowali model (Rys. 10) i przeprowadzili symulacje obwodowe w GeckoCIRCUITS [7].



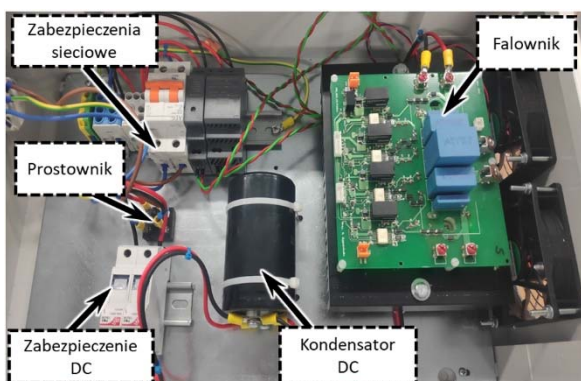
Rys. 10. Model obwodowy falownika mostkowego oraz cewki Tesli.

Dzięki przeprowadzonej analizie obwodowej studenci ustalili, że możliwe jest pobudzenie cewki przy pomocy 7-mej harmonicznej (34,3 kHz) napięcia generowanego przez falownik. Powoduje to jednak, że 1, 3 oraz 5 harmoniczna nie będą przenosić się na wyjście układu, a dodatkowo będą nadmiernie nagrzewać uzwojenia strony pierwotnej układu. Rozwiązaniem problemu było w takim wypadku zmniejszenie szerokości fali napięcia do 0,1414 co zapewnia jednocześnie relatywnie wysoką wartość amplitudy 7-harmonicznej napięcia, jak i powoduje obniżenie pozostałych. Przebiegi dla tego stanu pracy przedstawiono na Rys. 11.



Rys. 11. Przebiegi napięcia przy pracy z wypełnieniem 0,1414. Czarny – prąd strony pierwotnej, czerwony – napięcie wyjściowe falownika, zielony – napięcie strony wtórnej cewki Tesli.

Jako kryterium doboru prostownika postawiono możliwość zasilania z powszechnie dostępnego gniazda jednofazowego 230 V/16 A. Jako układ sterowania zastosowano mikrokontroler Texas Instruments LaunchPad LaunchXL-28069M. Algorytm sterowania został zrealizowany w środowisku Matlab/Simulink, który umożliwia wygenerowanie kodu na LaunchPad. Falownik wraz z pozostałymi układami, w tym zabezpieczającymi został zainstalowany w obudowie (Rys. 12).

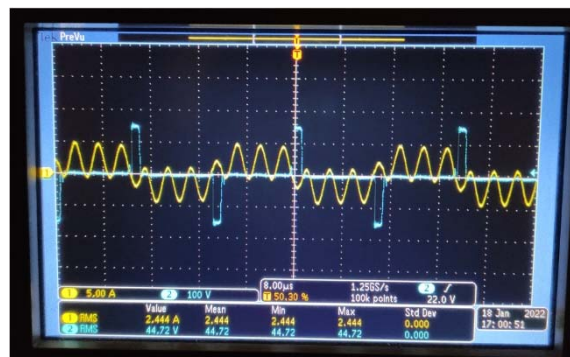


Rys. 12. Zmontowany układ do zasilania i sterowania cewką Tesli.



Rys. 13. Kompletnie stanowisko z cewką Tesli.

Układ z cewką Tesli stanowi gotowe stanowisko dedykowane do pokazów i badań laboratoryjnych (Rys. 13). Cechuje się modułowością oraz łatwością montażu i demontażu dzięki zastosowaniu magnesów neodymowych jako elementów łączeniowych do podstawy. Dla tak skonstruowanego układu przeprowadzono testy i zarejestrowano przebiegi prądu i napięcia dla zaproponowanego sposobu sterowania (Rys. 14).



Rys. 14. Zarejestrowany przebieg napięcia falownika (niebieski) i prądu falownika (żółty).

Podsumowanie

W artykule opisane zostały przykłady projektów zrealizowanych w formule PBL przez studentów Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej. Wsparcie tej formy kształcenia przez program IDUB pozwoliło na zwiększenie zainteresowania tą formą kształcenia, jednocześnie ułatwiając kadry akademickiej wsparcie jej realizacji.

Przedstawione przykłady projektów pokazują różnorodność tematyki, bardzo często mocno niszowej, która nie jest realizowana w ramach podstawowego programu studiów. Projekty PBL pozwalają zatem na zgłębianie obszarów własnych zainteresowań w sposób bardziej szczegółowy pod okiem wykładowcy. Dodatkową zaletą PBL jest możliwość włączenia studentów w proces badawczy (realizację projektów badawczych) na uczelni oraz wdrażanie ich w upowszechnianie wiedzy poprzez współautorstwo w artykułach naukowych.

Autorzy: dr hab. inż. Mariusz Stępień, prof. PŚ, dr inż. Paweł Lasek, inż. Rafał Mańka (student PŚ), Patryk Tyłutki (student PŚ), Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: mariusz.stepien@polsl.pl; pawel.lasek@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Zarządzenie Rektora Politechniki Śląskiej nr 55/2020 w sprawie Regulaminu finansowania kształcenia zorientowanego projektowo PBL, Monitor Prawny PŚ poz. 215 z 13.03.2020
- [2] Wyniki VII konkursu PBL. Aktualności IDUB PŚ (25.08.2023). https://www.polsl.pl/ps_aktualnosci/wyniki-vii-konkursu-pbl/
- [3] Mikno Z., Stępień M.: Wysokosprawną zgrzewka inwertorowa o podwyższonej częstotliwości - korzyści i zalety nowej technologii, *Biuletyn Inst. Spaw.*, R. 60, 2016, 102-108
- [4] Mikno Z., Stępień M., Grzesik B.: Optimization of resistance welding by using electric servo actuator, *Welding in the World*, 2017, vol. 61 nr. 3, 453-462
- [5] Miniature force sensor C9C: for comprehensive forces, Hottinger Bruel & Kjaer, <https://www.hbm.com/> (25.08.2023)
- [6] Johnson D., Pillay P., Malengret M.: High speed PM motor with hybrid magnetic bearing for kinetic energy storage, *IEEE Industry Trans. Conf.*, (2001), Cat. No.01CH37248
- [7] Gierlotka K., Jarek G., Jeleń M., Michalak J.: Modele symulacyjne w ePEDlab – wirtualnej platformie wspomagającej nauczanie napędu elektrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R92 nr. 4, 2016, 98-103