

Stanowiska do zajęć laboratoryjnych z energoelektroniki - przykład falownika rezonansowego

Streszczenie. Artykuł opisuje zestaw stanowisk dydaktycznych do zajęć laboratoryjnych z energoelektroniki, przygotowanych w ramach projektu RELABEMA prowadzonego na Politechnice Śląskiej. Stanowiska umożliwiają zarówno prowadzenie zajęć w sposób stacjonarny jak i zdalny poprzez odpowiednie narzędzia informatyczne. W artykule w sposób szczegółowy opisane jest jedno ze stanowisk: falownik rezonansowy. Można na nim wyznaczać charakterystyki sterowania metodami: FM, PWM, IPDM oraz badać widmo harmonicznych przebiegów prądu i napięcia.

Abstract. The paper concerns the set of laboratory setups for power electronics classes, that was developed during RELABEMA project in Silesian University of Technology. The laboratory setups allow to conduct classes stationary and remotely by using proper IT tools. One of the setups is described in detail: the resonant inverter. Control characteristics of the following methods can be measured FM, PWM, IPDM, in addition voltage and current spectrum can be analyzed. (**Laboratory setups for power electronics classes – resonant inverter example**).

Słowa kluczowe: energoelektronika, falownik rezonansowy, dydaktyka, Erasmus+
Keywords: power electronics, resonant inverter, education, Erasmus+

Wprowadzenie

Kształcenie studentów na kierunkach takich jak np. elektrotechnika, elektronika czy mechatronika wymaga zaplecza laboratoryjnego, które powinno być możliwie na czasie z technologiami stosowanymi na świecie. Ograniczenia związane z pandemią Covid-19 pokazały, że stanowiska laboratoryjne powinny mieć możliwość odbywania na nich ćwiczeń w sposób zdalny. W sytuacji pandemii zajęcia laboratoryjne wyglądały często w ten sposób, że prowadzący ćwiczenie przebywał w laboratorium i transmitował obraz z kamery poprzez odpowiednie do tego oprogramowanie np. Zoom. Następnie przysyłał studentom wyniki pomiarów, których sam dokonał, w celu wykonania przez nich sprawozdania.

Prezentowane w artykule stanowiska pozwalają znacznie lepiej angażować studentów w realizację ćwiczenia. Skomunikowani studenci mają pełną kontrolę sterowania stanowiskiem wraz z podglądem przebiegów i zmianą nastaw. Podobnego typu rozwiązania sprzętowe lub symulacyjne były już opisywane w literaturze dla ćwiczeń laboratoryjnych z energoelektroniki i innych [1], [2], [3], [4], [5], [6].

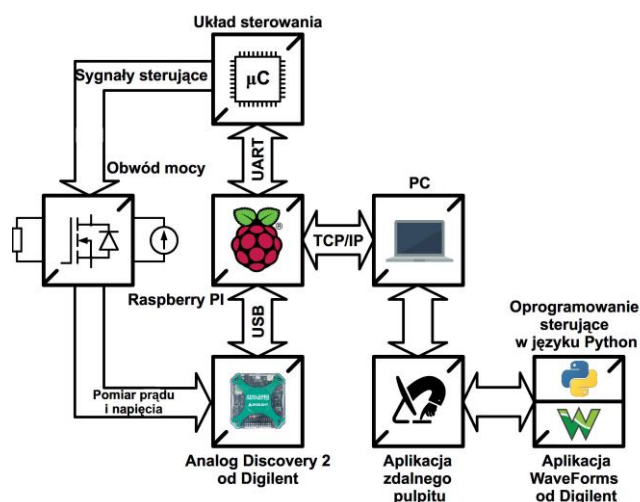
W ramach projektu RELABEMA (*Platforma cyfrowa wspierająca zdalną realizację ćwiczeń laboratoryjnych w elektrotechnice, mechatronice i automatyce / 2020-1-PL01-KA226-HE-096163*) powstało sześć nowoczesnych stanowisk dydaktycznych do prowadzenia zajęć z energoelektroniki:

- falownik rezonansowy,
- falownik jednofazowy napięcia,
- przekształtnik obniżający napięcie typu BUCK,
- przekształtnik podwyższający napięcie typu BOOST,
- jednofazowy regulator napięcia przemiennego,
- prostownik tyrystorowy.

Ogólny opis stanowisk

Ogólny schemat stanowiska znajduje się na rysunku 1. Składa się on z następujących elementów:

- Obwodu mocy, innego dla każdego stanowiska.
- Układu sterowania bazującego na mikrokontrolerze sygnałowym.
- Komputera jednocukrowego Raspberry PI model B (4GB RAM) [7].
- Oscyloskopu USB Analog Discovery 2 [8].
- Aplikacji sterującej i wyświetlającej przebiegi.
- Aplikacji zdalnego pulpitu
- Komputerów podłączonych studentów.



Rys. 1. Ogólny schemat stanowiska

Układ sterowania wysyła sygnały sterujące do obwodu mocy poprzez kable światłowodowe. Oscyloskop Analog Discovery 2 mierzy dwa wybrane przebiegi i wyświetla je w aplikacji dostarczonej przez producenta. Układ sterowania i oscyloskop podłączone są do komputera Raspberry PI poprzez interfejs UART i USB. Raspberry PI jest kolejno podpięty do lokalnego routera poprzez kabel Ethernet lub dostępny moduł WiFi.

Aplikacja obsługująca oscyloskop nazywa się Waveforms i jest możliwa do pobrania ze strony producenta. Aplikacja sterująca, która wysyła dane do/z układu sterowania, została napisana w języku Python. Każde stanowisko ma nieco inną wersję aplikacji, różniącą się interfejsem użytkownika i przesyłanymi danymi. Obie aplikacje są zainstalowane na Raspberry PI.

W formie zdalnej prowadzenia zajęć, sposób postępowania jest następujący. Studenci podłączają się do stanowiska poprzez aplikację zdalnego pulpitu, może być to np. Zoom. Jednemu ze studentów oddaje się kontrolę nad ekranem Raspberry PI, a reszta studentów obserwuje. Prowadzący ćwiczenie jest zalogowany do tej samej sesji Zoom i może instruować grupę studentów. Kontrola nad stanowiskiem może być w trakcie ćwiczenia przekazana innej osobie.

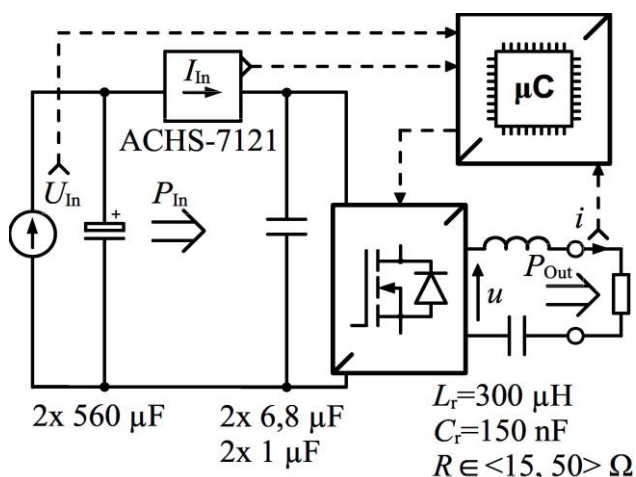
W formie stacjonarnej przewidziane są trzy sposoby kontroli stanowiska. W pierwszym przypadku przyłącza się

zewnętrzny ekran dotykowy do Raspberry PI poprzez złącze mikroHDMI. W drugim przypadku wykorzystuje się zewnętrzny komputer PC wyposażony w konwerter USB/UART z zainstalowanymi aplikacjami Waveforms i sterującą. W trzecim przypadku przekształtnikiem można sterować za pomocą czterech przycisków na płycie drukowanej układu sterowania. Brak jest wtedy informacji o nastawach i wymagany jest zewnętrzny oscyloskop.

Stanowisko falownika rezonansowego

Stanowisko do badania falownika rezonansowego pozwala na pokazanie wielu znanych metod sterowania. Można wyznaczać i rejestrować różne charakterystyki, przebiegi i widma. Dostępne metody sterowania to: metoda częstotliwościowa (FM), metoda modulacji szerokości impulsów (PWM), różne metody modulacji gęstości impulsów z impulsem zintegrowanym (IPDM). W metodach IPDM przewidziano również opcję rozpraszania widma, poprzez losowe ustawienie impulsu zintegrowanego w cyklu (r-IPDM).

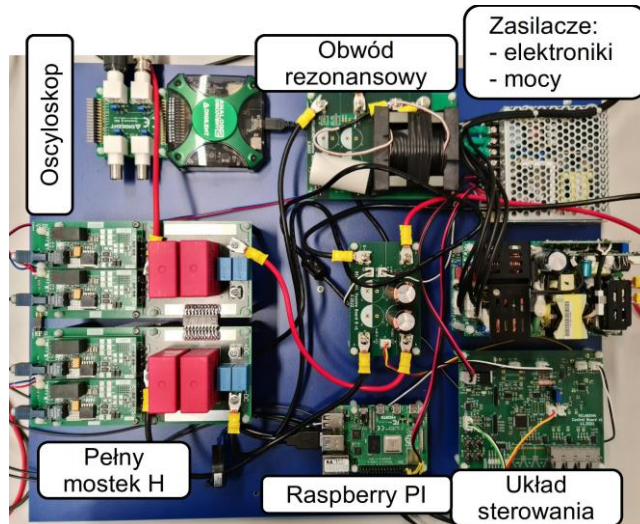
Schemat obwodu mocy falownika rezonansowego przedstawiono na rysunku 2. Napięcie zasilające U_{in} jest równe 96 V i pochodzi z dedykowanego zasilacza mocy 600 W. Na szynie DC umiejscowiony jest czujnik prądu ACHS-7121, który mierzy prąd zasilania I_{in} z dokładnością deklarowaną przez producenta 1,5% [9]. W układzie pełnego mostka są tranzystory MOSFET o oznaczeniu IRFP90N20D [10]. Na wyjściu falownika, na płycie montażowej znajduje się nieprzestrzajany obwód rezonansowy $L_r C_r$. Rezystor obciążenia R , w postaci opornicy suwakowej podłącza się do zacisków wyjściowych.



Rys.2. Schemat obwodu mocy falownika rezonansowego

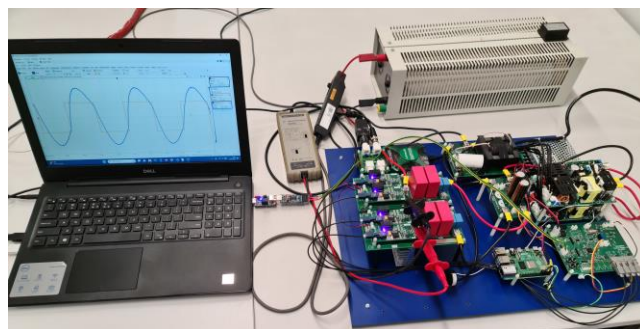
Układ sterowania bazuje na mikrokontrolerze sygnałowym dsPIC33CK256MP206 firmy Microchip [11], który wysyła cztery sygnały sterujące do sterowników bramkowych tranzystorów za pomocą kabli światłowodowych. Mierzy dodatkowo trzy sygnały: napięcie zasilania U_{in} , prąd zasilania I_{in} oraz monitoruje prąd falownika za pomocą przekładnika prądowego. Kiedy wartość chwilowa prądu wyjściowego falownika i przekroczy 9 A, falownik się wyłącza i jest zgłaszana awaria. Zabezpiecza to przed podłączeniem rezystancji obciążenia R o zbyt niskiej wartości. Przekładnik prądowy służy tylko do wykrywania przetężenia, a nie do pomiaru prądu.

Zdjęcie stanowiska przedstawiono na rysunku 3. Wszystkie podzespoły osadzone są na bakelitowej płycie o wymiarach 500mm x 400mm.



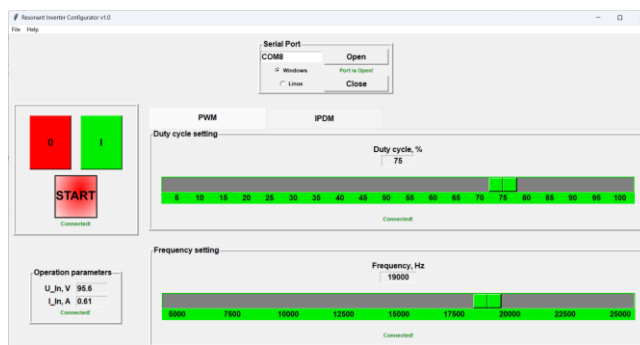
Rys.3. Zdjęcie stanowiska do badania falownika rezonansowego

Układ laboratoryjny z przyłączonym obciążeniem, sondami pomiarowymi (napięciowa: Agilent N2791A, prądowa: Keysight N2782B) i laptopem z konwerterem USB/UART pokazano na rysunku 4.



Rys.4. Zdjęcie kompletnego stanowiska z podłączonym laptopem i otwartym oprogramowaniem oscyloskopu

Wybór metody sterowania falownikiem oraz zadawanie nastaw odbywa się w aplikacji sterującej. Podstawowe elementy to wyświetlanie napięcia i prądu zasilania oraz funkcja start/stop. Widok ekranu dla metod FM/PWM pokazano na rysunku 5. Zakres częstotliwości zadanej to $f_e < 5, 25 >$ kHz oraz wypełnienia $D_e < 5, 100 >$ %.



Rys.5. Ekran aplikacji do sterowania falownikiem, metoda FM i PWM

Widok ekranu dla metody IPDM pokazano na rysunku 6. Do wyboru są cztery metody oraz dostępna dla każdej opcja rozpraszania widma (r-IPDM). Są to kolejno $6+kp$, $10+kp$, $3+kn$ i $5+kn$. Pierwsza liczba to długość impulsu zintegrowanego liczona w liczbie półokresów częstotliwości

zadanej. Symbole k_p i k_n oznaczają liczbę parzystą lub nieparzystą dodatkowych półkresów w pojedynczym cyklu.



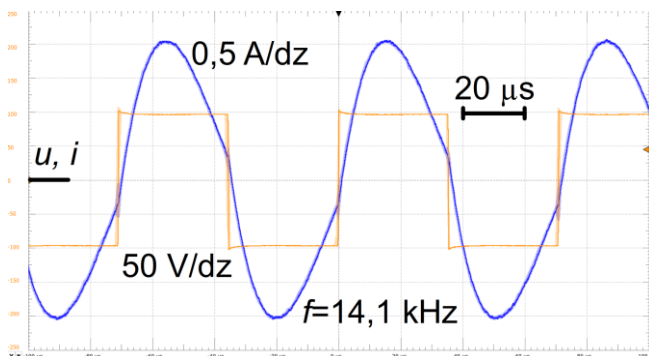
Rys.6. Ekran aplikacji do sterowania falownikiem, metoda IPDM z opcją rozpraszania widma (r-IPDM)

Oscyloskop USB Analog Discovery 2 pozwala nie tylko na rejestrację przebiegów. Funkcjonalność, która jest szczególnie przydatna w odniesieniu do omawianego stanowiska to pomiar wartości skutecznej prądu falownika oraz wyświetlanie widma tego sygnału.

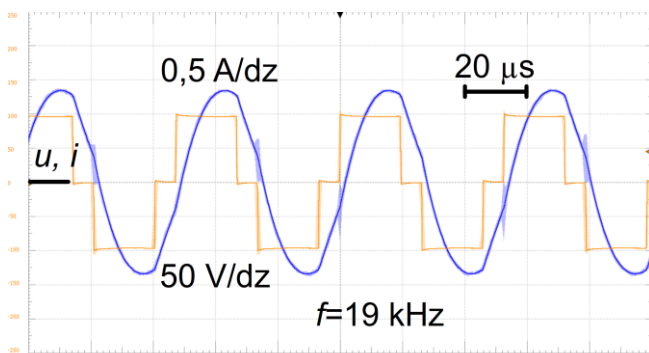
Wyniki pomiarów: przebiegi i widmo

W rozdziale tym zamieszczono wybrane przebiegi napięcia u i prądu i falownika dla wszystkich metod sterowania. Dodatkowo pokazano widmo prądu falownika dla metod IPDM z opcją rozpraszania widma oraz bez rozpraszania.

Na rysunku 7 pokazano pracę falownika w rezonansie. Na rys.8 współczynnik wypełnienia D wynosi 75% i falownik pracuje powyżej rezonansu.



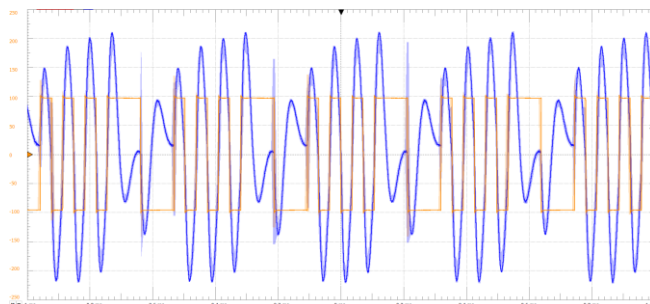
Rys.7. Przebiegi napięcia i prądu falownika w rezonansie: $f=14,1$ kHz, $D=100\%$



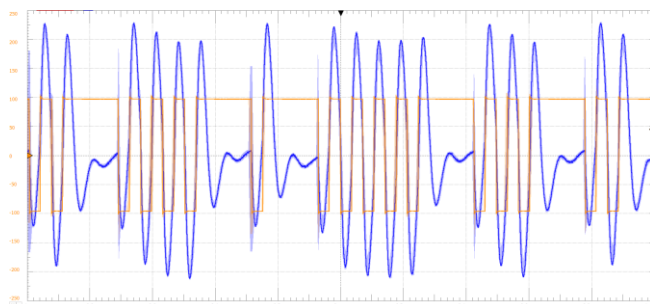
Rys.8. Przebiegi napięcia i prądu falownika dla sterowania PWM: $f=19$ kHz, $D=75\%$

Przebiegi dla metody IPDM $6+k_p$ gdy $k_p=6$ zamieszczono na rys.9. Na rys.10 pokazano działanie rozpraszania widma dla metody $5+k_n=5$, gdy impuls zintegrowany losowo zmienia swoje położenie w cyklu.

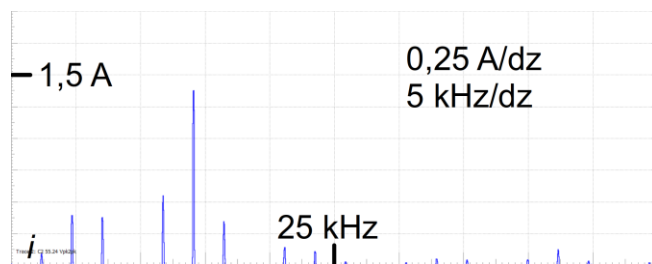
Widmo prądu falownika dla tych dwóch przypadków zamieszczono na rysunkach 11 i 12.



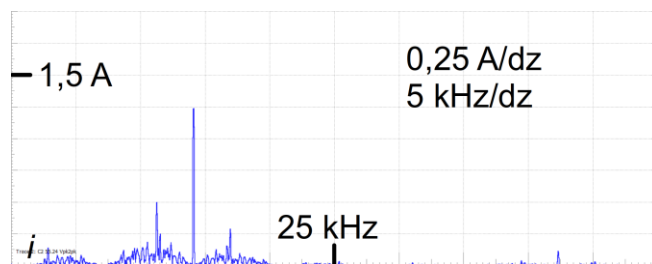
Rys.9. Przebiegi napięcia i prądu falownika dla sterowania IPDM: $6+k_p=6$, $f=14,1$ kHz



Rys.10. Przebiegi napięcia i prądu falownika dla sterowania r-IPDM: $5+k_n=5$, $f=14,1$ kHz



Rys.11. Widmo prądu falownika dla sterowania r-IPDM: $6+k_p=6$, $f=14,1$ kHz



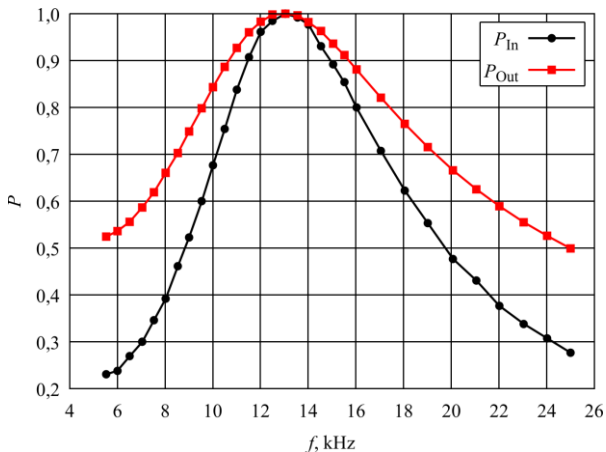
Rys.12. Widmo prądu falownika dla sterowania r-IPDM: $5+k_n=5$, $f=14,1$ kHz

Podczas pracy falownika sterowanego metodami IPDM studenci biorący udział w ćwiczeniu mogą dodatkowo usłyszeć efekt działania rozpraszania widma. Hałas wydobywający się z przekształtnika (głównie dławik L_r) jest mniej uciążliwy dla metody r-IPDM.

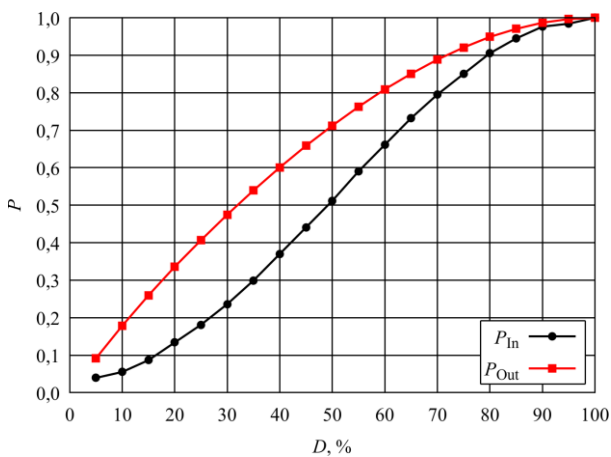
Wyniki pomiarów: charakterystyki

Charakterystyki sterowania zamieszczone w niniejszym rozdziale zostały wykreślone we względnych wartościach, odniesione do maksymalnej zmierzonej mocy wejściowej P_{in} lub wyjściowej P_{out} . Moc wejściowa jest wyświetlana w aplikacji sterującej, moc wyjściową można wyznaczyć z wartości skutecznej prądu wyświetlanej w oscyloskopie.

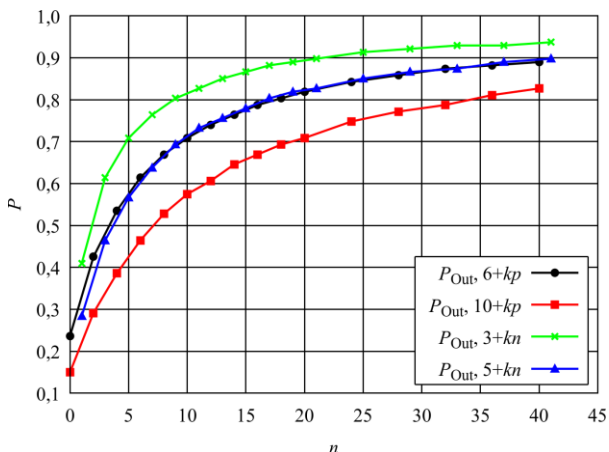
Na rysunku 13 jest charakterystyka sterownia metodą częstotliwościową przy maksymalnym wypełnieniu $D=100\%$. Na rys.14 znajduje się charakterystyka sterownia metodą PWM. Na rys.15 zamieszczono charakterystyki dla wszystkich metod IPDM.



Rys.13. Charakterystyki częstotliwościowe (FM) dla $D=100\%$



Rys.14. Charakterystyki w funkcji zmiany wypełnienia (PWM) dla $f=14,1$ kHz



Rys.15. Charakterystyki w funkcji zmiany liczby impulsów n (IPDM) dla $f=14,1$ kHz

Charakterystyki względnych mocy wejściowych P_{In} i wyjściowych P_{Out} różnią się, ponieważ przekształtnik ma sprawność niższą od jedności. Nie mierzono sprawności przekształtnika, ale jest szacowana dla mocy maksymalnej (rezonans rys.7) na około 93%.

Metody IPDM $6+kp$ oraz $5+kn$ mają bardzo podobne charakterystyki sterownia. Można wysnuć wniosek, że

najlepszą z prezentowanych metod jest $10+kp$, ponieważ ma najszerszy zakres sterownia mocą i jest mniej strona niż w przypadku metody $3+kn$.

Podsumowanie

W artykule opisano zestaw stanowisk dydaktycznych do zajęć laboratoryjnych z energoelektroniki, zbudowanych w Katedrze Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki Politechniki Śląskiej. Stanowiska umożliwiają prowadzenie zajęć zarówno w sposób stacjonarny jak i zdalny.

Przedstawiono w kompleksowy sposób wyniki pomiarów jednego ze zbudowanych stanowisk: falownika rezonansowego. Studenci odbywający ćwiczenie mogą zapoznać się z najczęściej stosowanymi metodami sterownia falownika rezonansowego. Stanowisko umożliwia również zapoznanie się z bardziej zaawansowanymi technikami sterownia jak rozpraszanie widma i jego obserwację.

Autorzy:

dr inż. Krzysztof Przybyła, E-mail: krzysztof.przybyla@polsl.pl dr inż. Krystian Frania, E-mail: krystian.frania@polsl.pl; dr hab. inż. Marcin Kasprzak, prof. PŚ, E-mail: marcin.kasprzak@polsl.pl; dr hab. inż. Mariusz Stępień, prof. PŚ, E-mail: mariusz.stepien@polsl.pl; Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

LITERATURA

- [1] Jarek G., Jeleń M., Michalak J.: Electrical drives teaching using ePEDlab platform - power quality aspects, Proc. IEEE-PEMC2020 Conference, Gliwice, Poland, 25-28 Sept. 2021 s.649-655
- [2] N. Krishnamoorthy, A. Raveendran, P. Vadiveswaran, S. R. Arulraj, K. Manathunga and S. Siriwardana, "E-Learning Platform for Hearing Impaired Students," 2021 3rd International Conference on Advancements in Computing (ICAC), 2021, pp. 122-127, doi: 10.1109/ICAC54203.2021.9671113.
- [3] I. Irwandi, Ishafit, Nizamuddin, K. Umam and Fashbir, "Node.js for Development RSTEM to Support Remote Physics Practicum During COVID-19," 2021 2nd SEA-STEM International Conference (SEA-STEM), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/SEA-STEM53614.2021.9668002.
- [4] I. A. Diaz-Diaz and I. Cervantes, "Development and implementation of an E-learning system for electric circuits laboratory," 2013 7th IEEE International Conference on e-Learning in Industrial Electronics (ICELIE), Vienna, Austria, 2013, pp. 28-32, doi: 10.1109/ICELIE.2013.6701266.
- [4] C. Goldemberg, E. L. Pellini, W. Kaiser and W. Komatsu, "A Python based power electronics E-learning tool," 2009 Brazilian Power Electronics Conference, Bonito-Mato Grosso do Sul, Brazil, 2009, pp. 1088-1092, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347748.
- [5] M. M. Albu, K. E. Holbert, G. T. Heydt, S. D. Grigorescu and V. Trusca, "Embedding remote experimentation in power engineering education," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 1, pp. 139-143, Feb. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2003.821020.
- [6] U. Drogenik and J. W. Kolar, "Interactive Power Electronics Seminar (iPES)-a web-based introductory power electronics course employing Java-applets," 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289), Cairns, QLD, Australia, 2002, pp. 443-448 vol.2, doi: 10.1109/PSEC.2002.1022493.
- [7] <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- [8] <https://digilent.com/shop/analog-discovery-2-100ms-s-usb-oscilloscope-logic-analyzer-and-variable-power-supply/>
- [9] <https://www.broadcom.com/products/optocouplers/industrial-plastic/other/hall-effect-sensors/achs-7121-000e>
- [10] <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/irfp90n20d/>
- [11] <https://www.microchip.com/en-us/product/dspic33ck256mp206>