

doi:10.15199/48.2024.05.02

Stanowiska dydaktyczne w laboratorium energoelektroniki ISEP/ZEP PW – opracowanie i implementacja w procesie dydaktycznym

Streszczenie. Artykuł przedstawia wybrane zagadnienia dotyczące opracowania od podstaw i implementacji nowych stanowisk dydaktycznych w laboratorium energoelektroniki w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. Opisano istotne z punktu widzenia prowadzonej dydaktyki topologie przekształtników energoelektronicznych z rodziny układów prostownikowych, bezpośrednich przekształtników DC/DC, falowników oraz testerów podzespołów energoelektronicznych. Artykuł ilustrują kluczowe wyniki prac laboratoryjnych prezentujące zarówno pracę w warunkach znamionowych jak i podczas wybranych stanów awaryjnych.

Abstract. The paper presents selected issues concerning the development from scratch and the implementation of new teaching positions in the power electronics laboratory at the Institute of Control and Industrial Electronics of the Warsaw University of Technology. The topologies of power electronic converters from the family of rectifiers, direct DC/DC converters, inverters and testers of power electronic components, which are important from the point of view of the conducted didactics, have been described. The article illustrates the key results of laboratory work presenting both operation in nominal conditions and during selected emergency states. (*Didactic workstations in the ISEP/ZEP WUT power electronics laboratory - development and implementation in the didactic process*).

Słowa kluczowe: energoelektronika, proces dydaktyczny, stanowiska laboratoryjne, przekształtniki dc-dc, falowniki.

Keywords: power electronics, didactic process, laboratory stands, dc-dc converters, inverters.

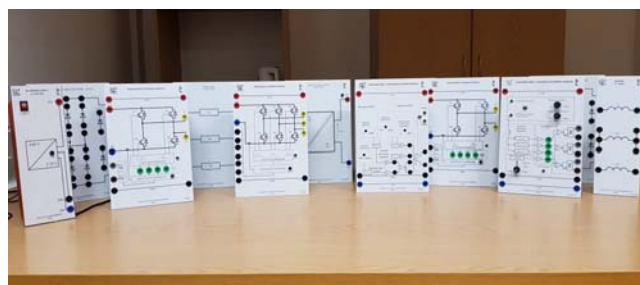
Wstęp

Proces dydaktyczny obejmujący swoim zakresem treści dotyczące przekształcania energii elektrycznej realizowany jest przez pracowników Zakładu Elektroniki Przemysłowej (Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej) Politechniki Warszawskiej od lat siedemdziesiątych XX w. Powstały wówczas pierwsze w Polsce stanowiska laboratoryjne wspierające rozwijający się mechanizm przekazywania wiedzy, umożliwiając tym samym zapoznanie się z rzeczywistymi układami energoelektronicznymi z zakresu podstawowych przekształtników energii prądu przemiennego w energię prądu stałego AC/DC (sterowane oraz niesterowane sieciowe (50Hz) prostowniki jedno- i trójfazowe na bazie diod i tyrystorów krzemowych). W 2000 roku laboratorium zostało rozbudowane o modułowe stanowiska dydaktyczne DC/DC (bezpośrednie oraz transformatorowe układy podwyższonej częstotliwości <5kHz). Wieloletnia eksploatacja tych stanowisk dydaktycznych, która odegrała kluczową rolę w kształceniu kadry inżynierskiej z dziedziny energoelektroniki, przyczyniła się w dużej mierze do popularyzacji tej dziedziny i do obecnego rozwoju tej specjalności w naszym kraju.

Współczesna energoelektronika jest obecnie wszechstronnie stosowaną w praktyce dziedziną nauki i techniki. Wśród licznych przykładów zastosowań układów energoelektronicznych można chociażby wymienić urządzenia stosowane na co dzień przez większość społeczeństwa (np. ładowarki urządzeń mobilnych, sprzęt AGD, RTV, itp.) oraz coraz popularniejszego i nieodzownego współcześnie, intensywnie rozwijającego się obszaru przetwarzania i przekształcania energii elektrycznej pozyskiwanej z Odnawialnych Źródeł Energii – OZE (instalacje fotowoltaiczne, farmy wiatrowe, elektrownie wodne) czy też magazynowania i konwersji energii na pokładach różnego rodzaju pojazdów elektrycznych w tym także trakcyjnych. Rozwój powyższych zastosowań energoelektroniki jest również ściśle powiązany z obserwowanym od kilkunastu lat intensywnym rozwojem wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych (np. SiC – węgiel krzemu (ang. Silicon Carbide), GaN – azotek galu

(ang. Gallium Nitride)), charakteryzujących się coraz lepszymi parametrami dynamicznymi (krótkie czasy łączeń, małe wartości traconej energii) oraz statycznymi (małe rezystancje i spadki napięć w stanie przewodzenia). Kolejnymi, nieodzownymi elementami występującymi w obwodach głównych tych urządzeń są podzespoły magnetyczne (dławiki, transformatory).

Wymienione tytułem wstępu czynniki dotyczące ciągłego i dynamicznego rozwoju energoelektroniki w obszarze konwersji, pozyskiwania, przesyłu i magazynowania energii oraz zasygnalizowanie rozwoju i trendu przemysłowego, potrzeby stosowania nowych odmian struktur półprzewodnikowych czy też wyznaczania i analizy parametrów współczesnych urządzeń skłania do sformułowania wniosku o potrzebie gruntownej modyfikacji procesu kształcenia nowej kadry inżynierskiej. Od 2019 w laboratorium energoelektroniki ZEP/ISEP PW prowadzone są prace modernizacyjne mające na celu rozszerzenie funkcjonującego dotychczas laboratorium, aby dostosować je do współczesnych standardów przekazywania wiedzy, z uwzględnieniem najnowszych osiągnięć naukowych w tej dziedzinie. W zakresie wspomnianej modernizacji przewidziano realizację od podstaw struktur przekształtnikowych dot. m.in. układów prostownikowych, falownikowych, bezpośrednich przekształtników napięcia stałego oraz testerów podzespołów energoelektronicznych.



Rys.1. Fotografia zbiorcza zrealizowanych pulpitów stanowisk dydaktycznych

Stanowiska dydaktyczne – wymagania i oczekiwania

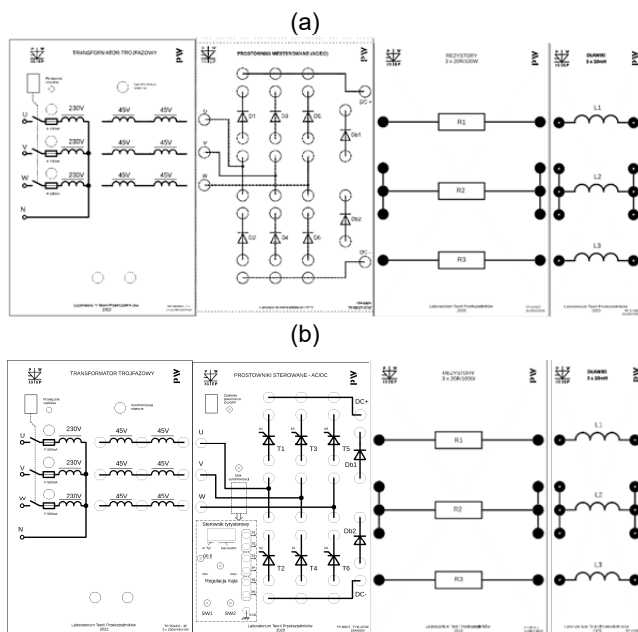
Aparatura laboratoryjna, służąca procesowi dydaktycznemu powinna być w szczególności weryfikowana na poziomie jej opracowywania pod względem potencjalnych możliwości jej przypadkowego uszkodzenia. Ma to bezpośredni związek z mechanizmem kształcenia nabywających doświadczenia zawodowego przyszłych inżynierów. Dlatego podczas opracowywania stanowisk, oprócz zapewnienia funkcjonalności przekształcania energii elektrycznej zgodnie z przeznaczeniem, największy nacisk położono na spełnienie założeń dot.:

- zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikowi podczas pracy z urządzeniem;
- aspektów bezawaryjności projektowanych stanowisk;
- odporności na użytkowanie niezgodnie z założeniem;
- możliwości zastosowania typowej aparatury pomiarowej;
- zapewnienia zasilania z bezpiecznych źródeł.

Prostowniki 1- i 3-fazowe

Podstawowymi układami energoelektronicznymi są przekształtniki o komutacji sieciowej (PS). Prostowniki niesterowane (diodowe) i sterowane (tyrystorowe) są w dalszym ciągu stosowane zarówno w elektronice użytkowej jak też w zastosowaniach przemysłowych, tj. energetyce i systemach trakcyjnych [1],[2],[3]. Układy te muszą zajmować ważne miejsce także w najnowszym programie dydaktycznym. Zaprojektowano i wykonano uniwersalny moduł dydaktyczny, który umożliwia badania najbardziej popularnych topologii PS, w tym jednofazowe prostowniki niesterowane jedno- i dwupulsowe oraz niesterowane prostowniki wielofazowe trój- i sześciopulsowe. Analogiczne założenia przyjęto w odniesieniu do prostowników tyrystorowych, przy czym oprócz obwodów silnoprądowych, w tym samym module dydaktycznym umieszczono również sterownik mikroprocesorowy do generowania impulsów załączających elementy półprzewodnikowe. Do realizacji powyższych ćwiczeń niezbędne było przygotowanie modułów pomocniczych, takich jak:

- trójfazowy transformator sieciowy z dzielonymi uzwojeniami po stronie wtórnej,
- dławiki, kondensatory,
- rezystory mocy.



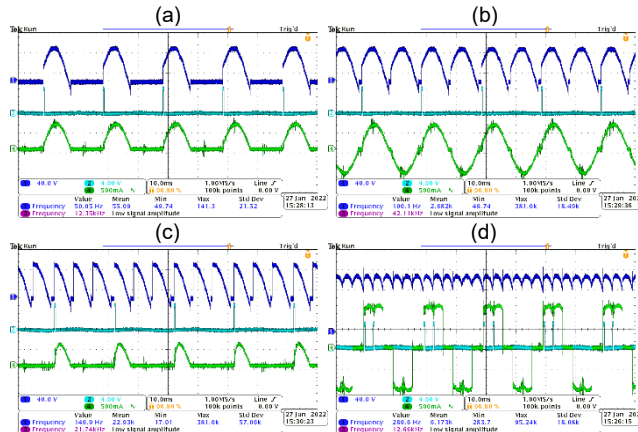
Rys.2. Prezentacja modułowego stanowiska do badania PS: a) prostowniki diodowe, b) prostowniki tyrystorowe

Szkic modułów do badania PS niesterowanych i sterowanych zaprezentowano na rysunku 2, natomiast w tabeli 1 zestawiono główne parametry.

Tabela 1. Parametry stanowiska do badania PS

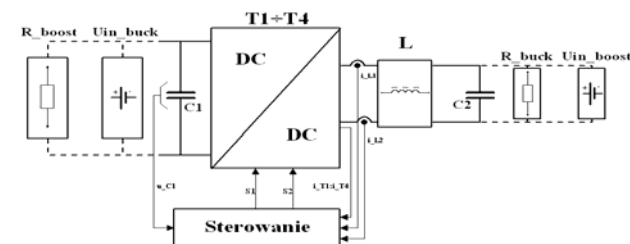
Parametr	wartość
napięcie wejściowe – U_{AC}	3x45 V/3x90 V /50 Hz
napięcie wyjściowe – U_{OUT}	0 ± 60 V / 120 V
moc wyjściowa – P_{OUT}	0 ± 500 W
Zakres reg. kąta załącz. tyrystora	0 – 180 st. el.

Na rysunku 3 umieszczono przykładowe oscylogramy zarejestrowane na stanowiskach dydaktycznych do badania prostowników tyrystorowych.



Rys.3. Przykładowe rejestracje przebiegów czasowych podczas badania tyrystorowego prost. jednopuls. (a), dwupulsowego (b), trójpulsowego (c) i sześciopulsowego (d)

Sterownik mikroprocesorowy modułu tyrystorowego umożliwia generowanie impulsów sterujących bramkami tyrystorów, przy czym domyślnie zaprogramowano wybór sterowania każdej z pięciu podstawowych topologii prostowników sterowanych oraz synchroniczną regulację kąta załączenia tyrystorów T1 – T6, co jest dodatkowo prezentowane na wyświetlaczu 7-segmentowym.



Rys.4. Schemat blokowy stanowiska dydaktycznego z zakresu badania bezpośrednich przekształtników napięcia stałego

Bezpośrednie przekształtniki napięcia stałego DC/DC

Szeroko stosowaną w przemyśle grupą urządzeń energoelektronicznych są bez wątpienia bezpośrednie przekształtniki DC/DC o charakterystykach najczęściej obniżających lub/i podwyższających napięcie [4], często występujące również w formie wielogłęziowych struktur przekształtnikowych [5], [6]. Oczekiwany rezultatem opracowywanego stanowiska dydaktycznego w tym zakresie było zaprojektowanie urządzenia, które dałoby możliwość realizacji wielu struktur przekształtnikowych. Dlatego zaproponowano moduł laboratoryjny umożliwiający realizację 4 topologii przy pomocy jednego stanowiska:

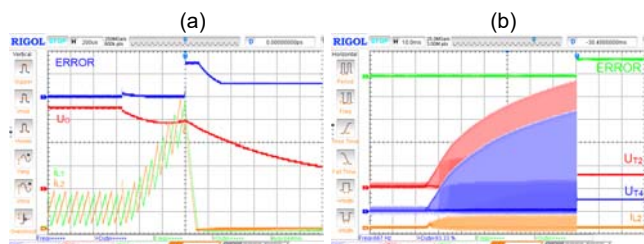
- jednogłęziowego lub dwugłęziowego przekształtnika obniżającego napięcie;
- jednogłęziowego lub dwugłęziowego przekształtnika podwyższającego napięcie,

dając przy tym możliwość stosowania przesunięcia fazowego lub nie w sygnałach sterujących tranzystorami obwodów dwugałęziowych. Uogólniona struktura stanowiska została przedstawiona na rysunku 4, natomiast w tabeli 2 zestawiono podstawowe parametry dotyczące warunków pracy urządzenia.

Tabela 2. Parametry stanowiska dot. bezpośrednich przekształtników napięcia stałego DC/DC

Parametr	Tryb pracy	
	podw. wartość	obniżający wartość
napięcie wejściowe - U_{IN}	15 V	48 V
napięcie wyjściowe - U_{OUT}	15 ÷ 80 V	0 ÷ 45.6 V
moc wyjściowa - P_{OUT}	0 ÷ 500 W	0 ÷ 500 W
częstotliwość przełączeń - f_{SW}	10 ÷ 50 kHz	10 ÷ 50 kHz
współczynnik wypełnienia impulsu - D	0 ÷ 0.7	0 ÷ 0.95

Mając na względzie wspomniane oczekiwania dot. bezawaryjności opracowywanych stanowisk przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych, podczas których symulowano możliwe stany awaryjne spowodowane czynnikami użytkownika. Dla przykładu, na rysunku 5a pokazano reakcję opracowanego sprzętowego systemu zabezpieczenia nadprądowego w przypadku wystąpienia stanu awaryjnego związanego ze zwarcie obwodu odbiornika podczas pracy dwugałęziowego przekształtnika obniżającego napięcie. Zarejestrowane prądy dławików (i_{L1} , i_{L2}) w wyniku wystąpienia zwarcia zwiększają swoje wartości do chwili osiągnięcia ustalonego progu zabezpieczenia (około 6 A), po czym generowany jest sygnał błędny (ERROR), stanowiący o wyłączeniu sygnałów sterujących tranzystorami, czego skutkiem jest spadek napięcia na odbiorniku (U_o).



Rys.5. Efekt działania zabezpieczenia nadprądowego (a) oraz nadnapięciowego (b)

Przeprowadzona analiza stanów awaryjnych wskazała, że kolejnym, istotnym z punktu widzenia zabezpieczeń stanowiska jest praca w trybie podwyższającym napięcie i braku ciągłości prądu w dławiku/ach wejściowych. Dochodzi wówczas do niekontrolowanego wzrostu napięcia na wyjściu, co może spowodować uszkodzenie elementów półprzewodnikowych. Celem przeprowadzenia testów podczas takiej sytuacji rejestrowano przebieg wartości chwilowej napięć na tranzystorach (U_{T2} , U_{T4}), prąd jednego z dławików (i_{L2}) oraz sygnał błędny (ERROR). Efekt działania opracowanego sprzętowego systemu zabezpieczeń nadnapięciowych przedstawiono na rysunku 5b, z którego wynika, że po przekroczeniu ustalonego progu napięcia (około 100 V) następuje wyłączenie sygnałów sterujących, a tym samym zabezpieczenie obwodu głównego przekształtnika.

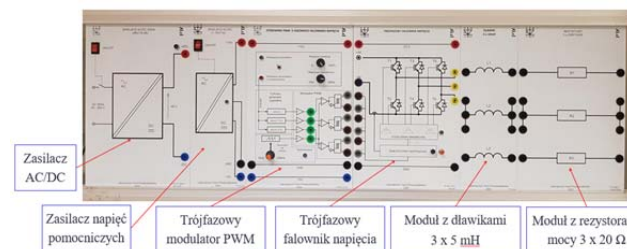
Falowniki napięcia 1- i 3-fazowe

Niewątpliwie jednym z motorów rozwoju energoelektroniki w przemyśle są falowniki napięcia, wykorzystywane zarówno w układach napędowych, systemach zasilania gwarantowanego (UPS) oraz energetyce odnawialnej (OZE). Wśród istniejących komercyjnie systemów dydaktycznych układy te mogą być

realizowane jako układy rozproszone (budowane z pojedynczych elementów półprzewodnikowych) [7] lub gotowe moduły falowników [8], [9]. Doświadczenie Autorów jednak wskazuje, że są to układy o ograniczonych możliwościach dydaktycznych, ze względu na oferowane do nich układy modulacji (PWM). W związku z powyższym zdecydowano zaprojektować autorskie moduły modulatorów oraz obwodów silnoprądowych dla falownika jedno- i trójfazowego. Przewidziano możliwość badania tych układów w topologii półmostkowej (jednogałęziowej) i mostkowej (1- i 3-fazowej), w tym badania różnych technik modulacji napięcia. Spośród głównych funkcjonalności tych stanowisk, można wyróżnić:

- badanie różnych technik modulacji szerokości impulsów (sieciowa, fazowa, z sygnałem nośnym, z dodatkową harmoniczną),
- szeroki zakres modulacji sygnału (w tym nadmodulację)
- zabezpieczenia nadprądowe, nadnapięciowe, termiczne,
- możliwość obserwacji sygnałów sterujących.

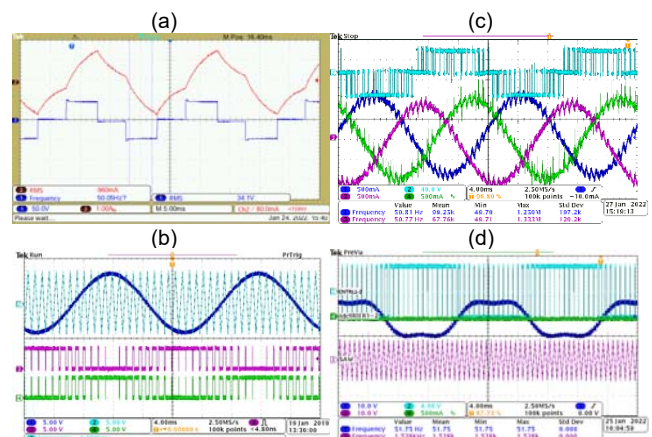
Oprócz podstawowych modułów falowników, niezbędne do badania tych układów są także moduły pomocnicze, takie jak zasilacz napięcia stałego, zasilacz pomocniczy, elementy indukcyjne i kondensatory oraz rezystory mocy. Przykładowe stanowisko z tymi modułami zaprezentowano na rysunku 6. Wybrane parametry opracowanych stanowisk umieszczono w tabeli 3, natomiast na rysunku 7 umieszczono kilka oscylogramów prezentujących wyniki badań falowników.



Rys.6. Zdjęcie stanowiska z modułami wykorzystywanymi do badania 3-fazowego falownika napięcia

Tabela 3. Parametry stanowiska dot. falowników napięcia

Parametr	jednofazowy	trójfazowy
	wartość	wartość
napięcie obwodu DC - U_{DC}	48 V	48 V
napięcie wyjściowe - U_{AC}	0 - U_{DC}	0 ÷ 45.6 V
moc wyjściowa - P_{OUT}	0 ÷ 500 W	0 ÷ 500 W
częstotliwość przełączeń - f_{SW}	5 ÷ 25000 Hz	1 ÷ 25 kHz
współczynnik modulacji - m_a	0 ÷ 1,2	0 ÷ 1.95



Rys.7. Przykładowe rejestracje przebiegów czasowych podczas badania falowników napięcia: Modułacja fazowa (a) modułacja z falą nośną jedno- (b), i trójfazowa (c) z dod. Trzecią harmoniczną (d)

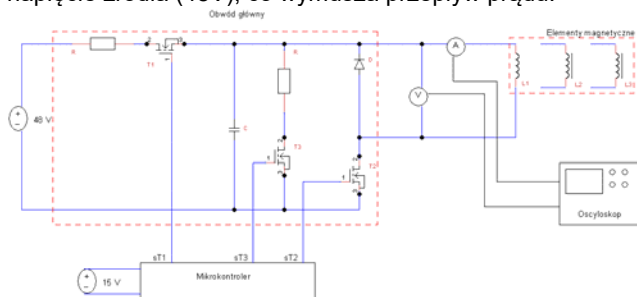
Stanowiska do testowania podzespołów energoelektronicznych

Istotnym aspektem dydaktycznym w energoelektronice jest kształcenie w zakresie podstawowych właściwości i parametrów podzespołów oraz urządzeń przekształcania energii elektrycznej. Posiadanie wiedzy na temat wyznaczania parametrów dynamicznych w elementach półprzewodnikowych mocy nowoczesnych struktur takich jak węgiel krzemu (SiC, ang. Silicon Carbide), azotek galu (GaN, ang. Gallium Nitride) czy też klasycznych krzemowych odmianach może być cenione przez obecnych pracodawców branży energoelektronicznej.

Z kolei poznanie właściwości opisujących drugą grupę podzespołów magnetycznych (dławików i transformatorów), najważniejszą po elementach półprzewodnikowych stanowi dopełnienie posiadanej przez inżyniera wiedzy co do istotnych podzespołów składowych urządzeń przekształcających energię elektryczną.

a) Tester elementów magnetycznych

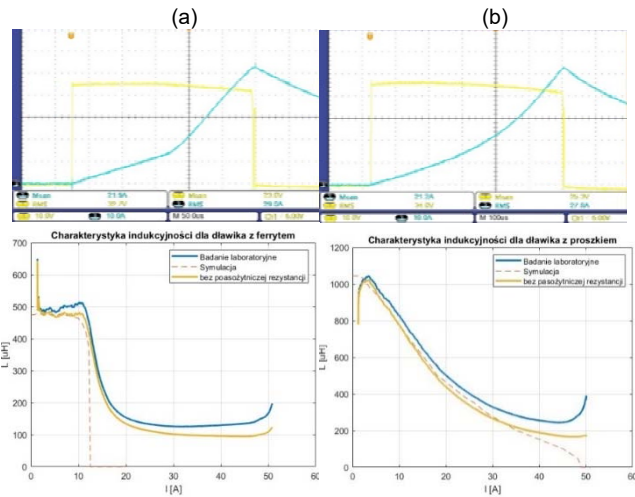
Stanowisko laboratoryjne do eksperymentalnego wyznaczania podstawowych parametrów dławików umożliwi studentowi zapoznanie się z charakterem zmian indukcyjności tego elementu magnetycznego podczas pracy przy różnych prądach płynących przez uzwojenie [10]. Dodatkowo możliwe jest określenie przepływu magnetycznego (natężenia pola magnetycznego), wprowadzającego rdzeń dławika w stan nasycenia i wynikających stąd zasadniczych właściwości tego elementu, decydujących o możliwości zastosowania w konkretnym przekształtniku energoelektronicznym. Schemat opracowanego stanowiska został przedstawiony na rysunku 8. Składa się z trzech elementów półprzewodnikowych (T1÷T3), z których T1 oraz T3 odpowiadają za proces ładowania/rozładowania magazynu energii C, natomiast zestaw elementów T2 z diodą D służy do generacji impulsu testowego. Wówczas, do uzwojenia badanego elementu magnetycznego przykładane jest napięcie źródła (48V), co wymusza przepływ prądu.



Rys.8. Schemat stanowiska dydaktycznego do wyznaczania parametrów w elementach magnetycznych

Zarówno przebieg wartości chwilowej prądu jak i napięcia uzwojenia podlegają rejestracji, a następnie służą analizie. Przykładowe rejestracje przebiegów wartości chwilowych dla dławika ferrytowego oraz dławika zrealizowanego z zastosowaniem rdzenia proszkowego przedstawiono na rysunku 9.

Uzyskane przebiegi czasowe stanowią podstawę dalszych analiz, polegających na wyznaczeniu charakterystyk zmian indukcyjności w funkcji prądu płynącego przez uzwojenie. Na zamieszczonych charakterystykach widoczne są wyraźne różnice w procesach nasycenia między rdzeniem ferrytowym a proszkowym. Na tym etapie uwidacznia się również wpływ parametrów pasożytniczych obwodu elementu magnetycznego, dzięki czemu studenci mają możliwość głębszej interpretacji uzyskanych wyników w konfrontacji z rezultatami osiągniętymi drogą symulacyjną.



Rys.9. Przebiegi wartości chwilowych napięcia (CH1) oraz prądu (CH2) uzwojenia oraz niżej odpowiednio charakterystyki indukcyjności w funkcji prądu płynącego przez uzwojenie w dławiku z rdzeniem: a) ferrytowym, b) proszkowym

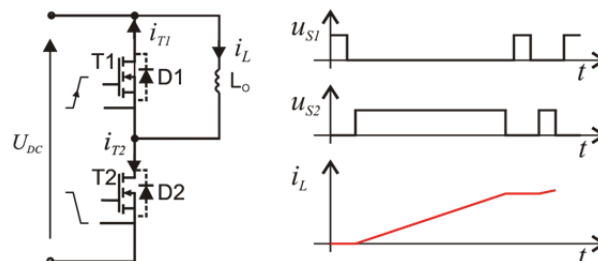
b) Tester elementów półprzewodnikowych

Ocena właściwości stosowanych w energoelektronice tranzystorów mocy, szczególnie w odniesieniu do ich procesów łączeniowych, uwzględniająca obserwację szybkozmiennych przebiegów wartości chwilowych napięć i prądów podczas przeprowadzania, stosowanej w nowoczesnej metodyce badań przyrządów półprzewodnikowych, tzw. testu 2-pulsowego, pozwala na zapoznanie się z obowiązującymi procedurami określania traconych energii i mocy łączeniowych i przybliża zrozumienia zjawisk występujących w samym łączniku półprzewodnikowym, tzn. w jego strukturze półprzewodnikowej [11] ÷ [13]. Przyczynia się tym samym do nabycia i pogłębienia wiedzy z/z analizy właściwości energetycznych również kompletnych urządzeń energoelektronicznych, co jest niezbędne w procesie ich projektowania i eksploatacji.

Do realizacji powyższych badań zaprojektowano specjalne stanowisko dydaktyczne zapewniające wielofunkcyjny i bezpieczny zakres badań trzech różnych tranzystorów mocy: MOSFET w technologii krzemowej (Si), IGBT oraz MOSFET z węgla krzemu (SiC). Stanowisko to umożliwi między innymi:

- badanie strat energii przełączania tranzystorów,
- badania wpływu rezystancji w obwodzie bramki,
- badania wpływu temperatury złącza na straty energii,
- badania ładunku i zastępczych pojemności złączowych.

Schemat ideowy testu dwupulsowego oraz parametry stanowiska pokazano odpowiednio na rysunku 10 i w tabeli 4.



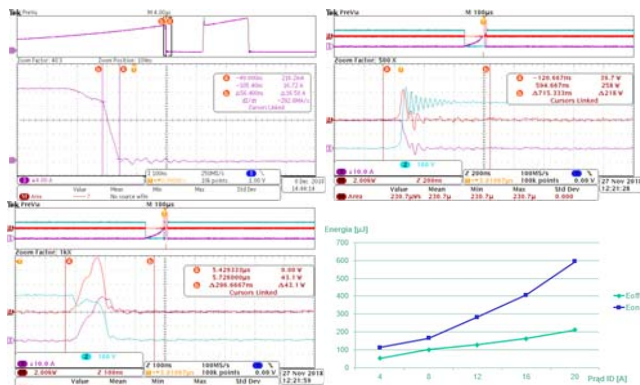
Rys.10. Schemat ideowy stanowiska dydaktycznego do badania właściwości dynamicznych łączników półprzewodnikowych mocy

W tym przypadku wszystkie wymagane elementy oraz sterownik mikroprocesorowy zintegrowano w jednej obudowie w celu zapewnienia bezpieczeństwa obsługi w

trakcie badania. Konstrukcja stanowiska umożliwia badania porównawcze różnych typów tranzystorów bez modyfikacji stanowiska, a zarazem dokonywanie obserwacji przebiegów napięcia i prądu w łącznikach w sposób bezpieczny dla studentów. Regulacja rezystancji obwodu bramki oraz wyboru badanego tranzystora odbywa się za pomocą przełączników zmieniających konfigurację obwodu. Na rysunku 11 zaprezentowano wybrane wyniki badań m.in. stromości opadania prądu w łączniku, energii załączania i wyłączania tranzystora oraz wykres zależności zmian tych energii od wartości przełączanego prądu w obwodzie.

Tabela 4. Parametry stanowiska do badania tranzystorów mocy

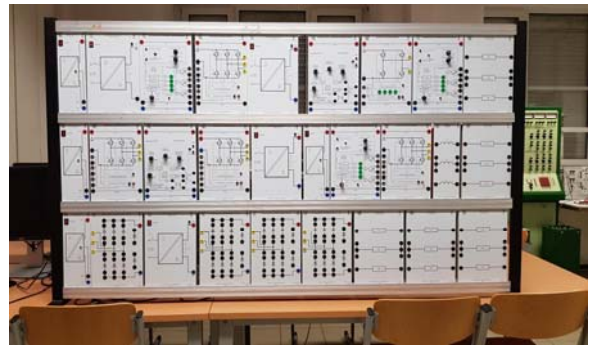
Parametr	wartość
Zakres napięcia dren źródło tranzystora	50-325 V
Zakres regulacji prądu	1-25 A
Zakres regulacji rezystancji bramkowej	5-100 Ω
Zakres regulacji temperatury złącza	25-125 $^{\circ}\text{C}$
Zakres napięcia zasilania	12-30 V
Wymagana moc zasilacza	150 W



Rys.11. Przykładowe rejestracje przebiegów czasowych oraz wyniki badania właściwości dynamicznych tranzystorów mocy

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane elementy procesu opracowania oraz implementacji nowych stanowisk dydaktycznych, zastępujących po części obecne oraz służących poprawie jakości kształcenia z zakresu energoelektroniki w ZEP/ISEP PW. W wyniku prowadzonych prac powstało łącznie ponad 10 typów stanowisk wspomagających proces dydaktyczny w zakresie tematyki jedno- i trójfazowych obwodów prostownikowych (sterowanych i niesterowanych), 1- i 2-gałęziowych bezpośrednich przekształtników DC-DC (obniżające oraz podwyższające napięcie), jedno- i trójfazowych falowników napięcia oraz testerów elementów półprzewodnikowych i magnetycznych. Równoległe do wspomnianych modułów, przygotowano szczegółową instrukcję do tych stanowisk oraz kompletny program ćwiczeń dla studentów. Opracowane stanowiska wyróżniają się zarówno pod względem estetycznym, ale przede wszystkim funkcjonalnym. Dość duże doświadczenia Autorów z różnymi komercyjnymi stanowiskami wskazują na unikalne właściwości opracowanych modułów oraz wysoki stopień bezpieczeństwa i wygodną obsługę dla studentów. Opracowane moduły umożliwiają przeprowadzenie kompletnego eksperymentalnego procesu dydaktycznego dla przyszłej kadry energoelektronicznej, dzięki czemu absolwenci tego kursu mają nie tylko wiedzę teoretyczną, ale także doświadczenie praktyczne.



Rys.12. Zdjęcie modułowego stanowiska eksperymentalnego w laboratorium energoelektronicznym ZEP/ISEP

Prowadzone prace były finansowane ze środków subwencji ZEP/ISEP PW oraz ze środków prowadzonego projektu ENERGYDULAB w ramach programu IDUB PW.

Autorzy składają podziękowania wszystkim, którzy przyczynili się do opracowania i modernizacji stanowisk dydaktycznych w Laboratorium Energoelektroniki ZEP/ISEP PW. Przede wszystkim doceniają aktywność dyplomantów i studentów: inż. Zuzanna Kalinowska, inż. Jan Klain, Paweł Turowski, mgr inż. Mikołaj Koszel, mgr inż. Bartosz Nowatkiewicz, inż. Karol Brzostek, oraz pracownika mgr inż. Pawła Młodzikowskiego, którzy w dużym stopniu zaangażowali się w prowadzone prace.

Autorzy: dr inż. Mariusz Zdanowski, dr inż. Piotr Grzejszczak Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: mariusz.zdanowski@pw.edu.pl; piotr.grzejszczak@pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Barlik R., Nowak M., „Technika tyrystorowa”, 1997, WNT
- [2] Tunia H., Barlik R., „Teoria Przekształtników”, 2003
- [3] Barlik R., Nowak M.: Technika tyrystorowa. WNT 1993.
- [4] Przybyła K., Frania K., Stępień M., Kasprzak M., „Educational Platform for Remote Power Electronics Laboratory Classes”, 2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2022, p. 311-314
- [5] Barlik R., Nowak M., „Energoelektronika: elementy, podzespoły, układy”, 2014
- [6] Nowak M., Barlik R., „Poradnik inżyniera energoelektronika 1”, 2016
- [7] <https://www.leybold-shop.com/load-power-electronics-73509.html>
- [8] <https://www.kandh.com.tw/pe-5000-power-electronics-training-system-pe-5000.html>
- [9] https://labvolt.festo.com/solutions/6_power_energy/59-8010-A0_power_electronics_training_system
- [10] Kreis H., “Pulsed Inductance Measurement on Magnetic Components from 0.1A to 10kA”, Bodo’s Power Systems, November 2021, p. 30-33
- [11] Bronisławski M., Hołub M., “Integrated test stand design for modern power electronics laboratory exercises”, 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’17 ECCE Europe), 2017
- [12] Mondal B., Pogulaguntla R.T., Karuppaswamy B A., „Double Pulse Test Set-up: Hardware Design and Measurement Guidelines”, 2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2022
- [13] Levett D., Zheng Z., Frank T., “Double Pulse Testing: The How, What and Why”, Bodo’s Power Systems, April 2020, p. 30-35