

doi:10.15199/48.2025.02.53

Dwugałęziowy, dwukierunkowy bezpośredni przekształtnik DC-DC do zastosowań dydaktyczno-badawczych

Streszczenie. Artykuł przedstawia etapy opracowania (projekt, budowa) stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do zastosowań w procesie dydaktycznym prowadzonym w Zakładzie Elektroniki Przemysłowej (ZEP) Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej (ISiEP) Politechniki Warszawskiej (PW). W pracy zamieszczono również wyniki przeprowadzonych testów opracowanego prototypu urządzenia, prezentujące zarówno poprawną pracę w trybie obniżającym lub podwyższającym napięcie, jak również analizę stanów dynamicznych oraz awaryjnych, co zilustrowano uzyskanymi drogą eksperymentalną rezultatami. Zamieszczone w pracy wyniki badań laboratoryjnych uwzględniają szereg przypadków i zmiennych wynikających ze zmiany parametrów w układzie sterowania oraz obwodzie głównym przekształtnika DC-DC.

Abstract. The paper presents the stages of development (design, construction) of a laboratory station intended for use in the didactic process conducted at the Department of Industrial Electronics of the Institute of Control and Industrial Electronics of the Warsaw University of Technology (WUT). The paper also includes the results of tests of the developed prototype of the device, presenting both correct operations in the buck and boost mode, as well as the analysis of dynamic and emergency states, which is illustrated by the experimental results. The laboratory test results included in the paper take into account several cases and variables resulting from changes in the parameters of the control system and the main circuit of the DC-DC converter. (**Two-branch, bidirectional direct DC-DC converter for teaching and research applications**).

Słowa kluczowe: bezpośredni przekształtnik DC-DC, przekształtnik wielogałęziowy, przekształtnik dwukierunkowy, stanowisko dydaktyczne, projektowanie przekształtnika.

Keywords: direct DC-DC converter, multi-branch converter, bidirectional converter, teaching station, converter design.

Wstęp

Trwająca obecnie transformacja energetyczna, której głównym powodem jest chęć zwiększonego wykorzystywania odnawialnych źródeł energii w celu zapewnienia potrzeb energetycznych powoduje szerokie zainteresowanie systemami energoelektronicznymi, dzięki którym możliwe jest wysokosprawne przekształcanie energii elektrycznej [1] ÷ [3]. Nieodzownymi podzespołami takich systemów przekształcania energii elektrycznej są układy zdolne do dopasowywania parametrów napięciowo-prądowych dla potrzeb użytkownika. Szeroko stosowaną w przemyśle grupą urządzeń energoelektronicznych o tej funkcjonalności są bez wątpienia bezpośrednie przekształtniki DC-DC o charakterystykach najczęściej obniżających lub/i podwyższających napięcie [4], często występujące również w formie wielogałęziowych struktur przekształtnikowych [5] ÷ [8]. Od tego typu układów wymaga się zazwyczaj zapewnienia dopasowania napięciowego do potrzeb odbiornika (lub innego układu pośredniczącego) względem często zmiennych parametrów napięciowo-prądowych źródła (np. przy współpracy z odnawialnymi źródłami energii). W zakresie użytkowego wykorzystania powyższych układów kładzie się również nacisk na wysoką jakość przekształcania energii elektrycznej (redukcja składowych tętniących), przy zachowaniu bardzo dobrych parametrów energetycznych (sprawność) oraz użytkowych (wymiary, masa).

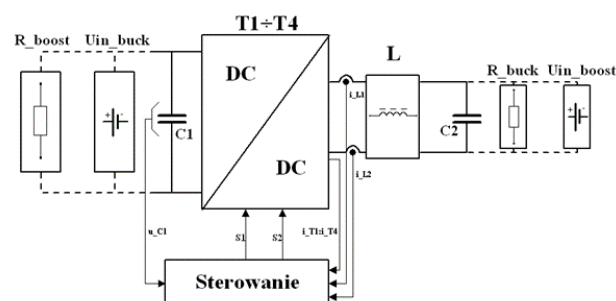
Osiągnięcie układu o powyższych właściwościach wymaga wyspecjalizowanej kadry inżynierów, których podstawowa wiedza dotycząca zasady działania przekształtników DC-DC oraz znajomości procedur projektowych powinna być przekazywana w ramach kształcenia w zakresie kursów (również praktycznych) dotyczących współcześnie stosowanej energoelektroniki. Wychodząc naprzeciw obserwowanym potrzebom, w tym zakresie, w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej (ISiEP) Politechniki Warszawskiej (PW) w ostatnich latach podjęto szereg inicjatyw, których celem było podniesienie jakości kształcenia w zakresie zajęć laboratoryjnych powiązanych tematycznie z przekształcaniem energii elektrycznej [9]. Jednym z zadań

było opracowanie stanowiska laboratoryjnego, które wspomagałoby proces dydaktyczny w tematyce bezpośrednich przekształtników napięcia stałego [10], [11].

Rezultatem opracowywanego stanowiska dydaktycznego w tym zakresie było zaprojektowanie urządzenia, które dałoby możliwość realizacji wielu struktur przekształtnikowych w jednym miejscu. Dlatego zaproponowano moduł laboratoryjny umożliwiający realizację 4 topologii przekształtnikowych:

- jednogałęziowego lub dwugałęziowego przekształtnika obniżającego napięcie;
- jednogałęziowego lub dwugałęziowego przekształtnika podwyższającego napięcie,

dając przy tym możliwość stosowania różnych technik sterowania wybranym układem (np. zadawanie przesunięcia fazowego lub nie w sygnałach sterujących tranzystorami obwodów dwugałęziowych). Struktura stanowiska została przedstawiona na rysunku 1, natomiast w tabeli 1 zestawiono podstawowe parametry dotyczące warunków pracy urządzenia.



Rys. 1. Schemat blokowy opracowanego stanowiska laboratoryjnego.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono najistotniejsze etapy realizacji stanowiska oraz szereg rezultatów badań o charakterze laboratoryjnym, które są potwierdzeniem poprawności przeprowadzonych prac projektowych.

Oczekiwania i założenia

Mechanizm kształcenia o charakterze praktycznym powinien uwzględniać ryzyko możliwości przypadkowego uszkodzenia aparatury laboratoryjnej, co związane jest z jej użytkowaniem przez nabywających doświadczenia zawodowego przyszłych inżynierów. Dlatego też sprzęt ten powinien być w szczególności weryfikowany na poziomie jego opracowywania pod tym względem. Dlatego podczas projektowania stanowisk, oprócz zapewnienia funkcjonalności przekształcania energii elektrycznej zgodnie z przeznaczeniem, największy nacisk położono na spełnienie założeń dotyczących przede wszystkim:

- 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.

A. Parametry elektryczne

Mając na uwadze powyższe założenia, ze względu na dydaktyczny charakter stanowiska zwrócono szczególną uwagę na bezpieczeństwo osób użytkujących urządzenie. Z tego względu zdecydowano się na określenie napięciowych warunków użytkowania. Z parametrów zamieszczonych w tabeli 1 wynika, iż założono maksymalny poziom napięcia zasilającego układ wynoszący 48 V w trybie obniżającym oraz 15 V w trybie podwyższającym napięcie. Przy zastosowaniu programowego ograniczenia współczynnika wypełnienia impulsu D do wartości 0,65 napięcie wyjściowe przekształtnika w trybie podwyższającym napięcie zostało ograniczone do wartości 50 V. Niemniej jednak, w celu zachowania badawczego charakteru opracowanego układu, przewidziano również scenariusz umożliwiający prowadzenie prac na stanowisku przy zasileniu układu z wyższego napięcia (maks. 48V), przy czym zastosowano niezbędne zabezpieczenia nadnapięciowe, które uniemożliwiają pracę tego układu z napięciem na wyjściu przekraczającym 80V.

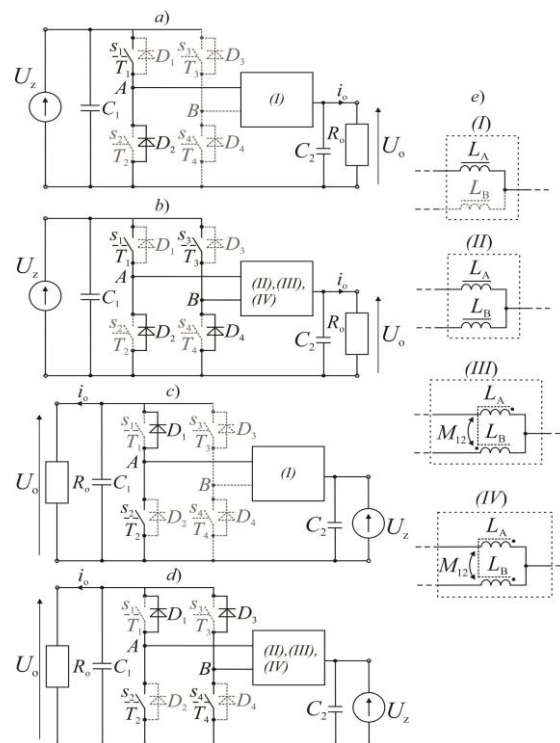
Tabela 1. Nominalne parametry pracy opracowanego przekształtnika dwukierunkowego.

Parametr	Tryb pracy	
	podwyższający	obniżający
	Wartość	Wartość
Częstotliwość przełączeń - f_{sw}	10 ÷ 50 kHz	
Współczynnik wypełnienia impulsu - D	0 ÷ 0,65	0 ÷ 0,95
Napięcie wejściowe nominalne - U_{IN}	15 V	48 V
Napięcie wyjściowe nominalne - U_{OUT}	15 ÷ 50 V	0 ÷ 45,6 V
Moc wyjściowa maksymalna - P_{OUT}	500 W	

B. Analiza pracy układu

Sprecyzowanie wymagań, oczekiwań oraz założeń co do parametrów elektrycznych przyczyniło się do zaproponowania struktury topologicznej układu, przewidzianej do pracy w czterech trybach (Rys. 2). W przypadku podania sygnału (s_1) bądź pary sygnałów (s_1, s_3) sterujących do tranzystorów górnej grupy elementów (T_1, T_3) oraz konfiguracji zasilania oraz odbiornika zgodnie z rysunkiem 2a lub 2b przekształtnik będzie pracował w trybie obniżającym napięcie odpowiednio w konfiguracji jedno- oraz dwu-gałęziowej. W tym celu ze wspomnianymi tranzystorami będą współpracowały diody z dolnej grupy elementów (D_2, D_4). Zamiana stron zasilania oraz odbiornika (zgodnie z Rys. 2c lub 2d) orazysterowanie tranzystorów T_2 oraz/lub T_4 poprzez podanie sygnałów s_2

lub/i s_4 doprowadzi do pracy układu w trybie podwyższającym, jak to miało miejsce poprzednio w konfiguracji jedno- lub dwu-gałęziowej. Wówczas prąd zaczął przewodzić również diody z górnej grupy podzespołów (D_1, D_3).



Rys. 2 Możliwe stany pracy opracowanego przekształtnika DC-DC: jednogięziowy obniżający (a), podwyższający (b) oraz dwugięziowy obniżający (c) i podwyższający (d) napięcie z elementami magnetycznymi o różnych konfiguracjach (e).

Ponadto, konfiguracja przekształtnika do pracy dwugięziowej umożliwia przeprowadzenie studium badawczego odnoszącego się zarówno do stosowania niezależnie pracujących dławików, jak również zastosowanie różnego rodzaju sprzężeń magnetycznych (Rys. 2e). Stanowi to znaczne poszerzenie programu badań, zwłaszcza przy uwzględnieniu możliwości sterowania synchronicznego (sygnały sterujące bez przesunięcia fazowego) lub z zastosowaniem przesunięcia sygnału sterującego tranzystora o kąt 180 st. el. względem sygnału tranzystora z sąsiedniej gałęzi półprzewodnikowej.

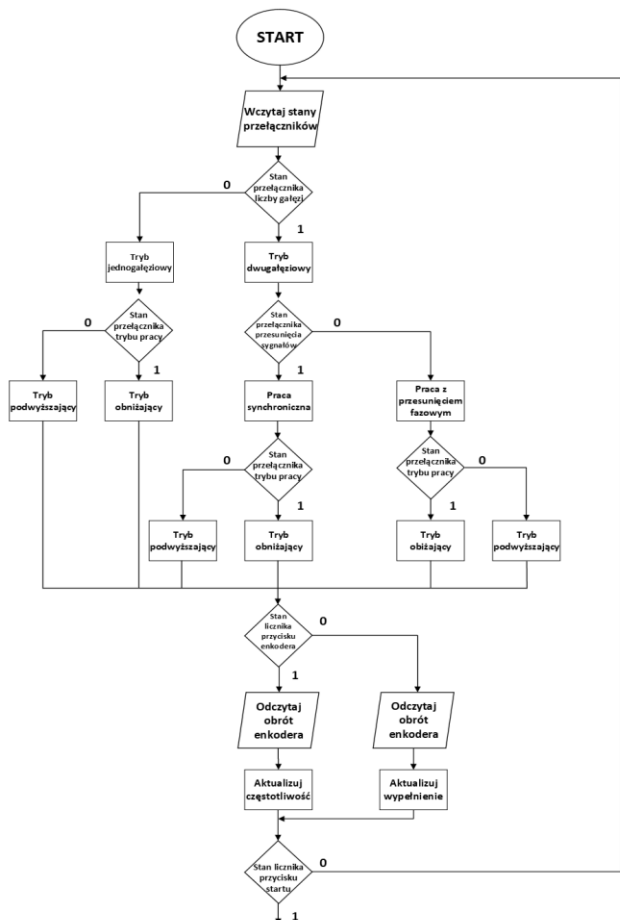
C. Sterowanie

Urządzenie umożliwiające realizację kilku topologii przekształtnikowych, uwzględniając przy tym chęć regulacji kąta wyprzedzenia impulsów sterujących, wymaga algorytmu sterowania pozwalającego na konfigurację do pracy w wybranym wariancie. W celu opracowania takiego algorytmu przeprowadzono studium powyżej opisanych przypadków oraz możliwość zmiany podstawowych parametrów sterowania (częstotliwość przełączeń f_s , współczynnik wypełnienia impulsu/ów D). Efektem prowadzonych prac jest przedstawiony na rysunku 3 graf przedstawiający algorytm generowania sygnałów sterujących.

Opracowanie powyższego algorytmu działania pozwoliło na bardziej dokładne zdefiniowanie oczekiwań względem jednostki sterującej, której wybór stanowił istotny etap realizacji projektu. Oczekiwania względem układu sterującego oprócz generacji impulsów sterujących uwzględniały również funkcjonalności użytkowe stanowiska, w tym możliwość realizacji interfejsu użytkownika. Zgodnie

z przedstawionym algorytmem sterowania konieczne było zagwarantowanie zmiany takich parametrów jak: wybór topologii obniżającej lub podwyższającej oraz trybu pracy jedno- lub dwugaźziowej z możliwością ustawienia sygnałów w trybie synchronicznym lub z przesunięciem fazowym.

Poszukując odpowiedniego układu do sterowania projektowanym przekształtnikiem zwrócono również uwagę na cenę oraz dostępność, co finalnie zdecydowało o wyborze mikroprocesora ATmega328P. Oprócz spełnienia powyższych oczekiwań atutem wytypowanego mikroprocesora jest fakt wyposażenia w niezbędne peryferia (np. przetworniki analogowo-cyfrowe, możliwość przerwania sprzętowego), które dodatkowo pomogą zrealizować zaplanowane zabezpieczenia układu.



Rys. 3 Algorytm konfiguracji sygnałów sterujących.

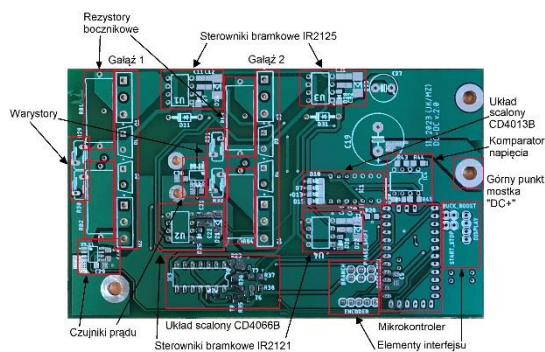
Projekt i opracowanie stanowiska laboratoryjnego

Proces doboru poszczególnych podzespołów obwodu mocy takich jak elementy półprzewodnikowe oraz biernie został zrealizowany w oparciu o zastosowanie metodyki analityczno-symulacyjnej, pozwalającej na jednoczesną weryfikację uzyskanych drogą obliczeniową wyników w oprogramowaniu symulacyjnym [11]. W rezultacie prowadzonych prac uzyskano minimalne wartości prądów i napięć, jakie muszą spełniać komponenty półprzewodnikowe przekształtnika. Dla stanu ustalonego, przy maksymalnym zakładanym obciążeniu układu, wyniosły one odpowiednio 12,4 A wartości średniej oraz 150 V napięcia wsteczne.

Przeprowadzona analiza możliwych do wystąpienia stanów awaryjnych w projektowanym układzie oraz względy bezpieczeństwa wskazały na konieczność realizacji zabezpieczeń nadprądowych w torze przepływu prądu głównego każdego z tranzystorów oraz potrzebę

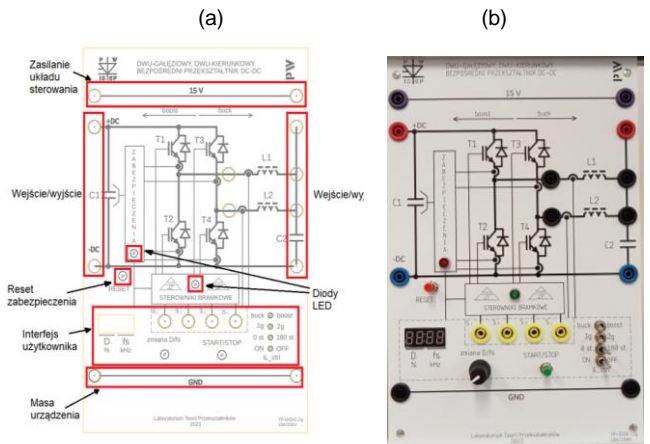
opracowania zabezpieczenia nadnapięciowego po stronie wyjściowej przekształtnika podwyższającego napięcie. W tym celu zrealizowano zabezpieczenia sprzętowe (bocznikowy pomiar prądu i funkcje zabezpieczeń sterowników bramkowych IR2121, IR2125 oraz sprzętowa komparacja napięcia wyjściowego, zastosowanie wariatorów) oraz zabezpieczenie programowe (zgłoszenie od sterowników bramkowych; w przypadku zabezpieczenia nadnapięciowego zastosowanie przetwornika AC).

W ramach prowadzonych prac projektowych opracowano płytke obwodu drukowanego (Rys. 4.) o wymiarach 133 na 80 mm, która oprócz obwodu głównego oraz sterowania tranzystorami zawiera również elementy zabezpieczeń oraz interfejsu użytkownika.



Rys. 4. Fotografia opracowanego obwodu drukowanego (PCB).

Oprócz zapewnienia funkcjonalności, niezbędnych do poprawnej i bezawaryjnej pracy stanowiska, istotnym etapem realizacji projektu było opracowanie panelu frontowego. W tym celu urządzenie zostało zaprojektowane w formie pulpitu kompatybilnego ze standardem wyposażenia laboratoriów dydaktycznych, przez co charakteryzuje się ujednoczonym wyglądem względem urządzeń dotychczas w nim pracujących. Zwrócono przy tym uwagę na kwestie użytkowe pozwalające niewykwalifikowanym użytkownikom na bezproblemowe i intuicyjne korzystanie ze stanowiska. Projekt panelu frontowego przedstawia rysunek 5a, gdzie można wyszczególnić strefę obwodu mocy oraz obwodu sterowania wraz z intuicyjnym interfejsem użytkownika w postaci zadajników trybu pracy (korespondujących z algorytmem sterowania), wyświetlacza 7-segmentowego współpracującego z enkoderem umożliwiającym nastawy częstotliwości oraz wsp. wypełniania impulsu. Realizację praktyczną pulpitu stanowiskowego zaprezentowano na rysunku 5b.



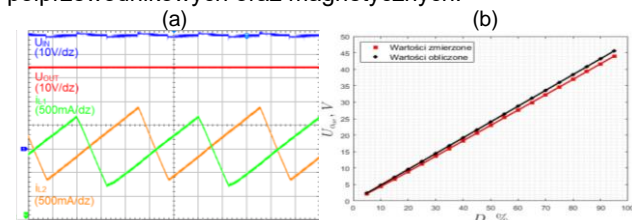
Rys. 5. Wizualizacja panelu frontowego (a) oraz fotografia wykonanego prototypu (b) stanowiska.

Badania laboratoryjne

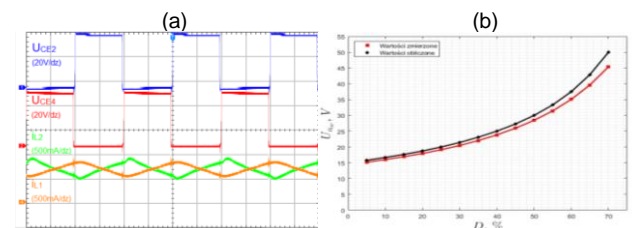
Opracowany prototyp urządzenia został poddany testom uruchomieniowym, które uwzględniały m.in. poprawność pracy w warunkach znamionowych oraz szereg prób laboratoryjnych mających celu wymuszenie stanów awaryjnych i weryfikację działania systemu zabezpieczeń.

A. Tryby pracy układu

W pierwszym etapie prac badawczych prowadzono obserwacje przebiegów wartości chwilowych prądów oraz napięć w trybie obniżającym (Rys. 6a) oraz podwyższającym (Rys. 7a) napięcie, przy napięciu zasilania odpowiednio o wartościach 48V oraz 15V. Poprawność ciągłej pracy układów potwierdziły również pomiary napięcia wyjściowego wyznaczone w funkcji zmian współczynnika wypełnienia impulsów sterujących D , które skonfrontowano z wartościami obliczonymi (Rys. 6b, Rys. 7b). Zaobserwowane różnice w otrzymanych charakterystykach wynikają ze spadków napięć występujących w elementach półprzewodnikowych oraz magnetycznych.

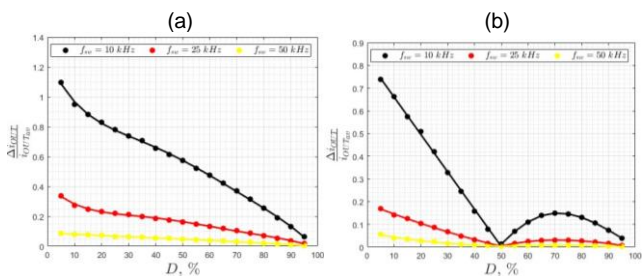


Rys. 6 Oscylogram (a) prezentujący pracę układu obniżającego: napięcie na wejściu (niebieski), wyjściu (czerwony), oraz prądy dławików L1 (zielony), L2 (pomarańczowy); $f_{sw} = 10 \text{ kHz}$, $D = 75\%$ oraz charakterystyka sterowania układu (b).



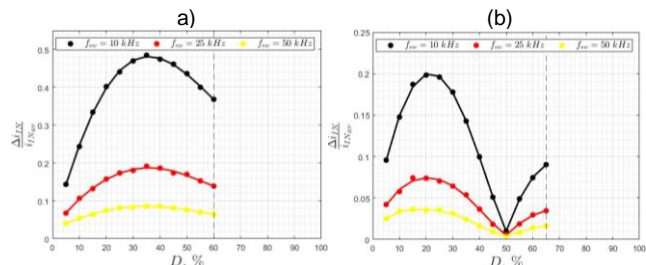
Rys. 7 Oscylogram (a) prezentujący pracę układu podwyższającego: napięcia na tranzystorach T2 (niebieski), T4 (czerwony), oraz prądy dławików L1 (pomarańczowy), L2 (zielony); $f_{sw} = 50 \text{ kHz}$, $D = 50\%$ oraz charakterystyka sterowania układu (b).

Prowadzony proces badawczy uwzględniał również wyznaczenie charakterystyk tętnień prądu w funkcji zmian współczynnika D w zakresie $5 \div 95\%$ dla układu obniżającego (Rys. 8) oraz $5 \div 65\%$ dla podwyższającego napięcie (Rys. 9). Dodatkowo prowadzono badania przy różnych wartościach częstotliwości pracy elementów półprzewodnikowych f_s (10 kHz, 25 kHz oraz 50 kHz).



Rys. 8 Charakterystyki tętnień prądu wejściowego w funkcji zmian współczynnika D , wyznaczone dla częstotliwości 10 kHz (czarny), 25 kHz (czerwony) oraz 50 kHz (żółty) w przypadku pracy jednogłęziowej (a) oraz dwugłęziowej z przesunięciem fazowym 180 st. el. (b) wyznaczone dla przekształtnika obniżającego napięcie.

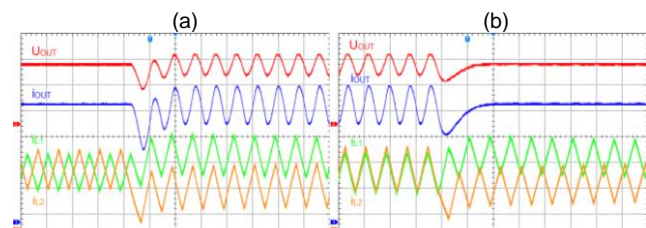
Uzyskane wyniki dla układu obniżającego napięcie dla pracy jednogłęziowej (Rys. 8a) oraz dwugłęziowej (Rys. 8b) i konsekwentnie dla układu podwyższającego napięcie (Rys. 9a, Rys. 9b) umożliwiając obserwację wpływu różnych parametrów sterowania oraz wartości indukcyjności dławika/-ów na jakość przekształcaną energię elektryczną (poziom składową tętniącej). Tym samym stanowią o dydaktycznym aspekcie prezentowanego stanowiska.



Rys. 9 Charakterystyki tętnień prądu wejściowego w funkcji zmian współczynnika D , wyznaczone dla częstotliwości 10 kHz (czarny), 25 kHz (czerwony) oraz 50 kHz (żółty) w przypadku pracy jednogłęziowej (a) oraz dwugłęziowej z przesunięciem fazowym 180 st. el. (b) wyznaczone dla przekształtnika podwyższającego napięcie.

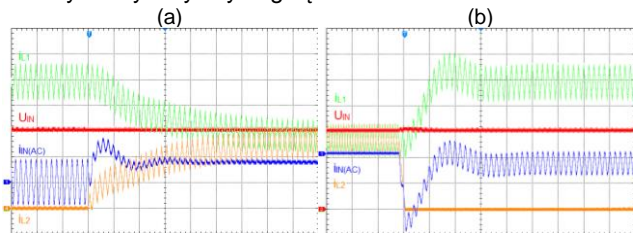
B. Stany przejściowe

Kolejnym, istotnym aspektem dydaktycznym stanowiska jest obserwacja wpływu przesunięcia fazowego na parametry wejściowe/wyjściowe układu. W tym celu przewidziano możliwość dynamicznej zmiany wartości kąta przesunięcia fazowego poruszając się w dwóch zakresach: 0 st. el. lub 180 st. el. Z punktu widzenia zarówno bezpieczeństwa użytkowników jak i funkcjonowania samego urządzenia ważna jest także reakcja urządzenia w dynamicznych stanach przejściowych związanych ze zmianąysterowania. Dlatego przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych, z których pierwsze dotyczyły rejestracji oscyloskopowych w trakcie zmiany kąta (Rys. 10). W wyniku procesu zmiany kąta ze 180 st. na 0 st. el. zaobserwowano znaczący wzrost składowej w przebiegach napięcia oraz prądu wyjściowego (rys. 10a). Zmiana ta jest tym bardziej obserwowalna, im bliższy wartości 0,5 jest współczynnik wypełnienia impulsu/-ów sterującego/-ych, o czym mogą świadczyć również charakterystyki przedstawione na rysunkach 8 i 9. Odwrotna zmiana kąta przesunięcia (z 0 st. na 180 st. el.) przynosi wówczas większością eliminację składową tętniącej, prowadząc tym samym do poprawy jakości przekształcaną energię elektryczną. W obu przypadkach wystąpienia stanów dynamicznych zaobserwowano również chwilową zmianę rozplywów prądów średnich w dławikach, których wartości zrównują się po upływie czasu około 2 ms. Pomimo tego, należy stwierdzić, że przechodzenie pomiędzy pracą z sygnałami synchronicznymi oraz przesuniętymi odbywa się w sposób poprawny.



Rys. 10 Obserwacja stanu przejściowego podczas zmiany kąta przesunięcia w sygnałach sterujących z 180 st. na 0 st. (a) oraz z 0 st. na 180 st. (b): prąd wyjściowy (niebieski), napięcie na wyjściu (czerwony) oraz prądy dławików L1 (zielony), L2 (pomarańczowy).

W kolejnym teście zaobserwowano moment dołączenia (Rys. 11a) oraz odłączenia (Rys. 11b) sygnału sterującego tranzystorem z drugiej gałęzi przekształtnika pracującego w trybie podwyższającym napięcie. Przy tych samych parametrach napięcia wejściowego (15 V) oraz odbiornika obserwowano wartości chwilowe prądów dławików \hat{i}_{L1} , \hat{i}_{L2} oraz składową zmienną prądu wejściowego $\hat{i}_{IN(AC)}$, co pozwoliło jednoznacznie stwierdzić redukcję tej składowej w przypadku pracy dwugałęziowej z przesunięciem fazowym. Dodatkowym aspektem jest obserwowany podział wartości średniej prądu wejściowego na dwie gałęzie przekształtnikowe, co pozwala odciążać prądowo elementy półprzewodnikowe. Jak wynika z zarejestrowanych przebiegów, przekształtnik pracował właściwie podczas zmiany liczby aktywnych gałęzi.

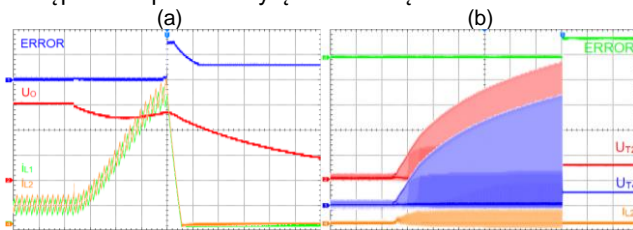


Rys. 11 Obserwacja stanu przejściowego podczas dołączenia (a) oraz odłączenia (b) sterowania drugiej gałęzi układu: składowa zmienna prądu wejściowego (niebieski), napięcie na wejściu (czerwony) oraz prądy dławików L1 (zielony), L2 (pomarańczowy), $D = 50\%$.

C. Stany awaryjne

Odrębne, istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkownika urządzenia było przeprowadzenie badania układu dot. zachowania w stanach dynamicznych powiązanych z działaniem zabezpieczeń: nadprądowego i nadnapięciowego. W pierwszej kolejności dwugałęziowy przekształtnik w topologii obniżającej napięcie poddano próbie dynamicznej zmiany obciążenia (znaczące zmniejszenie rezystancji odbiornika) celem uzyskania kontrolowanego wzrostu prądów \hat{i}_{L1} , \hat{i}_{L2} powyżej wartości skutkującej zadziałaniem zabezpieczenia, co przedstawia rysunek 12a. Po osiągnięciu progu zabezpieczenia następuje zablokowanie pracy tranzystorów, co skutkuje zmniejszeniem prądów do wartości zerowej (w czasie około $100\mu s$) i bezpieczne wyłączenie urządzenia.

Próbie zabezpieczenia nadnapięciowego przeprowadzono w konfiguracji podwyższającej napięcie. Uruchomiono przekształtnik bez podłączonego obciążenia przy niezerowym wypełnieniu, co skutkowało występowaniem nieciągłego prądu dławików, a w konsekwencji wzrostem napięcia wyjściowego (oraz napięć tranzystorów u_{T2} , u_{T4}) powyżej wartości wynikającej z teoretycznej zależności. Zaobserwowane przebiegi (Rys. 12b) obrazują moment wystąpienia sygnału błęd, a następnie bezpieczne wyłączenie urządzenia.



Rys. 12 Obserwacja stanu awaryjnego podczas zasymulowania przypadku przekroczenia prądu (a) oraz przekroczenia napięcia (b): Sygnał błęd (ERROR), napięcie wyjściowe (U_o), prądy dławików (\hat{i}_{L1} , \hat{i}_{L2}), napięcie na tranzystorach (u_{T2} , u_{T4}).

Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane aspekty projektowo – konstrukcyjne dotyczące opracowania

stanowiska dydaktycznego przeznaczonego dla potrzeb kształcenia kadry inżynierskiej w zakresie układów energoelektronicznych. Do głównych zalet prezentowanego urządzenia należy zaliczyć uniwersalność, która daje możliwość przeprowadzenia cyklu badawczego zarówno dla układu obniżającego jak i podwyższającego napięcie, z uwzględnieniem zmiany liczby gałęzi oraz zastosowania przesunięcia fazowego w sygnałach sterujących. Zaprezentowano szereg rezultatów wynikających z prowadzonych prac badawczych, przy których wyborze kierowano się zarówno aspektem dydaktycznym jak i koniecznością zapewnienia bezpiecznej i bezawaryjnej pracy. Na przykładzie uzyskanych wyników stwierdzono poprawną pracę urządzenia w różnych warunkach sterowania jak i konfiguracjach topologii. Uzyskane charakterystyki oraz przebiegi czasowe wskazują na duży potencjał dydaktyczny, mogący w sposób znaczny wspomóc proces kształcenia i być uzupełnieniem treści wykładowych przedmiotów związanych z energoelektroniką prowadzonych w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej.

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

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

LITERATURA

- [1] Hamza Nisar, Amir Hamza, Faiza Ahmad, „Role of Power Electronics in Renewable Energy Generation: Reviewing Energy Saving Applications, Solutions, and Insights”, 2023, International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)
- [2] Fangyuan Shi, Rui Li, Jiatao Yang, Wei Yu, „High Efficiency Bidirectional DC-DC Converter with Wide Gain Range for Photovoltaic Energy Storage System Utilization”, 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)
- [3] Lenon Schmitz, Roberto F. Coelho, Denizar C. Martins, “High step-up high efficiency dc-dc converter for module-integrated photovoltaic applications”, 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)
- [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] Tytelmaier K, Husev O., Veligorskiy O., Yershov R., “A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems”, 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)
- [8] Saman A. Gorji, Hosein G. Sahebi, Mehran Ektesabi, Ahmad B. Rad, “Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC-DC Power Converters: An Overview”, IEEE Access (Volume: 7), 2019
- [9] Zdanowski M., Grzejszczak P., „Stanowiska dydaktyczne w laboratorium energoelektroniki ISEP/ZEP PW – opracowanie i implementacja w procesie dydaktycznym”, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 100 NR 5/2024, pp 8-12
- [10] Klain J., „Dwukierunkowy 2-gałęziowy bezpośredni przekształtnik DC/DC - stanowisko dydaktyczne”, Politechnika Warszawska 2023, Praca magisterska, promotor M.Zdanowski
- [11] Turowski P. „Bezpośrednie przekształtniki napięcia stałego: studium symulacyjno-projektowe”, Politechnika Warszawska 2023, Praca inżynierska, promotor M.Zdanowski