

Modularny Przekształtnik Wielopoziomowy z Wykorzystaniem Półprzewodników z Azotku Galu

Streszczenie. W artykule opisano zagadnieniami związane z Modularnym Przekształtnikiem Wielopoziomowym wykonanym z wykorzystaniem tranzystorów HEMT z azotku galu (GaN). Przedstawiony został projekt obwodu silnopiętowego urządzenia oraz wymagania stawiane układowi sterowania. W publikacji przedstawiono również opis elektronicznej platformy sterującej dla przekształtnika.

Abstract. The article describes issues related to the Modular Multilevel Converter made with the use of gallium nitride (GaN) HEMT transistors. The design of the power circuit of the device and the requirements for the control system are presented. The publication also presents the description of the electronic control platform designed to control the converter. (**GaN-based Modular Multilevel Converter**).

Słowa kluczowe: modularny przekształtnik wielopoziomowy, tranzystory GaN, falownik napięcia, energoelektronika

Keywords: modular multilevel converter, GaN transistors, voltage source inverter, power electronics

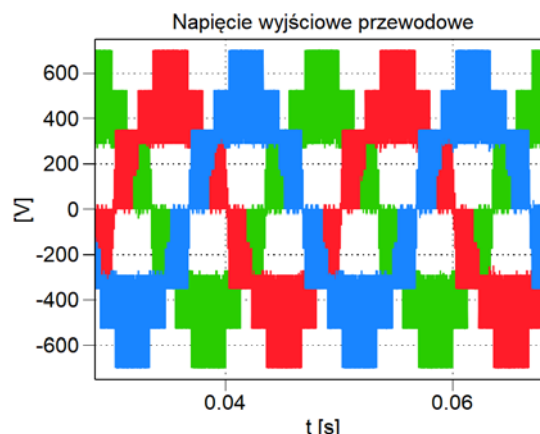
Wprowadzenie

Modularny Przekształtnik Wielopoziomowy (ang. Modular Multilevel Converter – MMC) został przedstawiony w 2003 roku [1] jako topologia DC/AC odpowiednia dla aplikacji średnich oraz wysokich napięć. Przykładem zastosowania przekształtnika jest układ dla systemu wysokiego napięcia prądu stałego przedstawiony przez firmę Siemens w [2]. W ciągu ostatnich lat przekształtnik MMC stał się przedmiotem badań dla wielu zespołów naukowych w kontekście różnych aplikacji. W [3] opisano MMC dla układu napędowego średniego napięcia, w [4] przedstawiono dwukierunkowy, izolowany przekształtnik DC/DC o topologii MMC, a w [5] przekształtnik MMC zasilany napięciem prostokątnym pracujący jako wysokiej jakości źródło niskiego napięcia. Układ dla tej ostatniej aplikacji jest tematem niniejszego artykułu. Zdecydowana większość publikacji o MMC dotyczy urządzeń wykonanych z wykorzystaniem łączników krzemowych. Artykuł dotyczy natomiast projektu przekształtnika MMC wykonanego przy użyciu tranzystorów HEMT z azotku galu (GaN). Takie rozwiązanie umożliwia osiągnięcie wyższej częstotliwości przełączeń tranzystorów, co umożliwia istotne zmniejszenie wartości użytych elementów pasywnych w porównaniu do urządzenia wykonanego z użyciem tranzystorów IGBT. W publikacji omówiono wymagania stawiane układowi sterowania, opisano elektroniczną platformę sterującą, a także opisano projekt wybranych elementów układu silnopiętowego.

Podstawy

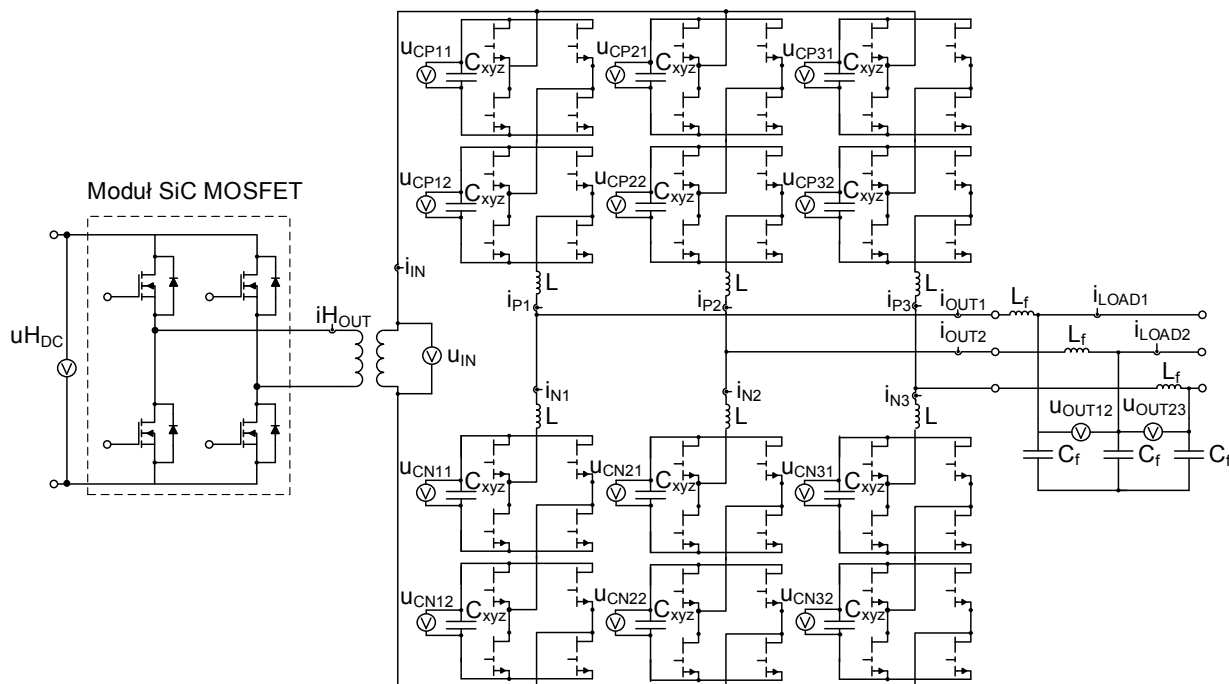
Przekształtnik trójfazowy MMC składa się trzech gałęzi, które z kolei złożone są z dwóch ramion każde. Jedno ramię zawiera dławik oraz szeregowo połączone komórki składające się z kondensatora oraz, w zależności od topologii, półmostka lub mostka H. Półmostki umożliwiają generowanie napięcia unipolarnego i mogą być zastosowane do przekształtnika zasilanego napięciem stałym. Zastosowanie mostków H zwiększa zdolność urządzenia do blokowania stanów awaryjnych [6], a także pozwala na pracę przekształtnika zasilanego napięciem przemiennym. Poprzez zwiększanie liczby komórek możliwe jest zwiększenie liczby poziomów napięć dostępnych na wyjściu oraz zbudowanie urządzenia na wyższe napięcie. W omawianym urządzeniu występują dwie komórki w każdym ramieniu. Przebieg wyjściowego napięcia przewodowego dla takiego przekształtnika MMC przedstawiono na Rys.1.

Omawiany przekształtnik zasilany jest poprzez transformator separacyjny napięciem prostokątnym o częstotliwości 1.25 kHz. Z tego względu komórki składają się z pełnych mostków. Napięcie prostokątne wytwarzane jest przez wejściowy mostek H wykonany w technologii węgla krzemu, natomiast komórki w przekształtniku MMC zawierają tranzystory GaN HEMT. W omawianym układzie zastosowano na wyjściu filtr LC tak, aby uzyskać na wyjściu napięcie sinusoidalne. Schemat ideowy układu przedstawiono na Rys.2.



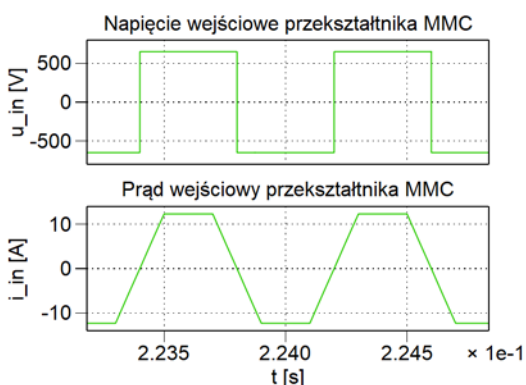
Rys. 1. Przebieg przewodowego napięcia na wyjściu nieobciążonego przekształtnika MMC o dwóch komórkach w każdym ramieniu

Do poprawnej pracy urządzenia konieczny jest układ sterowania zapewniający możliwość wygenerowania żądanego napięcia na wyjściu przekształtnika, utrzymania napięć na kondensatorach w komórkach na odpowiednim poziomie a także ograniczenie maksymalnego prądu, który może popłynąć przez łączniki. Aby spełnić te warunki mierzone są napięcia kondensatorów w komórkach oraz kondensatorów filtra wyjściowego a także prądy ramion, a wyniki pomiarów wykorzystywane są w algorytmach sterowania. Dodatkowo w celu monitorowania poprawnej pracy układu, przetworniki pomiarowe mierzą napięcie zasilania wejściowego mostka H, napięcie po stronie wtórnej transformatora separującego oraz prądy uzwojeń transformatora, prądy dławików filtra wyjściowego oraz prądy wyjściowe falownika napięcia. Rozmieszczenie przetworników pomiarowych zaznaczono na Rys.2.



Rys.2. Schemat ideowy przekształtnika o topologii MMC z układem zasilania z transformatorem separacyjnym

W układzie występuje w sumie 16 pomiarów napięcia oraz 12 celu pomiarów prądu co daje konieczność wykonania konwersji wielkości analogowych na cyfrowe dla 28 sygnałów. W celu sterowania łącznikami w komórkach wykorzystana jest modulacja unipolarna. Ta technika wymaga dwóch niezależnych sygnałów PWM dla każdej komórki, czyli 24 sygnałów dla przekształtnika MMC. Częstotliwość przełączeń tranzystorów wynosi 100 kHz co w porównaniu do układu wykonanego przy użyciu krzemowych tranzystorów IGBT umożliwia redukcję tętnień prądów dławików oraz napięć na kondensatorach filtra wyjściowego. Sterowanie mostkiem wejściowym wymaga wygenerowania jednego sygnału sterującego, który jest następnie podawany na dwa tranzystory, a pozostałe dwa łączniki sterowane są sygnałem zanegowanym.



Rys. 3. Przebieg napięcia i prądu wejściowego omawianego przekształtnika MMC.

W celu utrzymania zadanych poziomów napięć kondensatorów w komórkach konieczne jest dostarczenie mocy chwilowej $p_{in} = i_{in} u_{in}$ o wartości średniej równej sumie mocy pobieranej przez odbiornik oraz strat mocy w przekształtniku. Dostarczenie p_{in} może zostać zrealizowane w efektywny sposób, kiedy prąd i_{in} ma kształt trapezoidalny (wytworzenie prostokątnego kształtu jest niemożliwe ze względu na obecność indukcyjności w obwodzie) i zmiana

znaku prądu oraz napięcia u_{in} następują w tej samej chwili [5] (Rys.3.). Takie rozważanie umożliwia uzyskanie przełączeń tranzystorów wejściowego mostka H przy zerowym prądzie.

Platforma sterująca

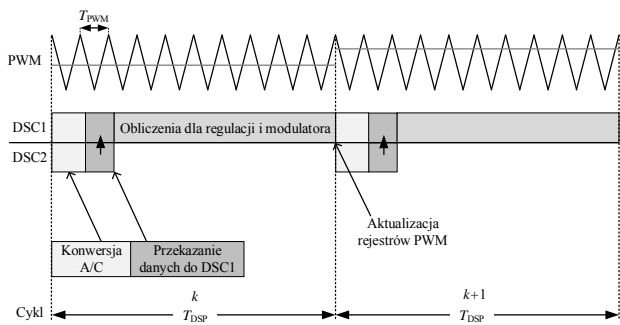
Opracowana platforma sterująca została wykonana w formie tworzących stos obwodów drukowanych. Realizuje ona następujące zadania:

- kondycjonowanie oraz konwersja analog-cyfra analogowych sygnałów pomiarowych
- wykonanie obliczeń algorytmów regulacji, w skład których wchodzi kontrola napięć kondensatorów w komórkach, prądów ramion, prądu pobieranego przez przekształtnik MMC, a także wyjściowych prądów oraz napięć
- wygenerowanie sygnałów PWM dla przekształtnika MMC oraz sygnału sterującego łącznikami wejściowego mostka H
- zabezpieczenia układu silnopiętowego w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości prądów lub napięć oraz utraty komunikacji z mikrokontrolerem
- obsługa styczników oraz wentylatorów

Do głównych elementów elektronicznej platformy sterującej należą dwa mikrokontrolery TMS320F28379D oznaczone na potrzeby publikacji DSC1 oraz DSC2. Mikrokontrolery są w postaci kart F28379D wykonanych przez firmę Texas Instruments i posiadają możliwość przetwarzania do 20 sygnałów analogowych na sygnały cyfrowe oraz wygenerowania 24 sygnałów PWM każdy. Ponieważ liczba przetwarzanych sygnałów jest większa od możliwości jednego kontrolera, konwersja analogowo-cyfrowa realizowana jest przez oba mikrokontrolery a następnie wartości odczytywane przez DSC2 są przekazywane do DSC1. DSC1 realizuje obliczenia dla układów regulacji oraz na ich podstawie generuje sygnały PWM dla przekształtnika MMC. Okres cyklu dla konwersji analog-cyfra, przekazania danych oraz obliczeń dla układu regulacji (T_{DSP}) wynosi 100 μs i jest dziesięć razy większy od okresu przełączeń tranzystorów przekształtnika MMC. (T_{PWM}). Na koniec każdego cyklu uaktualniane są rejestry PWM. Przebieg cyklu dla konwersji analogowo-cyfrowej,

regulacji i modulacji przedstawiono na Rys.4. DSC2 generuje natomiast sygnały bramkowe dla wejściowego mostka H.

Prądy oraz napięcia mierzone są przez przetworniki pomiarowe, których wyjściowy sygnał ma charakter prądowy. Ponieważ przetworniki analog-cyfra zastosowanych mikrokontrolerów wymagają sygnału napięciowego w zakresie 0 - 3 V, konieczna jest konwersja sygnałów prądowych na napięciowe, która jest realizowana przez interfejs kondycjonowania sygnałów analogowych. Interfejs ten stanowi jedną z płyt platformy sterującej.



Rys.4. Przebieg cyklu dla konwersji analogowo-cyfrowej, regulacji i modulacji

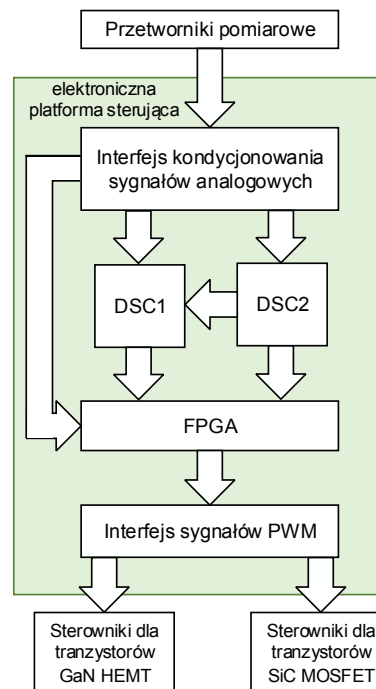
Zawiera on również filtry przeciw zakłóceń oraz komparatory stosowane w celu realizacji zabezpieczeń układu silnopięradowego.

Generowane przez mikrokontrolery sygnały sterujące pracą tranzystorów podawane są za pośrednictwem układu FPGA na interfejs sygnałów PWM, w którym poziomy sygnałów dostosowywane są do wymaganych przez sterowniki bramkowe wartości 0 – 5 V.

Z uwagi na złożoność systemu, duża uwaga poświęcona jest realizacji zabezpieczeń, które działają niezależnie od sterowania zaimplementowanego na mikrokontrolerach. Zabezpieczenia są zrealizowane w układzie FPGA i polegają na ustawieniu sygnałów PWM w stanie niskim w przypadku przekroczenia zdefiniowanych poziomów dla analogowych sygnałów pomiarowych lub utraty komunikacji z mikrokontrolerem. Do porównywania mierzonych prądów i napięć z maksymalnymi dopuszczalnymi poziomami wykorzystane są komparatory znajdujące się na płycie interfejsu kondycjonowania sygnałów analogowych. Bardziej szczegółowy opis realizacji zabezpieczeń przedstawiono w [8]. Uproszczony schemat blokowy obrazujący przekazywanie danych pomiędzy poszczególnymi elementami układu pokazano na Rys.5. Współpracujące ze sobą płyty ułożone są w formę stosu co przedstawiono na Rys.6.

Obwód silnopięradowy

Istotną rolę przy projektowaniu przekształtnika MMC stanowi dobór odpowiednich wartości dla indukcyjności ramion i pojemności w komórkach. Dławiki powinny być wymiarowane w celu osiągnięcia dopuszczalnego poziomu tętnień prądów ramion. Wartość indukcyjności została dobrana na podstawie symulacji numerycznych, tak aby poziom amplitudy tętnień nie przekraczał 5% prądu znamionowego i wynosi 0.5 mH. Innym sposobem na zmniejszenie tętnień prądów ramion jest zwiększenie częstotliwości przełączeń lub liczby komórek w ramionach. Pojemność kondensatorów w komórkach jest wybierana aby ograniczyć tętnienia napięć $u_{C_{xyz}}$ („x” oznacza ramię górne lub dolne, „y” to numer gałęzi, natomiast „z” to indeks komórki) występujące w stanach ustalonych, a także zmiany wartości napięć w stanach przejściowych w wyniku nagłego załączania/wyłączania odbiornika.



Rys.5. Schemat obrazujący przekazywanie danych pomiędzy elementami układu

Tętnienia napięć kondensatorów zależą od częstotliwości zarówno prądów i napięć wejściowych jak i wyjściowych. Problem redukcji tętnień wzrasta w przypadku układu generującego napięcie o niskiej częstotliwości [7]. W [5] przedstawiono układ regulacji przekształtnika zasilanego napięciem prostokątnym, który ogranicza wpływ niskiej częstotliwości napięcia wyjściowego na tętnienia i umożliwia pracę układu generującego napięcie stałe bez ograniczenia jego mocy. Zdecydowano się na wykorzystanie kondensatorów o sumarycznej pojemności 980 μF w każdej komórce. Z uwagi na wykorzystanie tranzystorów GaN (dla wybranych tranzystorów czas narastania napięcia wynosi 12,4 ns, a opadania 22 ns), w realizacji pojemności C_{xyz} wykorzystano oprócz kondensatorów elektrolitycznych również kondensatory suche, które charakteryzują się znacznie niższymi wartościami ESR (ang. Equivalent Series Resistance) i ESL (ang. Equivalent Series Inductance). Znamionowe parametry układu oraz wybrane komponenty przedstawiono w Tabeli 1.

Płyta z gniazdami rozszerzeń dla kart F28379D

 Płyta z układem FPGA
 Interfejs kondycjonowania sygnałów analogowych

 Interfejs sygnałów PWM

 Interfejs wejść/wyjść cyfrowych



Rys. 6. Wizualizacja 3D projektu elektronicznej platformy sterującej

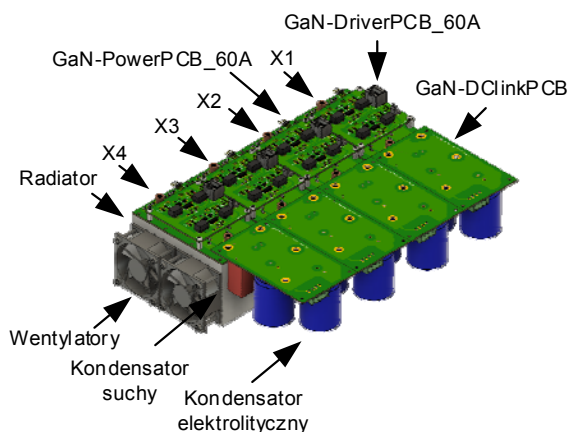
Obwód silnopięradowy ma budowę modułową składającą się z następujących płyt drukowanych:

– GaN-DriverPCB_60A – układ pełniący funkcję sterownika bramkowego dla tranzystorów GAN HEMT. Jedna płyta umożliwia sterowanie czterema tranzystorami na podstawie dwóch niezależnych sygnałów PWM, pozostałe dwa sygnały stanowią ich negację.

- GaN-PowerPCB_60A – obwód zawierający cztery tranzystory GAN HEMT.
- GaN-DClinkPCB – obwód zawierający równolegle połączone dwa kondensatory elektrolityczne oraz dwa kondensatory suche.

Tabela 1. Znamionowe parametry oraz wybrane elementy urządzenia.

	Opis	Producent	Wartość/ Oznaczenie
P	Moc znamionowa przekształtnika		6 kVA
C _{xyz}	Kondensatory w komórkach: równoległe połączenie dwóch kondensatorów suchych oraz dwóch elektrolitycznych. Sumaryczna pojemność: 980 uF	Kemet	ALC10A471E H500
		Wima	DCP4I052006 JD2KSSD
u _{HDC}	Napięcie wejściowe mostka H	-	650 V
U _{out}	Napięcie wyjściowe międzyfazowe	-	400 V
U _{Cxyz}	Napięcie kondensatorów w komórkach	-	350 V
-	Tranzystory GaN HEMT	GaN Systems	GS66516B-E01-MR
-	Sterownik dla tranzystorów GaN HEMT	Silicon Labs	SI8274AB4D-IS1
-	Sterownik bramkowy dla tranzystorów SiC MOSFET	CREE	CGD15FB45P 1
-	Moduł SiC MOSFET	CREE	CCS050M12C M2
-	Przetworniki pomiarowe prądu	LEM	LA 55-P
-	Przetworniki pomiarowe napięcia	LEM	LV 25-P



Rys. 7. Wizualizacja 3D projektu zawierającego komórki dla pojedynczej gałęzi przekształtnika MMC

Wizualizację połączenia płyt drukowanych dla jednej gałęzi przedstawiono na Rys. 7. W przedstawionym rozwiązaniu cztery komórki przekształtnika MMC wchodzące w skład jednej gałęzi umieszczono na jednym radiatorze. Terminale X1 i X4 połączone są z uzwojeniem transformatora i pozostałymi gałęziami, natomiast X2 i X3 z dławikami ramion.

Podsumowanie

W publikacji omówiono wybrane zagadnienia dotyczące przekształtnika MMC wykonanego z użyciem tranzystorów z azotku galu oraz zasilanego za pośrednictwem mostka H oraz transformatora separacyjnego. Opisana została elektroniczna platforma sterującą zawierającą dwa mikrokontrolery. Przedstawiono sposób realizacji sterowania i przepływu informacji wykorzystywanych do kontroli pracy układu. Zaprezentowano również jakie główne komponenty zostały wybrane dla układu silnopiętowego oraz pokazano wizualizację pojedynczej gałęzi przekształtnika.

Praca badawcza jest finansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu TECHMATSTRATEG1/3469224/NCBR/2017 „Technologie materiałów półprzewodnikowych dla elektroniki dużych mocy i wysokich częstotliwości”.

Autorzy: mgr inż. Andrzej Straś, mgr inż. Krzysztof Jackiewicz, mgr inż. Tomasz Miazga, mgr inż. Tomasz Bałkowiec, mgr inż. Michał Gierczyński, dr inż. Arkadiusz Kaszewski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: andrzej.stras@ee.pw.edu.pl

LITERATURA

- [1] Lesnicar A., Marquardt R., An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range, *IEEE Bologna PowerTech Conference*, Bologna, 2003.
- [2] Gemell B., Dorn J., Retzmann D., Soerangr D., Prospects of Multilevel VSC Technologies for Power Transmission, *PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, 2008.
- [3] Hagiwara M., Nishimura K., Akagi H., A Medium-Voltage Motor Drive With a Modular Multilevel PWM Inverter, *IEEE Transaction on Power Electronics*, nr.25, 1786-1799, 2010.
- [4] S. Kenzelmann, A. Rufer, D. Dujic, F. Canales, Y. Romulo de Novaes, „ Isolated DC/DC Structure Based on Modular Multilevel Converter”, *IEEE Transaction on Power Electronics*, nr. 30, 89-98, 2015.
- [5] Schnarrenberger M., Kammerer F., Gommeringer M., Kolb J., Braun M., Current Control and Energy Balancing of a Square-Wave Powered 1AC-3AC Modular Multilevel Converter, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal 2015.
- [6] Christe A., „Galvanically Isolated Modular Multilevel Converter”, rozprawa doktorska, *École polytechnique Fédérale de Lausanne*, 2018.
- [7] Kolb J., Optimale Betriebsführung des Modularen Multilevel-Umrichters als Antriebsumrichter für Drehstrommaschinen, rozprawa doktorska, *Karlsruher Institut für Technologie*, 2013.
- [8] Kaszewski A., Straś A., Gatecki A., Michalczuk M., Ufnalski B., Grzesiak L., Układ laboratoryjny energoelektronicznego interfejsu sieciowego AC/DC/DC dla magazynu energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr.94, 49-55, 2018.