



**1. Tytuł projektu:**

Przetwarzanie energii w obszarze średnich napięć z wykorzystaniem przyrządów mocy z węgla krzemu.

**2. Instytucja finansująca (nr umowy)**

Narodowe Centrum Nauki (UMO-2017/27/B/ST7/00970)

**3. Okres realizacji**

29.06.2018- 30.09.2021

**4. Dofinansowanie (w tym w 2021)**

947 000,00

**5. Partnerzy**

-

**6. Kierownik projektu**

dr hab. inż. Jacek Rąbkowski, prof. uczelni

**7. Zespół projektowy**

mgr inż. Grzegorz Wrona,

mgr inż. Przemysław Trochimiuk,

mgr inż. Rafał Kopacz,

inż. Krzysztof Frąc.

**8. Cel projektu (max. 1000 znaków)**

Głównym celem badawczym projektu jest przeanalizowanie i eksperymentalne przebadanie trzech różnych rozwiązań konstruowania przekształtników energoelektronicznych w obszarze średnich napięć z użyciem przyrządów mocy z węgla krzemu (SiC) oraz, finalnie, porównanie poszczególnych metod i określenie ich wad i zalet.



### 9. Streszczenie (max. 1 strona)

W ostatnich latach dzięki opanowaniu technologii wytwarzania przyrządy mocy z SiC pojawiają się w coraz to większej liczbie urządzeń energoelektronicznych niskiego napięcia powodując podniesienie ich sprawności energetycznej oraz obniżenie masy i rozmiarów. Szczególnie duże oczekiwania wiąże się z nową technologią w obszarze napięć średnich, czyli powyżej 1 kV, w związku z tym prowadzone są prace badawcze w trzech kierunkach. Przede wszystkim sięga się po tranzystory wysokonapięciowe, aktualnie istnieją przykłady tranzystorów SiC na napięcia przebicia do 27.5kV. Na tym etapie są one niezwykle kosztowne, a także nie są w stanie przewodzić zbyt dużych prądów. Dlatego prowadzone są prace nad łącznikami mocy bazującymi na tranzystorach niskonapięciowych połączonych szeregowo. Cena takich tranzystorów istotnie spadła w ostatnich latach, istnieją też dane świadczące o stabilności ich parametrów w czasie. Wreszcie trzecia możliwa koncepcja użycia tranzystorów SiC w obszarze średnich napięć to sięgnięcie po układy o topologii wielopoziomowej i elementy niskonapięciowe. Dotychczasowe wyniki badań pokazują, że elementy SiC pozwalają uzyskać układy energoelektroniczne o istotnie lepszych parametrach w odniesieniu do tych budowanych na bazie technologii krzemowej. Jednak nikt nie podjął próby porównania trzech wspomnianych koncepcji użycia nowych elementów w obszarze średnich napięć. Wykonanie takiego porównania jest zasadniczym celem naukowym tegoż projektu.

Oczywiście w zakresie średnich napięć można spotkać szereg różnych układów energoelektronicznych, dlatego też, w tym projekcie, jest przeprowadzane porównanie podstawowej struktury składowej tzw. energoelektronicznego bloku funkcjonalnego. Większość układów DC/DC, DC/AC czy AC/DC jest realizowana z użyciem takich właśnie bloków, w związku z tym, finalnie, będą opracowane i przebadane trzy energoelektroniczne bloki funkcjonalne na podstawie trzech różnych koncepcji i dokonanie ich analityczne, symulacyjne i eksperymentalnego porównanie. Maksymalne parametry badanych układów to napięcie stałe do 1,8 kV DC i prąd wyjściowy do 300 A. Wszystkie bloki funkcjonalne zostaną poddane testom laboratoryjnym, w szczególności pomiarom strat mocy przy pomocy metod elektrycznych i termicznych.

W wyniku realizacji projektu wiedza w zakresie półprzewodnikowych przyrządów mocy pracujących przy średnich napięciach zostanie istotnie poszerzona, w szczególności w obszarze projektowania obwodów mocy oraz sterowników bramkowych szybko przełączających tranzystorów z węgla krzemu. Porównanie i wskazanie najlepszej koncepcji użycia nowej technologii, w tym opracowanie trzech typów energoelektronicznych bloków funkcjonalnych przyczyni się do przyspieszenia jej wprowadzania do zastosowań praktycznych. Można będzie ją użyć w układach energoelektronicznych w trakcji elektrycznej, napędach elektrycznych czy tych współpracujących z systemem elektroenergetycznym. W efekcie nowe układy będą się cechować wyższą sprawnością energetyczną, co ograniczy zużycie energii elektrycznej a więc pośrednio ograniczy emisję gazów cieplarnianych. Ponadto przyrządy z węgla krzemu pozwolą podnieść częstotliwość pracy układów, co zmniejszy rozmiary elementów biernych (dławiki, transformatory) i w pozwoli zmniejszyć zużycie surowców naturalnych (miedź, aluminium). Wszystkie wymienione



efekty projektu będą miały zdecydowanie pozytywny wpływ na rozwój nauki oraz cywilizację i społeczeństwo.

### 10. Dotychczasowe osiągnięcia (max 2000 wyrazów)

W dotychczasowych pracach zrealizowano szereg zadań związanych z badaniami trzech różnych sposobów wykorzystania elementów mocy z węgla krzemu w obszarze średnich napięć. I tak kolejno badano zachowanie się modułu mocy z tranzystorami MOSFET średniego napięcia (3.3 kV / 450 A) w układzie półmostkowym z obciążeniem indukcyjnym, przy tym powstała oryginalna metoda emulacji strat mocy w gałęzi falownika napięcia pracującej z takim modułem mocy w zadanych warunkach. Prowadzone są także badania nad metodami szeregowego łączenia tranzystorów SiC MOSFET wewnątrz modułów mocy (1700V/325A), przy czym szczególny nacisk został położony na sterowniki bramkowych oraz obwody pomiarowe o wysokim napięciu izolacji. Ponadto, intensywnie analizowane są rozwiązania z topologiami wielopoziomowymi i elementami niskonapięciowymi w tym koncepcja przekształtnika z kondensatorami o zmiennym potencjale pracującego w trybie quasi-dwupoziomowym. Oryginalny układ przekształtnika prądu stałego o mocy znamionowej 30 kW osiągnął sprawność energetyczną powyżej 99%.

### 11. Publikacje

J. Rabkowski, R. Sobieski, M. Zdanowski, S. Piasecki, "3.3 kV/ 450 a SiC MOSFET Module - Modelling and Experiments", 20th European Conference on Power Electronics and Applications, 2018, pp. 1-10

P. Trochimiuk, R. Kopacz, J. Rabkowski, G. Wrona, Medium voltage power switch based on 1.7kV SiC MOSFETs connected in series inside power modules, 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe), Genova, 2019, pp. P.1-P.10.

P. Trochimiuk, Aktywna metoda kontroli rozkładu napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET w łączniku 3,3 kV, Krajowa Konferencja Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE 2019 (referat wyróżniony)

Radostaw Sobieski, Przemysław Trochimiuk, Hubert Skoneczny, Jacek Rąbkowski, Impact of a gate drive on performance of three-phase inverters based on 3.3 kV SiC MOSFETs, Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE) 2020

Rafał Kopacz, Przemysław Trochimiuk, Grzegorz Wrona, Jacek Rąbkowski, High-Frequency SiC-Based Medium Voltage Quasi-2-Level Flying Capacitor DC/DC Converter With Zero Voltage Switching", 2020 21st European Conference on Power Electronics and Applications, 1, pp. 1-10

Jacek Rąbkowski, Hubert Skoneczny, Rafał Kopacz, Przemysław Trochimiuk, Grzegorz Wrona A Simple Method to Validate Power Loss in Medium Voltage SiC MOSFETs and Schottky Diodes Operating in a Three-Phase Inverter", Energies, 13(18), pp. 1-18



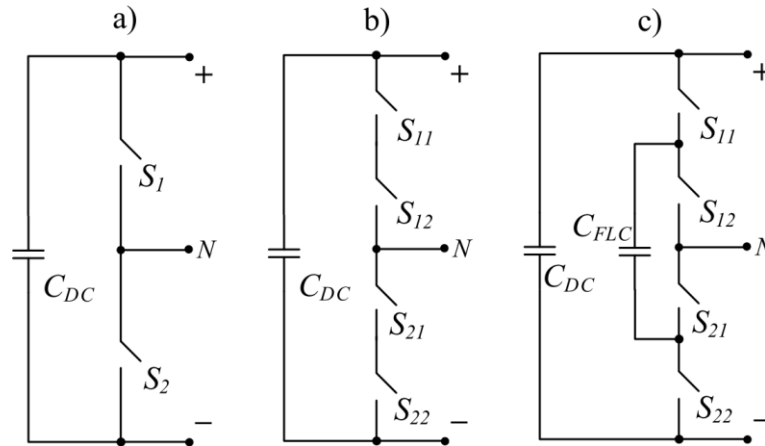
**Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej**

Przemysław Trochimiuk, Rafał Kopacz, Grzegorz Wrona, Jacek Rąbkowski, Active Voltage Balancing of Series-Connected 1.7 kV/325 A SiC MOSFETs Enabling Continuous Operation at Medium Voltage, IEEE Access, 2021, Volume: 9, pp. 8604 - 8614

**Politechnika  
Warszawska**

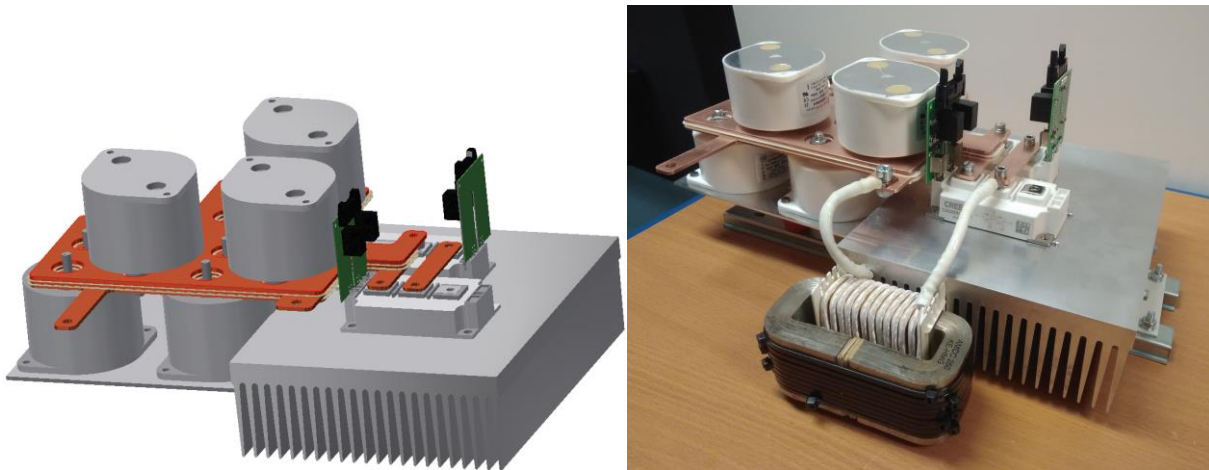


## 12. Materiały graficzne

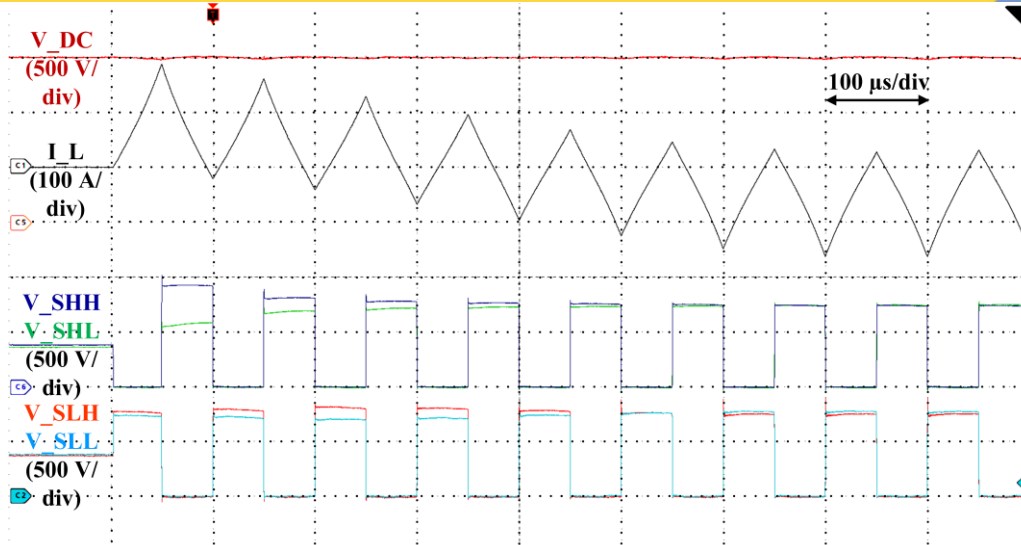


**Fig. 1/Rys. 1** Three possible approaches to construct power converters in medium voltage range: single high-voltage switches (a); series connection of transistors (b); multilevel topologies (c)/Trzy możliwe rozwiązania konstruowania przekształtników w zakresie średnich napięć: pojedyncze łączniki wysokonapięciowe (a); szeregowe łączenie tranzystorów (b); topologie wielopoziomowe (c).

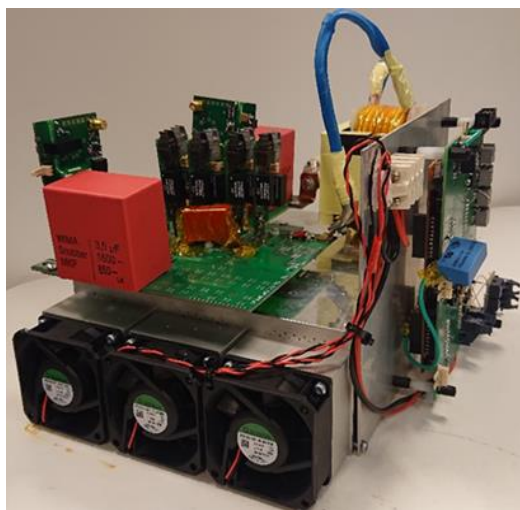
### Visualisations + Photos & Results / Wizualizacje + Zdjęcia i Wyniki



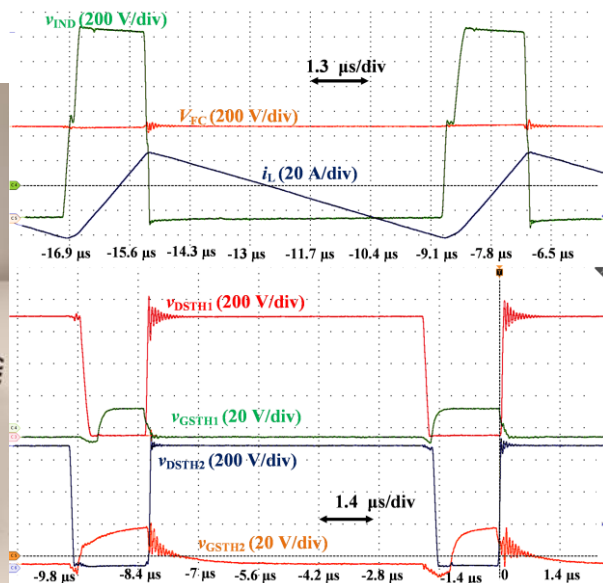
**Fig. 2/Rys. 2** Power circuit to test series-connection of SiC MOSFETs – system for double-pulse and half-bridge tests – visualisation and photo/Obwód mocy do testowania koncepcji z szeregowo połączonymi tranzystorami SiC MOSFET – układ do testów dwupulsowych oraz pracy półmostkowej (300 A/1.8 kV) – wizualizacja i zdjęcie.



**Fig. 3/Rys. 3** Experimental results for a system with active voltage balancing for a half-bridge circuit with an inductive load based on two pairs of series-connected SiC MOSFETs (325 A/1700V) /Wyniki eksperymentalne dla układu z aktywnym balansowaniem napięć dla obwodu półmostkowego z obciążeniem indukcyjnym złożonego z dwóch par szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET (325 A/1700 V)



a)



b)

**Fig. 4/Rys. 4** Medium voltage DCDC power converter in flying capacitor topology with TCM-Q2L control – laboratory prototype (a) and exemplary results (b) /Przekształtnik średniego napięcia typu FCC DCDC ze sterowaniem TCM-Q2L– układ laboratoryjny (a) oraz przykładowe wyniki (b)