

Andrzej MICHALSKI
Krzysztof ZYMMER

PRZYRZĄDY PÓŁPRZEWODNIKOWE Z WĘGLIKA KRZEMU W PRZEKSZTAŁTNIKACH ENERGOELEKTRONICZNYCH

STRESZCZENIE *W artykule przedstawiono informacje dotyczące zastosowań diod Schottky'ego wykonanych na bazie węgliku krzemu SiC w układach energoelektronicznych przekształcających energię elektryczną z wysoką częstotliwością. Omówiono także oferowane obecnie moduły tranzystorowo-diodowe wykonane w całości z węgliku krzemu. Omówiono zastosowania zestawów tranzystorowo-diodowych z diodami Schottky'ego SiC w przekształtnikach energoelektronicznych o częstotliwości łączeń 50÷200 kHz przeznaczonych dla grzejnictwa indukcyjnego. Przedstawiono wyniki porównawcze badań strat mocy w funkcji częstotliwości, generowanych w układzie przekształtnika z twardą komutacją prądu, przy zastosowaniu ultraszybkich diod krzemowych oraz diod Schottky'ego SiC.*

Słowa kluczowe: *węglik krzemu, półprzewodnikowe przyrządy mocy, diody Schottky'ego, przekształtniki energoelektroniczne.*

^{*)} Artykuł opracowany w ramach projektu rozwojowego pt. „Układy energoelektroniczne z przyrządami z węgliku krzemu”.

Andrzej MICHALSKI, Krzysztof ZYMMER
e-mail: npm@iel.waw.pl

Zakład Przekształtników Mocy,
Instytut Elektrotechniki

1. WSTĘP

W ostatnich latach wprowadzone zostały na rynek przyrządy półprzewodnikowe w formie diod i modułów tranzystorowo-diodowych wykonane na bazie węgla krzemu SiC o właściwościach istotnie korzystniejszych od odpowiednich przyrządów bazujących na krzemie. Dotyczy to zwłaszcza parametrów dynamicznych, szczególnie istotnych przy przekształcaniu energii elektrycznej z wysoką częstotliwością, a także dopuszczalnej temperatury pracy złącza półprzewodnikowego. Coraz powszechniejsze zastosowanie znajdują diody Schottky`ego SiC zarówno jako elementy wykonawcze w prostownikach, a przede wszystkim jako diody przeciwrównoległe w modułach tranzystorowo-diodowych z tranzystorami krzemowymi (IGBT, CoolMOS). Przykładowo firma Infineon oferuje dwutranzystorowy moduł IGBT Si (600 A – 1200 V) z przeciwrównoległymi diodami unipolarnymi SiC o prądzie 360 A i napięciu 1200 V. Z modułów o tych parametrach można zestawić układy przekształtnikowe mostkowe o mocy do kilkudziesięciu kW. Dostępne są też na rynku moduły tranzystorowo-diodowe (tranzystor MOSFET – SiC, dioda unipolarna – SiC) produkcji amerykańskiej firmy Cree jednak o niewielkim prądzie i napięciu 40 V [11]. Można więc w przyszłości liczyć na wzrost mocy modułów realizowanych w całości na bazie węgla krzemu. Obecnie amerykańska firma Powerex oferuje już sygnałne moduły tranzystorowo-diodowe, MOSFET – SiC z przeciwrównoległą diodą unipolarną SiC, o napięciu 1200 V i prądzie 100 A jednak o bardzo wysokiej cenie jednostkowej [15]. Aktualnie rozpowszechnione są już moduły energoelektroniczne z tranzystorami krzemowymi i przeciwrównoległymi unipolarnymi diodami SiC, które znajdują zastosowanie przede wszystkim w układach przekształcających energię elektryczną z wysoką częstotliwością i o mocy rzędu od kilku do około kilkudziesięciu kW.

Typowymi zastosowaniami modułów tranzystorowych z diodami SiC są energoelektroniczne przekształtniki PFC (Power Factor Corection) zapewniające pobór mocy z sieci elektroenergetycznej przy współczynniku mocy zbliżonym do jedności, wysokoczęstotliwościowe przekształtniki przeznaczone do indukcyjnego nagrzewania detali metalowych w procesach lutowania i hartowania powierzchniowego, czy wysokosprawne układy energoelektroniczne służące do odbioru i zmiany parametrów energii elektrycznej odbieranej z ogniw fotowoltaicznych. Jak podają inni autorzy [4, 5] zajmujący się omawianą problematyką, przez zastosowanie przeciwrównoległych unipolarnych diod SiC w przekształtniku PFC o mocy kilku kilowatów, przekształcającego energię z częstotliwością 90 kHz, uzyskano zwiększenie sprawności procesu przekształcania energii o 4% w stosunku do tego samego rozwiązania z diodami krzemowymi.

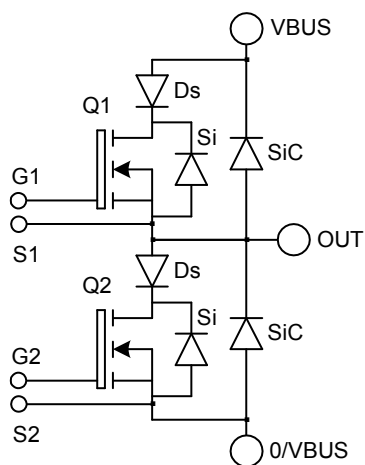
Dostępność przyrządów półprzewodnikowych z elementami na bazie węgliku krzemu daje nowe możliwości projektowania przekształtników o wyższych parametrach i aktualnym zagadnieniem staje się poznawanie właściwości układów przekształtnikowych z nowymi przyrządami SiC, szczególnie w zakresie pracy z wysoką częstotliwością. Należy podkreślić, że ze względu na wielość czynników wpływających na właściwości przekształtnika przy określonych parametrach przekształcania energii elektrycznej najbardziej wiarygodną metodą poznawczą są badania eksperymentalne odniesione do określonych zastosowań. Autorzy niniejszego artykułu prowadzili takie badania w aspekcie stosowania przyrządów z węgliku krzemu w przekształtnikach pracujących z częstotliwością 50-200 kHz przeznaczonych do zastosowań w grzejnictwie indukcyjnym. W przekształtnikach tego rodzaju zestawy tranzystorowo diodowe występują zarówno w układach impulsowej regulacji napięcia jak i w falownikach zasilających indukcyjne układy grzejne. Wybrane wyniki odpowiednich badań i analiz przedstawione zostały w niniejszej publikacji.

2. MODUŁY PÓŁPRZEWODNIKOWE Z PRYZRZĄDAMI Z WĘGLIKA KRZEMU

W początkowym okresie rozwoju technologii produkcji przyrządów półprzewodnikowych na bazie węgliku krzemu na rynku były dostępne jedynie diody Schottky'ego, najczęściej w obudowach TO220 i TO247, o obciążalności katalogowej nie przekraczającej 50 A. Racjonalne zastosowanie takich diod w układach przekształtnikowych wysokiej częstotliwości było ograniczone do określonych odmian topologii połączeń z tranzystorami typu IGBT i MOSFET komutującymi prąd roboczy.

W przypadku tranzystora MOSFET wytwarzanego na bazie krzemu, w stosowanym dotychczas procesie technologii produkcji złącza półprzewodnikowego tranzystora, w jego strukturze tworzy się dodatkowo automatycznie struktura diody połączona przeciwrównolegle do tranzystora o właściwościach dynamicznych w kierunku wstecznym charakterystycznych dla krzemu. W tym przypadku dołączenie przeciwrównolegle diody z węgliku krzemu do zacisków tranzystora MOSFET, nie daje zamierzonego efektu, bowiem w procesach komutacji prądu bierze udział tylko dioda krzemowa z uwagi na jej niższe napięcie przewodzenia.

Firma Microsemi [17] rozwiązała ten problem częściowo wprowadzając na rynek moduł półprzewodnikowy, dwutranzystorowy w konfiguracji półmostka, na napięcie 800 V i prąd 56 A, którego schemat połączeń ilustruje rysunek 1.



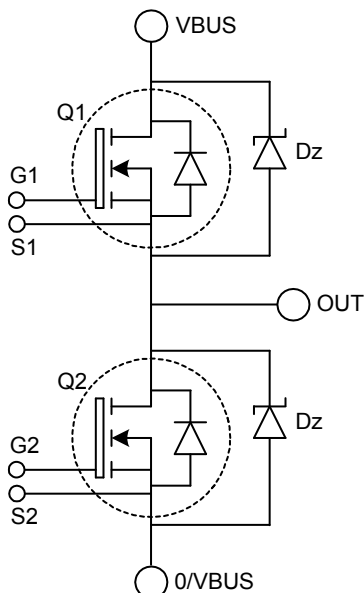
Rys. 1. Topologia modułu tranzystorowego Microsemi

Q1, Q2 – tranzystor CoolMOS na bazie krzemu, Si – dioda krzemowa zintegrowana technologicznie z tranzystorem, SiC – dioda na bazie węgla krzemu, Ds – dioda krzemowa Schottky’ego

W celu umożliwienia wykorzystania diody SiC w procesie komutacji prądu, szeregowo z każdym tranzystorem CoolMOS jest włączona dioda krzemowa Schottky’ego, charakteryzująca się relatywnie niskim napięciem przewodzenia, a jej zadaniem jest uniemożliwienie komutacji prądu przez diodę krzemową zawartą w strukturze złącza półprzewodnikowego tranzystora MOSFET. Komutację prądu zapewniają wówczas dodatkowe diody SiC ze znanymi walorami technicznymi.

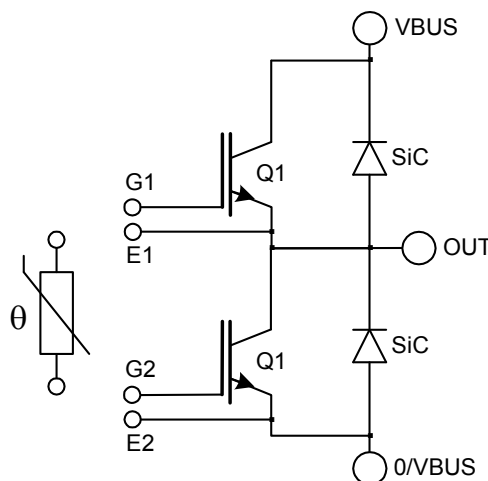
Najnowszym osiągnięciem w technologii modułów półprzewodnikowych może się poszczycić firma POWEREX [15] wprowadzając na rynek moduł półprzewodnikowy, o konfiguracji półmostka, z tranzystorami MOSFET 100 A, 1200 V wytworzonymi, na bazie węgla krzemu. Schemat modułu przedstawiono na rysunku 2. W jednej strukturze złącza półprzewodnikowego tranzystora MOSFET wykonanej na bazie węgla krze-

mu, oznaczonej na rysunku linią przerywaną, umiejscowiony jest zarówno tranzystor SiC jak i przeciwrównoległa dioda Schottky’ego SiC współpracująca



Rys. 2. Topologia modułu tranzystorowego POWEREX

Q1, Q2 – Tranzystor MOSFET na bazie węgla krzemu SiC, Dz – dioda krzemowa Zenera zabezpieczająca przed przepięciami



Rys. 3. Topologia modułu tranzystorowego Infineon

Q1, Q2 – Tranzystor IGBT, SiC – dioda na bazie węgla krzemu

z tranzystorem w procesie komutacji prądu. Wprowadzona do modułu krzemowa dioda Zenera ma na celu ochronę tranzystora i diody przed przepięciami, które mogą występować w układzie przekształtnikowym w warunkach komutacji.

W ostatnim okresie pojawiły się na rynku również moduły półprzewodnikowe zawierające dwa tranzystory IGBT z przyłączonymi przeciwrównolegle diodami z węgla krzemu dające możliwość realizacji przekształtników wysokiej częstotliwości również w topologii mostka jednofazowego i trójfazowego. Przykładowo firma Infineon [16] wprowadziła na rynek moduł typu FF600R12IS4F o parametrach $I_c = 600$ A, $V_{ces} = 1200$ V, którego schemat połączeń ilustruje rysunek 3. Moduł zawiera dwa tranzystory IGBT (Q1, Q2) i dwie diody z węgla krzemu SiC na prąd 360 A każda połączone przeciwrównolegle do tranzystorów oraz dodatkowo termistorowy czujnik temperatury dla kontroli warunków termicznych pracy złącz półprzewodnikowych.

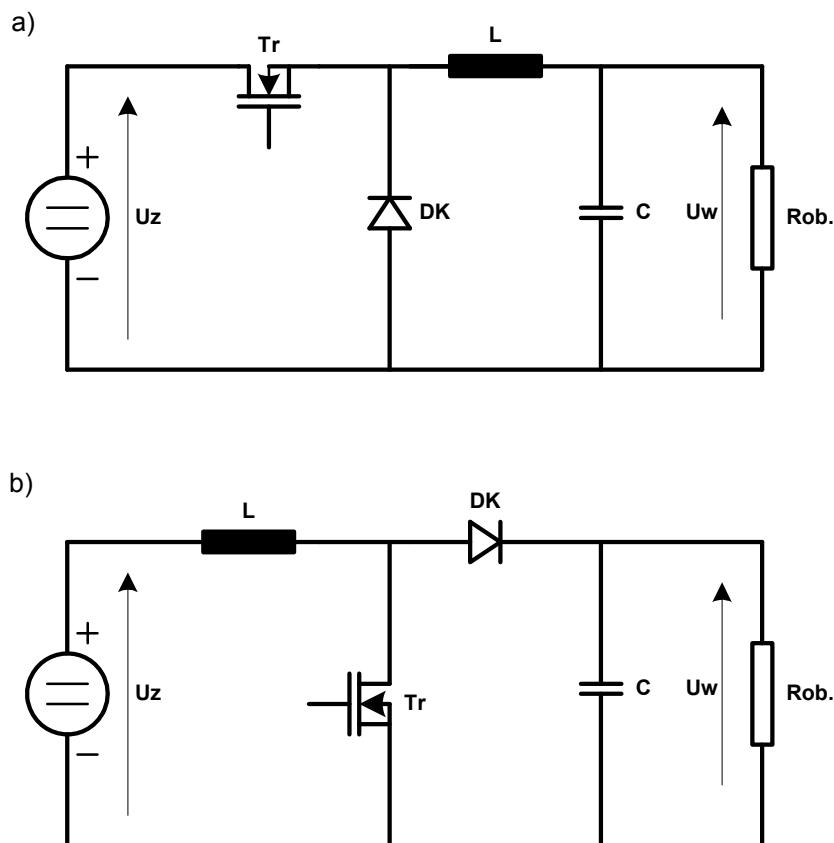
3. PRZEKSZTAŁTNIKI ENERGOELEKTRONICZNE Z DIODAMI SiC

Powszechnie znana jest duża różnorodność topologii układów energoelektronicznych, w których występuje komutacja prądu między tranzystorami i diodami lub też wyłącznie między diodami jak to ma miejsce w układach prostownikowych. Przejście diody ze stanu przewodzenia prądu do stanu zaporowego jest związane z dodatkowymi stratami mocy niezależnie od strat mocy wynikającymi z prądu i napięcia przewodzenia na zaciskach diody. W układach przekształtnikowych z komutacją prądu między tranzystorami i diodami, właściwości dynamiczne diody wywołują również dodatkowe straty mocy w tranzystorach [1, 2, 8, 9].

Opracowanie diod na bazie węgla krzemu pozwala na nową jakość rozwiązań układów energoelektronicznych o wysokiej sprawności energetycznej przy wyższej częstotliwości pracy dającej także możliwość miniaturyzacji podzespołów biernych. W specjalnych aplikacjach ważna jest możliwość pracy takich diod przy wyższych wartościach dopuszczalnej temperatury złącza np. 200°C.

Rysunek 4 przedstawia dwie typowe topologie układów przekształtnikowych DC/DC, w których ma miejsce twarda komutacja prądu między tranzystorami i diodami a właściwości dynamiczne diody odgrywają szczególną rolę w generowaniu dodatkowych strat mocy zarówno w tych diodach jak i w tranzystorach. Straty te są tym większe im jest wyższa częstotliwość przełączania tranzystorów. Zastosowanie w tych przekształtnikach diod Schottky'ego na bazie węgla krzemu pozwala na pracę z wyższą częstotliwością przekształcania energii

elektrycznej, przy utrzymaniu racjonalnego technicznie poziomu strat mocy w tranzystorze oraz diodzie i w dalszej konsekwencji daje możliwość miniaturyzacji podzespołów biernych przekształtnika.



Rys. 4. Przykładowe topologie przekształtników DC/DC

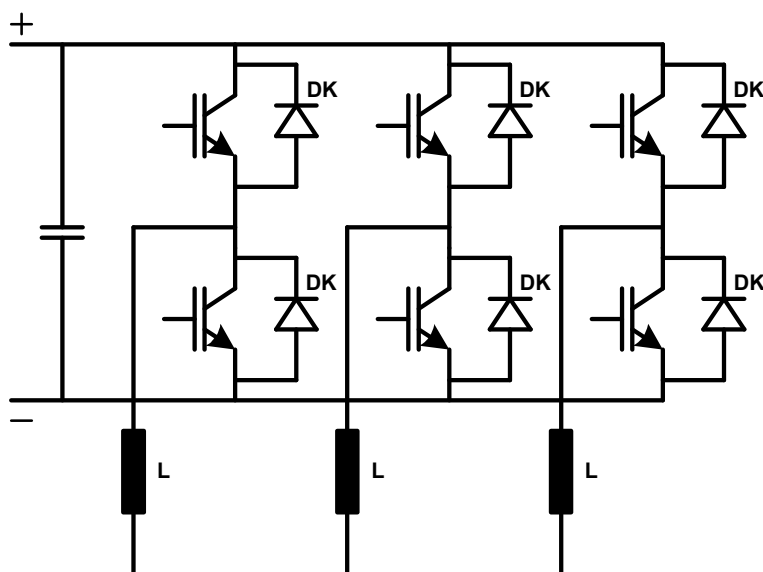
Tr – tranzystor kluczujący, DK – dioda obwodu komutacji prądu, U_z – napięcie zasilania przekształtnika, U_w – napięcie wyjściowe przekształtnika

Przekształtnik przedstawiony na rysunku 4a znajduje szerokie zastosowanie w aplikacjach, w których jest wymagana regulacja napięcia wyjściowego w zakresie od wartości napięcia zasilania do zera np. w układach napędowych z silnikami prądu stałego.

Natomiast przekształtnik przedstawiony na rysunku 4b znajduje zastosowanie w zasilaczach DC/DC gdzie jest wymagane podwyższanie napięcia prądu stałego np. w systemach fotowoltaicznych. Rozwiązanie takiego przekształtnika przy zastosowaniu diod SiC znalazło powszechne zastosowanie w zasilaczach AC/DC używanych w różnego rodzaju sprzęcie powszechnego użytku w tym również w sprzęcie komputerowym gdzie problem jakości energii, sprawności energetycznej, zmniejszenia zakłóceń radioelektrycznych oraz mi-

niaturyzacji urządzeń gra istotną rolę [12]. W tej topologii przekształtnika, przez stosowanie odpowiedniego algorytmu załączania i wyłączenia (PFC), uzyskuje się regulację napięcia wyjściowego przy poborze prądu z sieci energetycznej o kształcie zbliżonym do sinusoidalnego oraz przy współczynniku mocy równym jedności. Spotykane są również aplikacje wykorzystujące omawianą topologię w systemie trójfazowym PFC.

Rysunek 5 przedstawia typową topologię przekształtnika w układzie mostkowym w wersji trójfazowej, która może również występować w wersji jednofazowej. Obciążenie przekształtnika może stanowić przykładowo silnik trójfazowy lub transformator z układem prostownika po stronie wtórnej. W tej topologii przekształtnika, przy regulacji napięcia wyjściowego w systemie PWM, mogą występować stany pracy tranzystorów i diod z twardą komutacją prądu, co oczywiście wiąże się z generowaniem dodatkowych komutacyjnych strat mocy zarówno w tranzystorach jak i w diodach przeciwrównoległych.



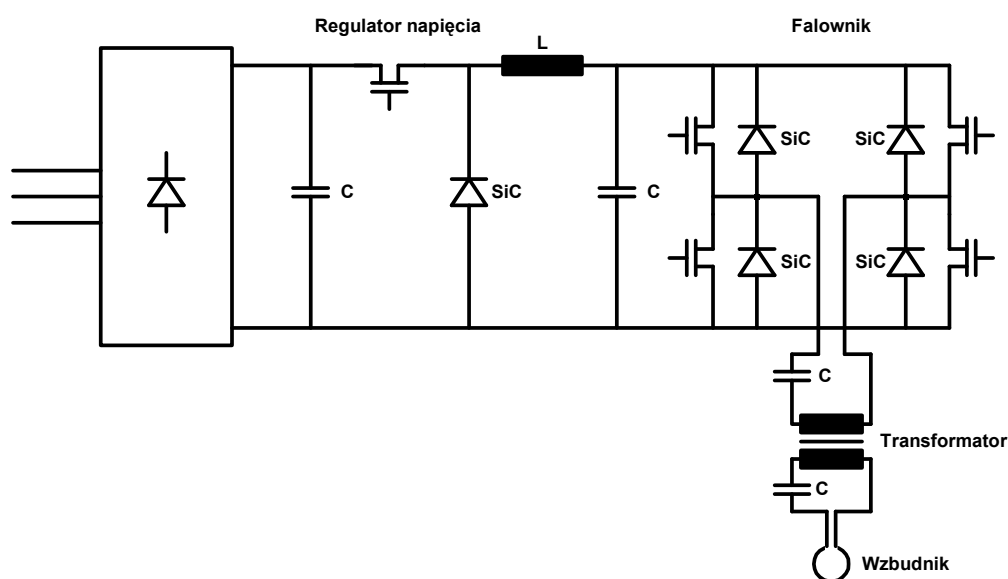
Rys. 5. Topologia przekształtnika w układzie trójfazowym mostkowym

DK – diody obwodu komutacji prądu obciążenia, L – indukcyjność obwodu obciążenia np. silnika indukcyjnego

W tego typu aplikacjach, szczególnie większej mocy, dotychczas mają zastosowanie bloki modułowe w konfiguracji półmostka, zawierające charakterystyczne gałęzie dwutranzystorowe IGBT lub MOSFET z dołączonymi diodami przeciwrównoległymi na bazie krzemu. Ogranicza to częstotliwość pracy tych modułów z uwagi na wzrost komutacyjnych strat mocy tak, że w praktycznych aplikacjach częstotliwość ta nie przekracza 50 kHz.

Problem może być rozwiązany przez zastosowanie przyrządów półprzewodnikowych nowej generacji np. bloków modułowych IGBT z diodami przeciwnoległymi na bazie węgliku krzemu SiC (rys. 3) lub też bloków modułowych z tranzystorami i diodami na bazie węgliku krzemu (rys. 2), jakie oferuje firma POWEREX. Wynikające z takiego rozwiązania korzyści to osiąganie wyższej sprawności energetycznej przekształtnika przy stosowaniu dotychczasowego poziomu częstotliwości komutacji prądu lub też możliwość stosowania wyższej częstotliwości komutacji przy zachowaniu dotychczasowego poziomu strat mocy i uzyskaniu możliwości miniaturyzacji podzespołów biernych.

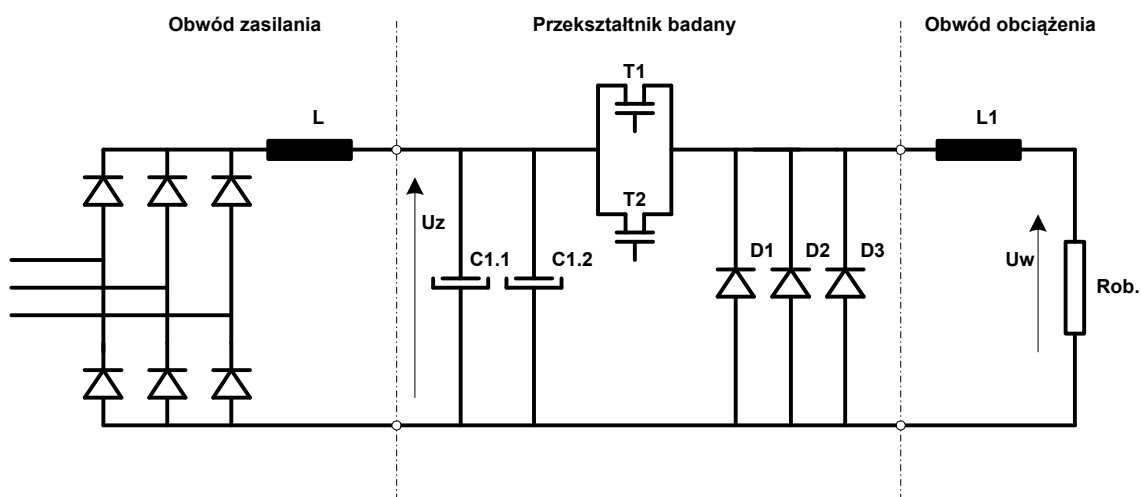
W Instytucie Elektrotechniki są prowadzone prace eksperymentalne w zakresie zastosowania przyrządów na bazie węgliku krzemu w przekształtnikach tranzystorowych, między innymi dla grzejnictwa indukcyjnego do pracy z częstotliwością $100 \div 200$ kHz. Przykładowo na rysunku 6 przedstawiono topologię takiego przekształtnika, w którym zastosowano bloki modułowe z tranzystorami i z diodami z węgliku krzemu w układzie falownika o konfiguracji mostka jednofazowego oraz tranzystory CoolMOS i diody SiC w regulatorze napięcia stałego zasilania falownika. Zastosowanie diody z węgliku krzemu w układzie regulatora napięcia dało możliwość komutacji prądu z wysoką częstotliwością i radykalne zmniejszenie gabarytów dławika wygładzającego L, natomiast wprowadzenie w falowniku bloków modułowych zawierających tranzystory i diody SiC pozwoliło uzyskać poprawną pracę z częstotliwością do 200 kHz. Było to niemożliwe do osiągnięcia w przypadku stosowania przyrządów wykonanych na bazie krzemu.



Rys. 6. Przykład topologii przekształtnika dla grzejnictwa indukcyjnego
SiC – dioda na bazie węgliku krzemu, C – kondensator

4. POMIARY STRAT MOCY

Przedstawione poniżej wyniki badań dają możliwość porównania walorów użytkowych diod Schottky'ego z węglika krzemu SiC i diod krzemowych Si w aspekcie strat mocy generowanych w przekształtniku DC/DC stanowiącym część składową eksperymentalnego zasilacza AC/DC. Schemat ideowy tego przekształtnika ilustruje rysunek 7. W badanym przekształtniku DC/DC, w celu uzyskania wymaganej obciążalności prądowej, zastosowano równoległe połączenie dwóch tranzystorów (T1, T2) w technologii CoolMOS, typu IPW60R045CP w obudowie TO247 firmy Infineon oraz równoległe połączenie trzech diod krzemowych (D1, D2, D3) typu DSEP15-06A firmy IXYS i alternatywnie diod Schottky'ego z węglika krzemu typu IDT16S60C firmy Infineon, w obu przypadkach w obudowie TO220. Tranzystory i diody były zamocowane do radiatora z chłodzeniem naturalnym a połączenia elektryczne wykonane w technice obwodów drukowanych zapewniających najmniejsze indukcyjności pasożytnicze. Badania cieplne przeprowadzano zawsze w tych samych warunkach napięcia zasilania $U_z = 300 \text{ V}$, przy współczynniku wysterowania tranzystorów $K = \frac{1}{2}$ ($U_w = 150 \text{ V}$) i przy prądzie obciążenia 20 A , przy zastosowaniu zarówno diod krzemowych jak i z węglika krzemu. Duża wartość indukcyjności w obwodzie obciążenia zapewniała przepływ prądu praktycznie bez pulsacji.



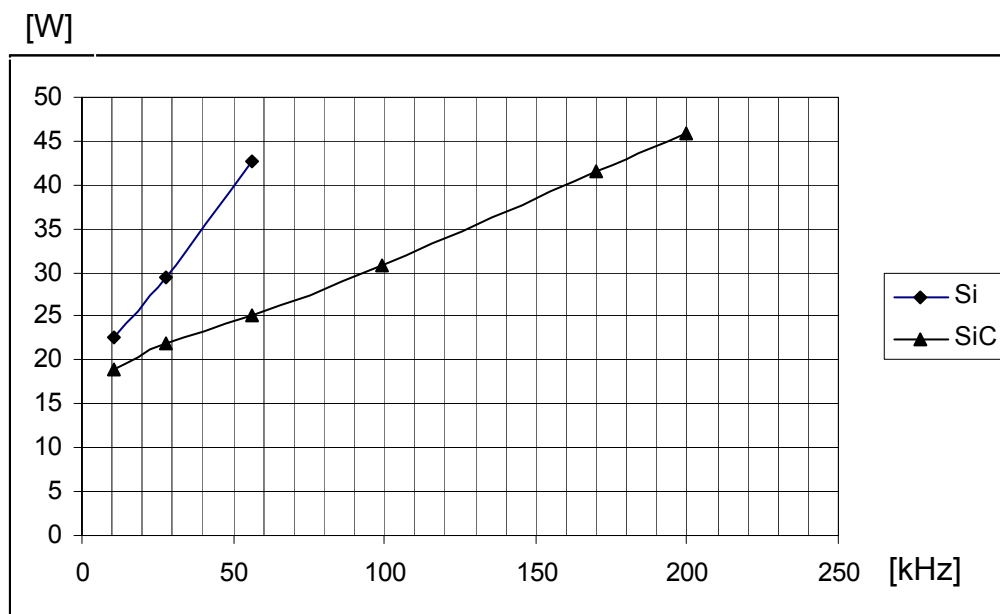
Rys. 7. Schemat eksperymentalnego przekształtnika AC/DC

T1, T2 – tranzystory kluczujące w badanym przekształtniku, D1, D2, D3 – diody komutujące prąd obciążenia w badanym przekształtniku

Zastosowano pośrednią metodę wyznaczania łącznych strat mocy w tranzystorach i diodach [8, 9] polegającą na wykorzystaniu wyznaczonej uprzednio

rezystancji cieplnej układu chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych przy ich obciążeniu prądem stałym. Znając wartość tej rezystancji cieplnej oraz wartości temperatury radiatora i otoczenia, pomierzone w ustalonych warunkach cieplnych dla danych przebiegów napięcia i prądu, wyznaczono łączne straty mocy w tranzystorach i diodach przekształtnika. Pomiary strat mocy przeprowadzono przy różnych częstotliwościach komutowania prądu przez tranzystory.

Na rysunku 8 przedstawiono w postaci wykresu wyniki pomiarów całkowitych strat mocy w [W] w badanym przekształtniku w funkcji częstotliwości komutacji prądu [kHz]. Przy częstotliwości komutacji 10 kHz straty mocy w przekształtniku z diodami Si lub z diodami SiC są zbliżone i mogą wynikać głównie z różnicy napięć przewodzenia. Natomiast ze wzrostem częstotliwości straty mocy w przekształtniku z diodami krzemowymi bardzo szybko rosną i przy częstotliwości 50 kHz osiągają wartość, która występuje w przypadku przekształtnika z diodami z węgla krzemu dopiero przy częstotliwości 160 kHz. Istotnie większe straty mocy w przekształtniku, w przypadku zastosowania diod krzemowych, wynikają z dużych wartości dynamicznego prądu wstecznego tych diod, wywołującego również dodatkowe straty mocy w tranzystorach.



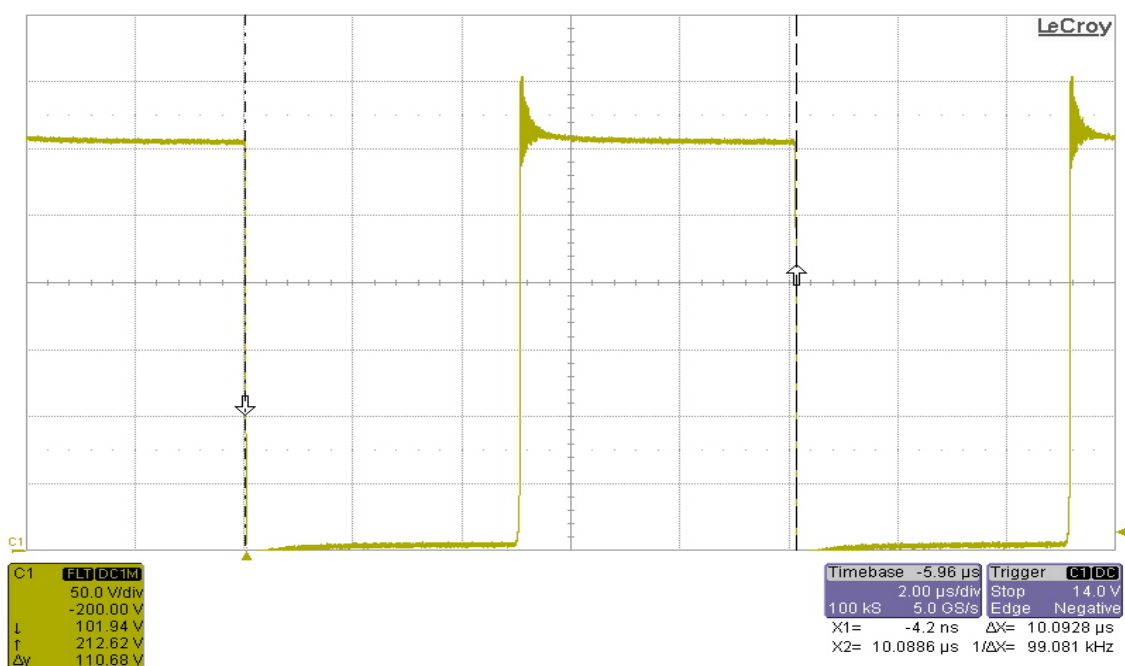
Rys. 8. Łączne straty mocy w [W] w badanym przekształtniku DC/DC w funkcji częstotliwości przełączania tranzystorów w [kHz]

Si – przy zastosowaniu diod krzemowych, SiC – przy zastosowaniu diod z węgla krzemu

Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w układzie regulatora napięcia stałego, mają charakter bardziej uniwersalny. Odnoszą się one także do jednofazowych i trójfazowych układów mostkowych, pracujących

w systemie PWM, w których również zachodzi analogiczny proces komutacji prądu. Straty energii w tranzystorze i diodzie przeciwrównoległej układu mostkowego, generowane w jednym cyklu komutacji są porównywalne ze stratą energii wydzieloną w jednym cyklu komutacji w regulatorze napięcia DC/DC. Dotyczy to tych samych wartości napięcia, prądu, du/dt i di/dt w obwodach porównywanych przekształtników.

Duże stromości dynamicznego prądu wstecznego diod generują na indukcyjnościach pasożytniczych połączeń elektrycznych przekształtnika przebiegi, które się odkładają na zaciskach tranzystora w procesie jego wyłączenia. W badanym przekształtniku z diodami z węgla krzemu chwilowa wartość napięcia na tranzystorze w procesie wyłączenia przewyższa o ok. 50 V napięcie zasilania (ok. 300 V) jak ilustruje oscylogram na rysunku 9. W tych samych warunkach pomiarowych w przekształtniku z diodami krzemowymi chwilowa wartość napięcia na tranzystorze przewyższa o ok. 100 V napięcie zasilania.



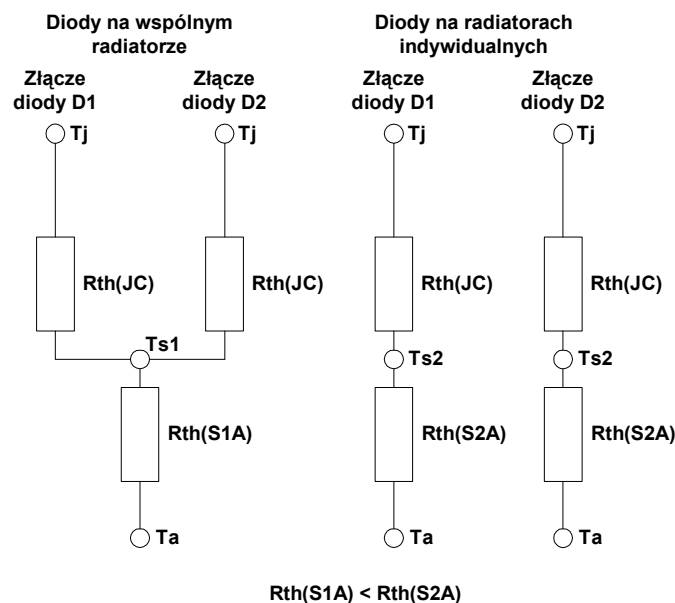
Rys. 9. Oscylogram napięcia na tranzystorze kluczującym w badanym przekształtniku przy zastosowaniu diod przeciwrównoległych Schottky'ego z węgla krzemu. Częstotliwość pracy przekształtnika (kluczowania tranzystorów) ok. 100 kHz
skala czasu – 2 μ s/dz., skala napięcia – 50 V/dz

5. PRACA RÓWNOLEGŁA DIOD Z WĘGLIKA KRZEMU

Przy równoległym łączeniu diod istotne znaczenie mają ich charakterystyki przewodzenia $V_F = f(I_F)$ a szczególnie ich zależność od temperatury

złącza półprzewodnikowego. W przypadku diod krzemowych, w miarę wzrostu temperatury złącza, napięcie przewodzenia na zaciskach diody odpowiednio maleje przy tej samej wartości prądu przewodzenia. Łączenie takich diod do pracy równoległej wymaga wyjątkowo dużej staranności przy doborze egzemplarzy o zbliżonych charakterystykach przewodzenia przy jednoczesnym zapewnieniu symetrii połączeń elektrycznych. Diody Schottky'ego na bazie węgla krzemu charakteryzują się ujemnym współczynnikiem temperaturowym napięcia przewodzenia jedynie w zakresie małych wartości prądu przewodzenia I_F , natomiast w zakresie większych wartości prądu przewodzenia, szczególnie prądów bliskich wartości znamionowej, napięcie przewodzenia rośnie w miarę wzrostu temperatury złącza ok. 20% [6]. Ta właściwość powoduje korzystne warunki pracy równoległej diod polegające na samoczynnym wyrównywaniu rozptywu prądów.

Przy projektowaniu przekształtników z równoległymi połączeniami diod występuje zagadnienie sposobu odprowadzania ciepła wynikającego ze strat mocy. Podstawowy problem stanowi to czy przyrządy mocować na wspólnym radiatorze czy też na radiatorach indywidualnych. W przypadku stosowania diod na bazie węgla krzemu korzystniejsze jest mocowanie na radiatorach indywidualnych, co pomaga wyjaśnić rysunek 10. Efektywność wyrównywania rozptywu prądu jest tym większa, im większa jest oporność cieplna między złączem każdej diody a wspólnym dla wszystkich diod połączonych równolegle



Rys. 10. Układy rezystancji cieplnej przy chłodzeniu dwóch diod pracujących równolegle dla różnych sposobów odprowadzania ciepła

T_j – temperatura złącza diody, T_s – temperatura obudowy diody i radiatora, T_a – temperatura otoczenia, $R_{th}(JC)$ – rezystancja cieplna złącze półprzewodnikowe – obudowa diody, $R_{th}(SA)$ – rezystancja cieplna radiator – otoczenie

ośrodkiem odbioru ciepła. W przypadku radiatorów indywidualnych wspólnym ośrodkiem odbioru ciepła jest powietrze (chłodzenie naturalne lub wymuszone) a w przypadku mocowania diod na wspólnym radiatorze ośrodkiem odbioru ciepła jest radiator, który ciepło skumulowane odprowadza do otoczenia. W rozwiązaniu konstrukcyjnym ze wspólnym radiatorem, przyrząd półprzewodnikowy, który nagrzewa się bardziej intensywnie będzie wpływał na zwiększanie temperatury innego przyrządu umieszczonego na tym samym radiatorze, lecz o mniejszej stracie mocy (przy założeniu takich samych wartości rezystancji cieplnej złącze diody – wspólny radiator). Powoduje to ograniczenie korzystnego oddziaływania dodatniego współczynnika cieplnego napięcia przewodzenia na równomierność rozplywu prądu elementów łączonych równolegle.

6. WNIOSKI

1. Analiza literatury wskazuje na coraz powszechniejsze stosowanie unipolarnych diod z węgla krzemu w urządzeniach energoelektronicznych przekształcających energię elektryczną w układach o wysokiej częstotliwości łączy. Diody Schottky'ego z węgla krzemu stosowane są jako elementy wykonawcze w prostownikach oraz jako elementy współpracujące z tranzystorami w procesie komutacji prądu w układach przekształtnikowych napięcia stałego i przemiennego. Dzięki wprowadzeniu tych elementów do przekształtników energoelektronicznych uzyskuje się wzrost sprawności energetycznej oraz możliwość miniaturyzacji elementów biernych przekształtnika a w efekcie zmniejszenie gabarytów całego urządzenia. Zależność ta staje się bardziej wyraźna przy wyższej częstotliwości łączy tranzystorów przekształtnika.

Oferowane są na rynku także moduły tranzystorowo-diodowe wykonane w całości na bazie węgla krzemu jednak o niskich wartościach parametrów napięciowo-prądowych (40 V i kilka amperów). Dostępne są już sygnałowe egzemplarze takich modułów o prądzie 100 A i napięciu 1200 V, lecz o bardzo wysokiej cenie jednostkowej (kilka tysięcy dolarów). Można więc prognozować, że w niezbyt odległej perspektywie czasowej, tego rodzaju tranzystorowo-diodowe moduły SiC o wymienionych wyżej wartościach parametrów pojawią się na rynku jako układy wytwarzane seryjnie.

2. Badania strat mocy przeprowadzone w Instytucie Elektrotechniki w układzie przekształtnikowym o wysokiej częstotliwości łączy wykazały istotną różnicę w stratach mocy generowanych łącznie w tranzystorach oraz w diodach współpracujących z nimi podczas komutacji prądu, przy zastosowaniu ultraszybkich diod krzemowych Si oraz diod na bazie węgla krzemu SiC. Podczas gdy przy

niskiej częstotliwości łączy straty mocy w obu przypadkach były zbliżone, to przy częstotliwości 50kHz łączne straty mocy w tranzystorach i diodach Si były o 60% większe niż w tym samym tranzystorach i diodach SiC. Różnica ta zwiększała się ze wzrostem częstotliwości łączy. Częstotliwość graniczna, jaką udało się uzyskać w układzie probierczym z diodami Si, w danych warunkach chłodzenia przy zachowaniu warunku dopuszczalnej temperatury złącza diod, wnosila 60 kHz. Odpowiednia częstotliwość dla tego przekształtnika, w tych samych warunkach chłodzenia z tymi samymi tranzystorami współpracującymi diodami SiC, wyniosła 200 kHz.

Inną korzyścią wynikającą ze stosowania diod z węgla krzemu było dwukrotne zmniejszenie wartości przepięć komutacyjnych na tranzystorach. Przeprowadzone badania wykazują ilościowo istotne korzyści wynikające ze stosowania diod z węgla krzemu, jako elementów współpracujących z tranzystorami w procesie komutacji prądu w przekształtnikach wysokiej częstotliwości, w odniesieniu do ultraszybkich diod krzemowych.

LITERATURA

1. Barlik R., Rąbkowski J., Nowak M.: Przyrządy półprzewodnikowe z węgla krzemu (SiC) i ich zastosowania w energoelektronice. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2006-11.
2. Barlik R., Rąbkowski J., Nowak M.: Układy energoelektroniczne z przyrządami z węgla krzemu – stan obecny i perspektywy. VI Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówka, 2007.
3. Bontemps S., Calmmels A., Round S.D., Kolar J.W.: Low profile power module combined with state of the art MOSFET switches and SiC diodes allows high frequency and very compact three-phase sinusoidal input rectifiers. *Proc. of the Conf. for Power Electronics, (PCIM'07), Nuremberg (Germany), 2007.*
4. Hancock J.M.: Novel SiC Diode Solves PFC Challenges. *Materiały firmy Infineon Technologies. Power Electronics Technology/June 2006. www.powerelectronics.com*
5. Hodge S. Jr.: SiC Schottky Diodes in Power Factor Correction. *Electronics Technology/August 2004. www.powerelectronics.com*
6. Konczakowska A., Szewczyk A., Kraśniewski J., Oleksy M.: Pomiary parametrów i charakterystyk statycznych, dynamicznych, szumowych i termicznych przyrządów z SiC. VI Krajowa Konferencja Elektroniki, Darłówka, 2007.
7. Lorenz L., Deboy G., Zverev I.: Matched Pair of CoolMOS Transistor With SiC-Schottky Diode. Advantages in Application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 5, Sept./Oct. 2005.
8. Michalski A., Zymmer K.: Badanie właściwości przyrządów energoelektronicznych z węgla krzemu w warunkach komutacji prądu z wysoką częstotliwością. *Prace Instytutu Elektrotechniki 2009, zeszyt 243.*
9. Michalski A., Zymmer K.: Właściwości diod Schottky'ego z węgla krzemu (SiC) w warunkach przekształcania energii z wysoką częstotliwością. *Elektronika*, 2010 (przekazany do druku)

10. Ranbir Singh, Richmond J.: SiC Power Schottky Diodes in Power-Factor Correction Circuits. Materiały firmy CREE, www.cree.com/power.
11. Richmond J.: Hard-Switched Silicon IGBTs?. Cut Switching Losses In Half With Silicon Carbide Schottky Diodes. Materiały firmy CREE.
12. Supratim Basu, Tore M. Undeland.: Diode Recovery Characteristics Considerations for Optimizing EMI Performance of Continuous Mode PFC Converters. EPE'05, Dresden, Germany.
13. Zarębski J., Górecki K.: A Method of the Thermal Resistance Measurements of Semiconductor Devices with P-N Junction. Measurement, Vol.41, No.3, 2008, pp. 259-265.
14. Zarębski J., Górecki K.: A New Measuring Method of the Thermal Resistance of Silicon P-N Diodes. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No. 6, 2007, pp. 2788-2794.
15. Materiały informacyjne firmy Powerex.
16. Materiały informacyjne firmy Infineon.
17. Materiały informacyjne firmy Mikrosemi.

Rękopis dostarczono dnia 25.11.2010 r.

SEMICONDUCTOR DEVICES ON THE BASE OF THE SILICON CARBIDE IN POWER CONVERTER

Andrzej MICHALSKI,
Krzysztof ZYMMER

SUMMARY *The paper presents information concerning the use of Schottky's diodes produced on the base of silicon carbide at high frequency converters. The transistor-diode SiC modules offered currently on the market have been discussed. The paper also presents the applications of the transistor-diode modules with SiC Schottky's diodes at the high frequency converters (50÷200 kHz) destined for metal induction heating. The comparable results of analyses of power losses versus frequency generated in a hard commutation converter with silicon or silicon carbide diodes are presented.*



Doc. dr hab. inż. Krzysztof ZYMMER ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej w 1962 r. i w tymże roku rozpoczął pracę w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Podczas swojej praktyki zawodowej zajmował się opracowaniem metod badań, układów pomiarowych oraz badaniami własności półprzewodnikowych przyrządów mocy w stałej współpracy z Z. E. „Lamina” z Piaseczna. Obszar zainteresowań autora stanowiły:

- wytrzymałość przeciążeniowa i zwarciova przyrządów energoelektronicznych,
- zjawiska dynamiczne w stanach przejściowych oraz obciążalność prądowa tych elementów przy podwyższonych częstotliwościach,
- stany zwarciove w przekształtnikach energoelektronicznych dużej mocy.

Od 1991 r. kieruje Zakładem Przekształtników Mocy w Instytucie Elektrotechniki. Jest autorem i współautorem ponad stu trzydziestu publikacji i referatów na krajowe i międzynarodowe konferencje oraz dwóch monografii.

Mgr inż. Andrzej MICHALSKI ukończył Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej w 1960 r. Od 1959 r. pracuje w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. W pracy zawodowej specjalizował się w zakresie:

- metod pomiarowych parametrów przyrządów półprzewodnikowych mocy,
- zastosowania przyrządów półprzewodnikowych mocy w przekształtnikach dla spawalnictwa, galwanotechniki, trakcji elektrycznej, urządzeń radarowych i generatorów ozonu,
- zastosowania przekształtników tyrystorowych i tranzystorowych w grzejnictwie indukcyjnym średniej i wysokiej częstotliwości.



Jest współautorem ponad osiemdziesięciu publikacji i referatów na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Jest współautorem licznych opracowań urządzeń energoelektronicznych wdrożonych do produkcji i eksploatacji, nagrodzonych w konkursach środowiska zawodowego SEP oraz w konkursach resortowych.