

**Tomasz Biskup, Henryk Kołodziej, Dariusz Paluszcak, Jacek Sontowski**  
**ENEL-PC, sp. z o.o., Przyszowice**  
**Jarosław Michalak, Politechnika Śląska, Gliwice**

## **ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA MATERIAŁÓW NANOKRYSTALICZNYCH W ENERGOELEKTRONICE**

### **ANALYSIES OF IMPLEMENTATION NANOCRYSTALIC MATERIALS IN POWER ELECTRONICS**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono analizę możliwości zastosowania nowoczesnych, nanokrystalicznych materiałów magnetycznych w przekształtnikach energoelektronicznych. Wyodrębniono dwa obszary zastosowań. Pierwszy z nich to elementy filtrów LCL pozwalających na kształtowanie prądu w układach prostowników aktywnych, z jednoczesną poprawą niekorzystnego wpływu takich przekształtników na sieć zasilającą. Drugi obszar to transformatory podwyższonej częstotliwości w układach przetwarzania energii, zwłaszcza ładowarkach akumulatorów dużej mocy. W obu tych przypadkach zastosowanie materiałów nanokrystalicznych mogłoby poprawić właściwości układów przez redukcję wymiarów, zmniejszenie strat czy hałasu. Zaproponowano także dwa stanowiska testowe pozwalające na weryfikację wyżej przedstawionej tezy.

**Abstract:** The paper presents an analyses of possible application the modern nanocomposite materials in the power electronics. The applications area was divided into the two subsystems. The first application is input LCL filters in active front end converters for energy recuperation. The second one is HF transformers for DC/DC converters, mainly in high power battery chargers. In the both application area the nanocomposite materials could improve its properties by mass and noise reduction or higher efficiency of energy conversion. In the end of the paper the two setups was proposed which can proof the thesis.

**Słowa kluczowe:** kompozyty nanokrystaliczne, dławiki i transformatory WCz, energoelektronika, przekształtniki tranzystorowe

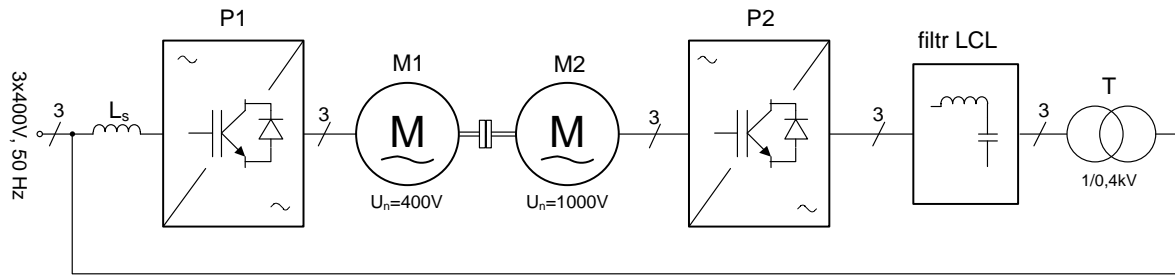
**Keywords:** nanocomposite materials, HF chokes and transformers, power electronics, transistor converters

## **1. Wprowadzenie**

Znaczący rozwój różnych obszarów energoelektroniki jest spowodowany, z jednej strony zapotrzebowaniem przemysłu na nowoczesne rozwiązania w zakresie przetwarzania energii, z drugiej strony zwiększającymi się stale możliwościami realizacyjnymi, wynikającymi z rozwoju elementów półprzewodnikowych. W zależności od mocy i napięcia zasilania nowe tranzystory IGBT, MOSFET, czy SiC MOSFET pozwalają na uzyskiwanie częstotliwości przełączania znacząco przekraczających 10 kHz. Dążenie do zwiększania częstotliwości przełączania wynika z możliwości lepszego kształtowania napięcia/prądu wyjściowego przekształtnika, redukcji słyszalnego hałasu i zmniejszenia wymiarów elementów pasywnych (dławików, transformatorów, kondensatorów). Należy jednak zaznaczyć, że dla rozwiązań o napięciu zasilania wyższym niż 1000 V wciąż istnieją silne ograniczenia dotyczące częstotli

wości przełączania tranzystorów (do poziomu pojedynczych kHz) związane z generowanymi w tranzystorach stratami.

Bardzo istotnym zagadnieniem w budowie przekształtników wykorzystujących elementy magnetyczne jest dobór materiału rdzenia. Spore nadzieje na nowe otwarcie w tym zakresie są pokładane w nowoczesnych materiałach nanokrystalicznych wykonanych na bazie różnych stopów żelaza z dodatkami kobaltu, niklu, cynku, boru, molibdenu i in. pierwiastków. Badania w tym zakresie są prowadzone od lat w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach [1]. W ramach projektu SeeMAG kontynuowane są badania zmierzające do wskazania obszarów elektrotechniki, gdzie zastosowanie wybranych materiałów byłoby najkorzystniejsze oraz praktyczne potwierdzenie takiej analizy.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska hamowni maszynowej z badanym filtrem LCL

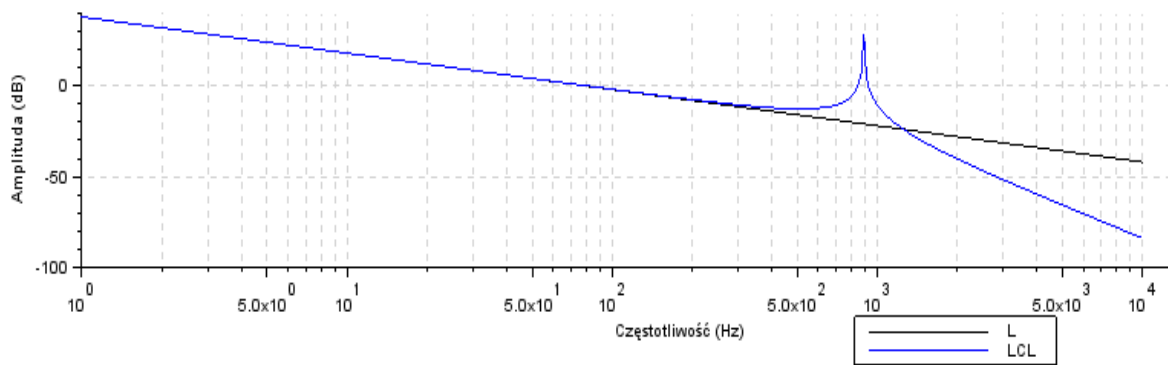
## 2. Analiza obszaru zastosowań

W pierwszym etapie prac przeanalizowano i wyodrębniono dwa typy przekształtników energoelektronicznych, gdzie korzyści z zastosowania materiałów nanokrystalicznych byłyby największe.

Pierwszy z nich to prostowniki aktywne, przekształtniki typu AC/DC pozwalające na regulację wartości średniej napięcia na wyjściu i jednocześnie na kształtowanie quasi-sinusoidalnego prądu pobieranego z sieci AC. Przekształtnik taki ma także właściwości regulacji mocy biernej pobieranej z sieci i znajduje zastosowanie tam, gdzie jest wymagany dwukierunkowy przepływ energii oraz długotrwały proces hamowania odzyskowego silnika. Typowym zastosowaniem tych przekształtników jest blok wyjściowy z układów generacji energii elektrycznej, zwłaszcza w energetyce odnawialnej [2]: elektrownie wiatrowe o zmiennej prędkości obrotowej, elektrownie wodne, elektrownie fotowoltaiczne. Niezbędnym elementem takiego przekształtnika jest dławik, a lepiej filtr LCL pozwalający na kształtowanie prądu sieci. Zmniejszenie indukcyjności dławika, przy danym napięciu zasilania, powoduje zwiększenie wartości tętnień prądu zgodnych z częstotliwością przełączania. Dla klasycznych materiałów magnetycznych stosowanych w dławikach (blachy transformatorowe), znaczące tętnienia prądu o częstotliwościach rzędu kiloherców są niedopuszczalne ze względu na zbyt duże straty w żelazie. W przypadku rozwiązań do poziomu napięcia 690 V możliwe jest ograniczanie tych tętnień poprzez stosowanie tranzystorów o dobrych parametrach dynamicznych pozwalających na uzyskanie wyższych częstotliwości przełączeń (kilkanaście kHz), jednak w przypadku rozwiązań na wyższe napięcia nie jest to możliwe ze względu na gorsze właściwości dynamiczne tranzystorów.

W wyniku przeprowadzonych symulacji używano parametry dławika filtra LCL pozwalającego na optymalną pracę z punktu widzenia parametrów jakości energii elektrycznej i jednocześnie redukujących wartość indukcyjności. Filtr LCL ma być jednym z elementów stanowiska badawczego, którego uproszczony schemat przedstawiono na rys. 1. Składa się ono z przemiennika częstotliwości P1 zasilającego silnik indukcyjny klatkowy M1. Silnik jest obciążony drugą maszyną M2, która za pomocą przemiennika P2 pozwala na zwrot energii do sieci zasilającej 400V przez filtr LCL i transformator dopasowujący T. Warto zwrócić uwagę, że w niniejszym układzie hamowni maszynowej przekształtnik P2 i filtr LCL jest zasilany z sieci 1 kV, bowiem w obszarze wyższych napięć zasilania problem doboru filtra LCL jest znaczący. Tu bowiem tranzystory IGBT nie pozwalają na podniesienie częstotliwości przełączania prostownika aktywnego, a co za tym idzie na zmniejszenie tętnień prądu. Przekształtnik współpracujący z siecią ma topologię falownika dwupoziomowego. Jego wyjściowe napięcia międzyfazowe stanowią impulsy prostokątne o modulowanej szerokości i poziomach równych napięciu DC lub zero. Filtr L lub filtr LCL są niezbędnym elementem niniejszego przekształtnika ograniczającym zmiany prądu sieci przy pojawiających się różnicach między wartościami chwilowymi napięcia sieci i przekształtnika. Dławik L dobiera się na założoną maksymalną wartość składowej zmiennej prądu związaną z przełączeniami tranzystorów, przy czym poziom tych tętnień zmienia się z wartością chwilową napięcia sieci. Przybliżoną wartość indukcyjności dławika zapewniającą utrzymanie poziomu tętnień określa zależność:

$$L_{F(MIN)} = \frac{U_{DC}}{8 \cdot \Delta I_{L\_PP} \cdot f_{PWM}} \quad (1)$$



Rys. 2. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa filtrów: L i LCL

W przypadku filtru LCL stosuje się dwa dławiki i dodatkowy kondensator, co pozwala na zwiększenie tłumienia filtru w zakresie wyższych częstotliwości. Częstotliwość rezonansową określa zależność:

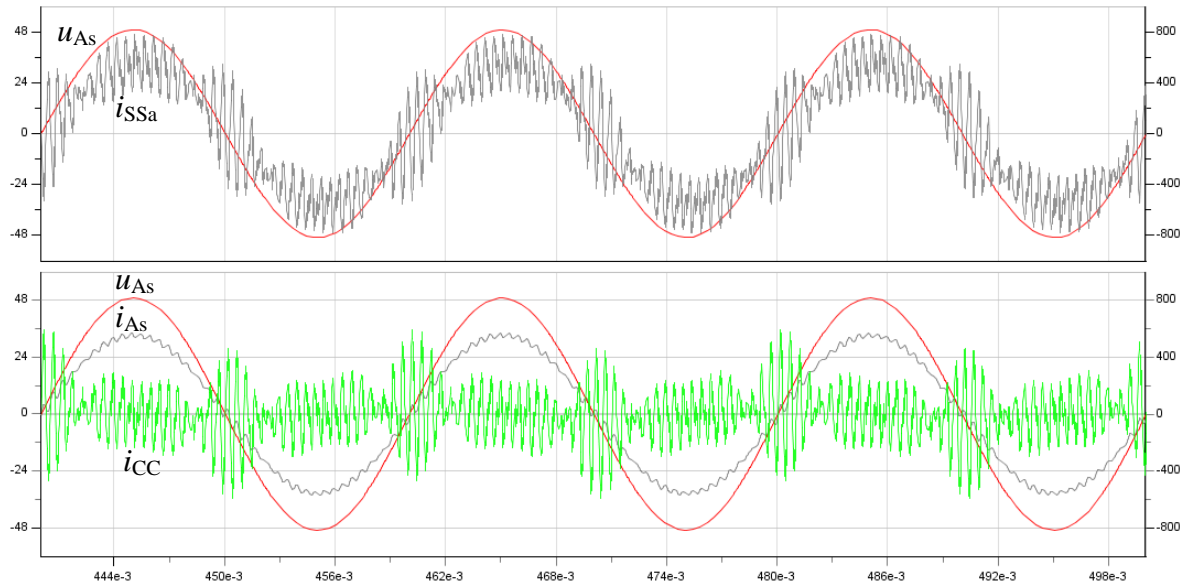
$$f_{REZ} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{C \cdot L_1 \cdot L_2}} \quad (2)$$

Jest ona dobierana w zakresie  $(2f_{SIECI} - 0,5f_{PWM})$ . Na rys. 2 pokazano porównanie charakterystyk amplitudowych dla filtrów: L i LCL o tej samej sumarycznej indukcyjności zastępczej dławików. Jak można zauważyć w zakresie częstotliwości sieciowej oba filtry zachowują się identycznie. W zakresie częstotliwości PWM filtr LCL charakteryzuje się większym tłumieniem, jednak w pobliżu częstotliwości rezonansowej występuje wzmocnienie amplitudy prądu, co jest zjawiskiem niepożądanym. Z tego względu w filtrach LCL należy odpowiednio dobrać regulatory, aby nie wzmacniać sygnałów określonej częstotliwości oraz stosuje się aktywne (za pomocą dodatkowych sprzężeń zwrotnych w układzie sterowania) lub pasywne (za pomocą dodatkowych rezystorów) tłumienie.

W przypadku przekształtnika na napięcie 1kV ograniczona jest częstotliwość przełączeń tranzystorów, co utrudnia odpowiedni dobór filtru LCL. Zauważa się wtedy zakres dla częstotliwości rezonansowych oraz zmniejsza się skuteczność tłumienia filtru. W przypadku filtrów LCL, szczególnie ze względu na generację strat, ważny jest odpowiedni dobór indukcyjności. Indukcyjność dławika po stronie przekształtnika ( $L_{F1}$ ) powinna być większa niż dławika po stronie sieci ( $L_{F2}$ ). W dławiku  $L_{F1}$  płyną prądy wynikające z przełączeń tranzystorów, które należy ograniczać. Dzięki filtracji w kondensatorach składowa tętniąca prądu w dławikach  $L_{F2}$

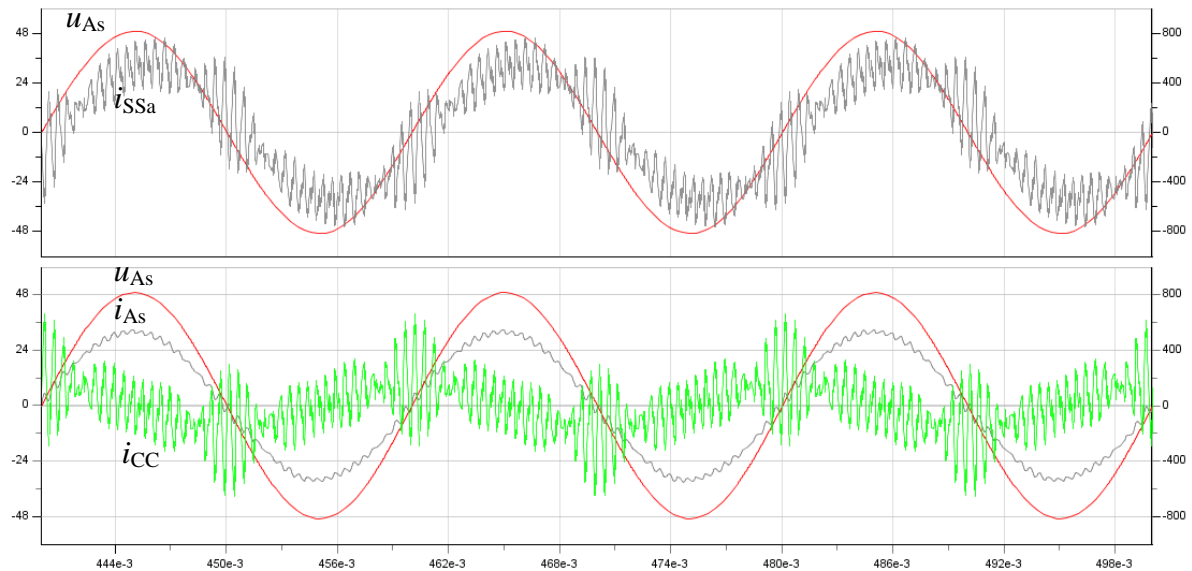
jest ograniczona. W rozwiązaniach na napięcie 1 kV dąży się do ograniczania gabarytów dławików filtrów ze względu na potrzebę ich kompaktowej budowy. Równocześnie w przekształtnikach na takie napięcie stosuje się zawory o dużym napięciu blokowania, które charakteryzują się większymi stratami przełączeń, co wymusza ograniczenie częstotliwości przełączeń do pojedynczych kHz.

W analizie przyjęto pracę przekształtnika przy napięciu 1 kV i częstotliwości przełączeń 2 kHz. Aby możliwe było na stanowisku z rys. 1 testowanie pracy dławików w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, dławik po stronie przekształtnika dobrano tak, aby THD jego prądu wynosiło 35 - 40 %. W dalszej części przedstawiono dobór filtru LCL dla dwóch przypadków – dla relatywnie dużej impedancji sieci (punkt instalacji stanowiska pomiarowego) i relatywnie małej impedancji (instalacje docelowe). W pierwszym przypadku przyjęto zasilanie z sieci o mocy zwarciowej 1 MVA przez transformator 400V/1000V o mocy 50 kVA. Impedancja zastępcza zasilania wynosi wtedy  $R_Z = 1 \Omega / L_Z = 4,6 \text{ mH}$ . Dla takich warunków indukcyjność filtru  $L_{F2}$  jest do pominięcia (przyjęto  $1 \mu\text{H}$ ), indukcyjność  $L_{F1}$  wynosi 2,4 mH a pojemność  $13 \mu\text{F}$  (połączenie kondensatorów w gwiazdę). Częstotliwość rezonansowa filtru wynosi 785 Hz. Przebiegi dla tak dobranego filtra przedstawia rys. 3, gdzie  $u_{As}$  oznacza napięcie sieci,  $i_{SSa}$  prąd dławika po stronie przekształtnika  $L_{F1}$ ,  $i_{As}$  prąd sieci (dławika  $L_{F2}$ ), a  $i_{CC}$  prąd kondensatora  $C_F$ . THD prądu dławika  $L_{F1}$  wynosi 39,4 % (warunki znamionowe) i zawiera wysoką zawartość harmonicznych, natomiast po stronie sieci uzyskuje się THD prądu 4,7%.



Characteristics								
	avg	rms	THD	min	max	ripple	klirr	shape
iAs	-25.5513e-3	23.4888	46.8132e-3	-34.1991	34.0422	-919.2816	46.762e-3	110.9037e-9
uAs	-129.0418e-9	577.3527	32.3679e-9	-816.5	816.5	-4.4742e9	32.3679e-9	111.0721e-9
iSSa	-26.015e-3	25.1885	393.8339e-3	-46.4244	46.4558	-968.2311	366.4394e-3	110.3594e-9
ICC	463.7084e-6	10.4963	4.5211	-35.7524	35.5277	22.6355e3	976.4005e-3	129.0543e-9

Rys. 3. Przebiegi dla filtru LCL dla dużej impedancji sieci



Characteristics								
	avg	rms	THD	min	max	ripple	klirr	shape
iAs	28.5627e-3	22.6579	50.6183e-3	-33.0587	32.8653	793.2709	50.5535e-3	110.8972e-9
uAs	-129.0418e-9	577.3527	32.3679e-9	-816.5	816.5	-4.4742e9	32.3679e-9	111.0721e-9
iSSa	28.6258e-3	24.8226	343.8836e-3	-45.8541	45.72	867.1416	325.1925e-3	111.2085e-9
ICC	-63.134e-6	11.6231	1.2533	-39.1092	39.701	-184.1014e3	781.6793e-3	126.7213e-9

Rys. 4. Przebiegi dla filtru LCL dla małej impedancji sieci

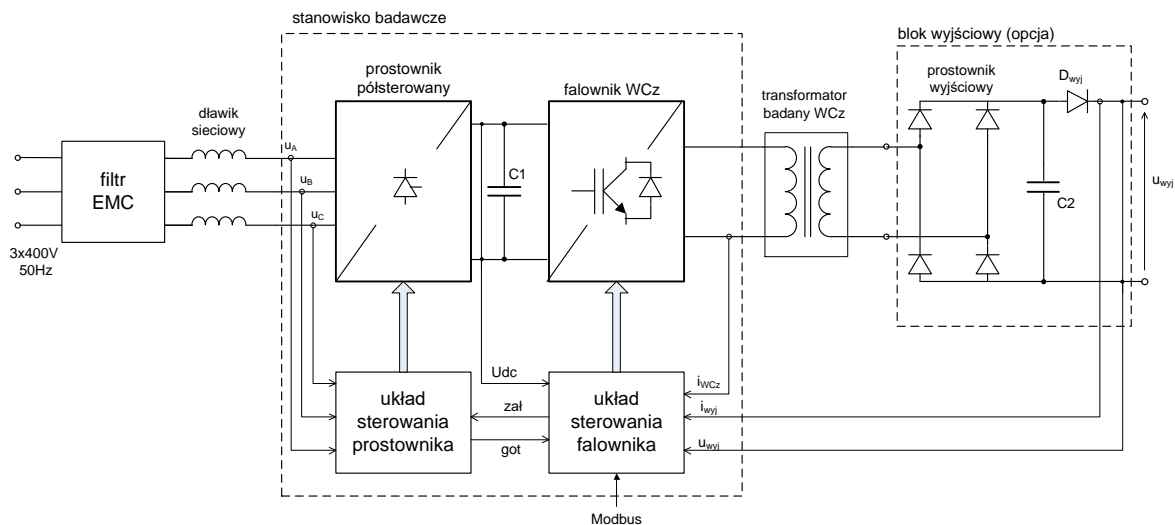
W założonych warunkach uzyskano filtr zapewniający dobre tłumienie i równocześnie umożliwiający testy dławika  $L_{F1}$  w sytuacjach zbliżonych do rzeczywistych. Dla porównania na rys. 4 pokazano przebiegi dla filtru LCL dobranego dla niewielkiej impedancji sieci zasilającej, odzwierciedlającej typowe warunki występujące przy 1000 V (dla mocy zwarciowej 20 MVA impedancja zastępcza sieci wynosi  $R_Z = 35\text{m}\Omega / L_Z = 113\ \mu\text{H}$ ). Dla takich warunków dobrany filtr LCL ma następujące parametry:  $L_{F1} = 2,4\ \text{mH}$ ,  $L_{F2} = 1,2\ \text{mH}$  a  $C_F = 40\ \mu\text{F}$  (kondensatory łączone w gwiazdę). Częstotliwość rezonansowa filtru LCL wynosi 630 Hz. W tym przypadku prąd dławika  $L_{F1}$  ma THD na poziomie 34,4 %, a prąd dławika  $L_{F2}$  na poziomie 5,1 %. Większa pojemność filtru powoduje pobór prądu biernego z sieci, który kompensowany jest prądem generowanym w przekształtniku sieciowym. Jak można zauważyć dla obu rozwiązań prąd sieci jest sinusoidalny, a kondensator filtru spełnia swoją funkcję filtracji wyższych harmonicznich zapewniając quasi-sinusoidalny prąd sieci AC.

Drugi obszar badawczy, dla wymienionych wyżej materiałów nanokrystalicznych, który należy uznać za obiecujący, to transformatory podwyższonej częstotliwości ( $f > 1\ \text{kHz}$ ). Przetwarzanie energii z wykorzystaniem takich transformatorów pozwala na uzyskanie nie tylko separacji galwanicznej, ale także odpowiednią redukcję wymiarów i masy transformatora. Zasadniczym obszarem zastosowań są układy ładowania akumulatorów, odnawialne źródła energii, inne zastosowania technologiczne źródła napięcia/prądu DC lub prądu tętniącego o dużej mocy. Klasycznym przykładem zastosowań technologicznych są zgrzewarki inwertorowe. Aktualnie w ofercie głównych producentów są przekształtniki i transformatory dopasowujące o częstotliwości 1 kHz [3]. Widać jednak tendencje do szukania rozwiązań o wyższych częstotliwościach przetwarzania np. 10 kHz. Ten dziesięciokrotny wzrost częstotliwości pozwala nie tylko na znaczną redukcję wymiarów i masy transformatora zgrzewalniczego, ale także na odpowiednie zwiększenie dynamiki procesu zgrzewania, lepsze właściwości regulacyjne i opanowanie zjawisk niekorzystnych dla procesu zgrzewania (np. ekspulsję) [4]. Osiągnięcie takiej częstotliwości pracy

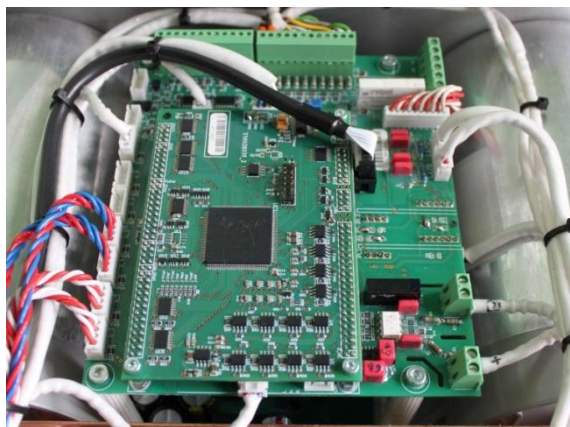
stwarza zasadniczy problem dla konstrukcji transformatora, biorąc pod uwagę, że prądy wyjściowe mogą osiągać wartości na poziomie 10 kA i więcej, przy odpowiednio wysokiej częstotliwości tego prądu (10 kHz). Z drugiej strony wzrost częstotliwości pracy falownika zgrzewarki nie wymaga zasadniczych zmian w jego konstrukcji, oprócz oczywiście modyfikacji programu.

Biorąc pod uwagę aktualne trendy światowe uznano, że właściwym obiektem testowym, jako drugie stanowisko badawcze, będzie przekształtnik z jednofazowym falownikiem napięcia. Przyjęto, że wystarczający zakres częstotliwości pracy falownika to 1–12 kHz, przy mocy maksymalnej 100 kW. Przekształtnik będzie miał klasyczną strukturę: prostownik, pojemnościowy obwód napięcia stałego oraz 1-fazowy mostkowy falownik napięcia.

Schemat blokowy stanowiska został przedstawiony na rys. 5. Poza wymienionymi wcześniej blokami system będzie wyposażony, od strony sieci zasilającej 400V/50Hz, w filtr EMC i dławik sieciowy, które poprawiają właściwości kompatybilności elektromagnetycznej. Na wyjściu możliwe będzie dołączanie transformatorów WCz o różnych konstrukcjach do szyn wyjściowych stanowiska. Na rys. 5 pokazano też przykładowy zestaw obciążenia pełniący funkcję ładowarki akumulatorowej, o napięciu wyjściowym DC  $u_{\text{wyj}}$  zmiennym w zakresie od 0 -  $U_{\text{wyjmax}}$  zależnym od przekładni transformatora WCz. W takiej sytuacji diody prostownika wyjściowego muszą być diodami szybkimi dopasowanymi do częstotliwości pracy falownika np. 10 kHz. System jest wyposażony we wszystkie niezbędne elementy do zabezpieczenia przekształtnika oraz do sterowania i regulacji. Przykładowo do pracy jako ładowarka akumulatorowa wymagane są pomiary i regulacja prądu i napięcia wyjściowego DC, które zostały wyodrębnione jako dodatkowe wejścia układu sterowania. Do sterowania falownika przygotowany został sterownik mikroprocesorowy na bazie  $\mu\text{K}$  DSC TMS 320F28335 przedstawiony na rys. 6. Sterownik ten pełni funkcję podstawową dla typowych aplikacji i pozwala na pracę z zadanymi parametrami częstotliwości 1-12 kHz oraz regulację napięcia wyjściowego metodą modulacji szerokości pojedynczego impulsu PWM.



Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska z 1-fazowym falownikiem napięcia



Rys. 6. Zdjęcie sterownika falownika 1-fazowego

Zaimplementowano dwa algorytmy PWM o różnych właściwościach dynamiki komutacji prądu falownika i różnych właściwościach EMC w celach testowych. Sterownik umożliwia sterowanie lokalne (potencjometr, cyfrowe wejścia sterujące) lub zdalne z wykorzystaniem transmisji szeregowej i standardu MODBUS RTU lub ASCII.

Poza standardowym sterownikiem istnieje możliwość wymiany na specjalizowany (np. dla zgrzewarki inwertorowej), o szczególnie skonstruowanych torach pomiarowych (inne zakresy pomiarowe, duże wartości impulsów prądu DC itp.) ale o takim samym standardzie wyjść sterujących/zabezpieczeń do drzejców tranzystorowych itp. W sytuacjach wymagających pracy falownika, z obniżonym lub lekko podniesionym napięciem zasilania, możliwe jest dołączenie stanowiska do autotransformatora z separacją galwaniczną o mocy 80 kVA, które jest na wyposażeniu laboratorium firmy ENEL-PC.

Pozwala to na przebadanie elementów magnetycznych o innych znamionowych napięciach zasilania, niż wynikające ze standardowego napięcia DC w tym przekształtniku dla sieci zasilającej 3x400V

### 3. Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę możliwości zastosowania magnetycznych materiałów nanokrystalicznych w układach przekształtnikowych. Przyjęto do dalszych badań praktycznych dwie przykładowe struktury:

- prostownika aktywnego i filtra LCL,
- falownika 1-fazowego wraz z transformatorem WCz.

W pierwszym przypadku zastosowanie filtra LCL z rdzeniem wykonanym z materiału nanokrystalicznego, powinno pozwolić na dopuszczenie większych tętnień WCz w prądzie sieciowym i w ten sposób redukcję wymiarów filtra. W drugim przypadku transformator WCz w takim wykonaniu daje możliwość zwiększenie poziomu indukcji w rdzeniu w stosunku do stosowanych często materiałów ferrytowych. Zastosowanie przetwarzania energii przy częstotliwościach rzędu 10 kHz i większej pozwala także na redukcję wymiarów transformatora oraz zwiększenie dynamiki sterowania, a w ten sposób do polepszenia właściwości procesów technologicznych. W kolejnym etapie projektu zostaną zbudowane i uruchomione zaprojektowane stanowiska, stanowiąc platformę do dalszych badań przewidzianych w niniejszym projekcie.

#### 4. Literatura

- [1]. Szynowski J., Kolano R., Kolano-Burian A., Polak M.: Reduction of power losses in the tape-wound FeNiCuNbSiB nanocrystal line cores using interlaminar insulation, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, Iss. 4, Apr 2014.
- [2]. Kołodziej H., Paluszczak D., Michalak J.: Przekształtnik energoelektroniczny współpracujący z generatorem PMSG, przeznaczony do małych elektrowni wodnych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2014 (102).
- [3]. <https://www.harms-wende.de/produkte> {dostęp 10.02.2020}
- [4]. prac. zb. pod red. Mikno Z. : *Innowacyjne rozwiązania i właściwości wysokosprawnych zgrzewarek rezystancyjnych prądu stałego*, Instytut Spawalnictwa Gliwice, 2018.

#### Autorzy

dr inż. Tomasz Biskup, ENEL-PC sp. z o.o.  
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice  
e-mail: t.biskup@enel-pc.pl  
dr inż. Henryk Kołodziej, ENEL-PC sp. z o.o.  
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice  
e-mail: henryk.kolodziej@enel-pc.pl

mgr inż. Dariusz Paluszczak, ENEL-PC sp. z o.o. ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice  
e-mail: d.paluszczak@enel-pc.pl  
mgr inż. Jacek Sontowski, ENEL-PC sp. z o.o. ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice  
e-mail: j.sontowski@enel-pc.pl  
dr inż. Jarosław Michalak, Katedra Energoelektroniki Napędu Elektrycznego i Robotyki, Politechnika Śl., ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: jaroslaw.michalak@polsl.pl

#### Informacje dodatkowe

Artykuł prezentuje wyniki związane z realizowanym projektem finansowanym przez NCBiR w ramach Strategicznego programu badań naukowych „Nowoczesne technologie materiałowe” TECHMATSTRATEG 1 nr 347200/11/NCBR/2017 pt. *Opracowanie wysokowydajnej i bezodpadowej technologii wytwarzania nanokompozytów magnetycznie miękkich dla wysokoczęstotliwościowego przetwarzania dużych mocy.*