

# Stanowisko do badania elementów magnetycznych podwyższonej częstotliwości

Tomasz Biskup, Henryk Kołodziej, Mariusz Lorenc, Dariusz Paluszczak, Jacek Sontowski, Maciej Haltof

## 1. Wstęp

Transformatory, pomimo zasady działania niezmiennej od 1885 roku, nieustannie znajdują coraz to nowe zastosowania, które podyktowane są dynamicznym rozwojem przemysłu i potrzeb z nim związanych. Mowa tutaj zwłaszcza o obwodach elektroniki mocy i układach przekształtnikowych.

Wynalazek stworzony przez Otto Bláthy'ego, Miksa Dériego i Károla Zipernowsky'ego na przestrzeni lat znalazł zastosowanie wszędzie tam, gdzie konieczne jest wykorzystanie różnych wartości skutecznych napięć zasilających. Urządzenia te możemy znaleźć w sieciach przesyłowych, gdzie jednostki energetyczne charakteryzują się mocami powyżej kilkuset MVA i napięciami znamionowymi rzędu setek kV, tam gdzie pracują transformatory małej mocy w obwodach SELV i PELV.

O ile wartości napięć pierwotnych i wtórnych w uproszczeniu determinują budowę systemu izolacyjnego, a moc wyjściowa określa gabaryt jednostki, to w przypadku zmiany częstotliwości znamionowej i odejścia od typowej sieciowej 50 Hz/60 Hz, nie jest to już tak oczywiste. Częstotliwość znamionowa napięcia wejściowego transformatora ma decydujący wpływ na jego budowę oraz pasożytnicze zjawiska fizyczne, które w nim zachodzą. Podobnie jak w transformatorach, tak i w innych elementach magnetycznych, jak dławiki i filtry pasywne, częstotliwość składowej podstawowej prądu i dodatkowych składowych zmiennych ma ogromne znaczenie. Przyczynia się ona pośrednio do określenia sposobu wykonania, w tym doboru materiału rdzenia czy geometrii, rozmieszczenia i materiału uzwojeń. Konstrukcja ma na celu ograniczenie strat mocy, tak aby urządzenie zostało zbilansowane termicznie, oraz ograniczenie pojemności pasożytniczych, tak aby redukować zakłócenia przewodzone EMI itd. Należy pamiętać, że w ciągłym procesie przemagnesowywania rdzenia transformatora straty histerezy są funkcją wykładniczą częstotliwości. Z kolei straty wiropądowe w laminowanych wzajemnie blachach, będące pochodną zjawiska indukcji elektromagnetycznej, są zależne od kwadratu tej częstotliwości. Ze wzrostem częstotliwości zmianie ulega również głębokość dyfuzji magnetycznej. Zjawisko naskórkowości uwydatnia się wraz ze wzrostem częstotliwości, czego rezultatem jest ograniczony aktywny przekrój poprzeczny uzwojenia i proporcjonalny wzrost strat czynnych. Efekty naskórkowości i zbliżenia można minimalizować m.in. poprzez stosowanie wiązek drutów wzajemnie izolowanych, tzw. przewodów z licy [1]. Ilość przewodów we wiązce, czasami setki drobnych przewodów, oraz ich przekrój są dobierane indywidualnie względem oczekiwanych obciążeń i częstotliwości.

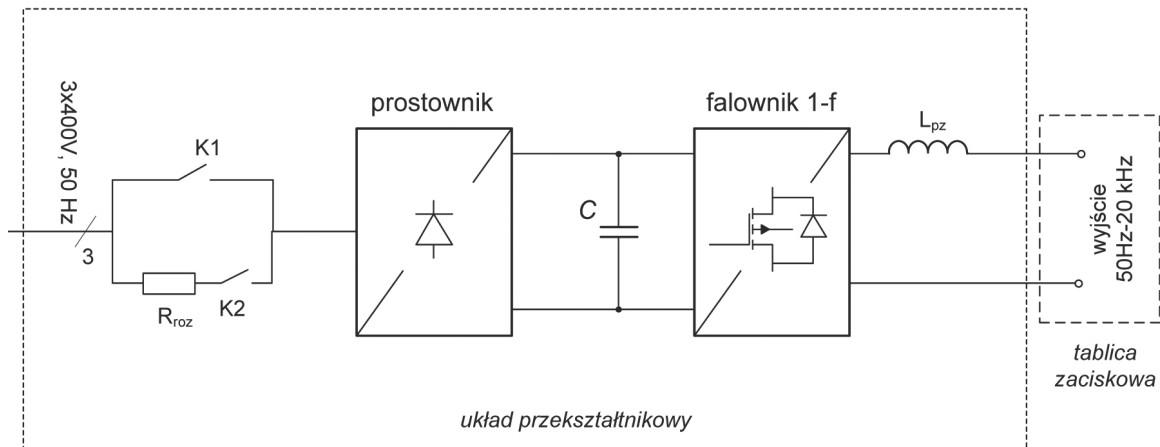
**Streszczenie:** W artykule przedstawiono system energoelektroniczny pozwalający na badania transformatorów i dławików średniej częstotliwości przeznaczonych do systemów przetwarzania energii z wykorzystaniem przekształtników energoelektronicznych. Przedmiotem badań mają być właściwości i parametry transformatorów oraz dławików, których rdzeń został zbudowany w oparciu o nowoczesne materiały magnetyczne, w tym nanokrystaliczne. Stanowisko umożliwi regulację wartości skutecznej i częstotliwości napięcia wyjściowego w zakresie do 20 kHz i amplitudzie prądu wyjściowego do 200 A.

**Słowa kluczowe:** przetwarzanie energii elektrycznej, falownik tranzystorowy, transformatory i dławiki WCz

Kolejnym, jednym z wielu aspektów budowy transformatorów średniej częstotliwości jest celowość ograniczania strumienia rozproszenia pomiędzy stroną pierwotną i wtórną transformatora. Przenikający uzwojenia strumień rozproszenia indukuje niekorzystne wtórne prądy wirowe. Aby niwelować to zjawisko i poprawić współczynnik sprzężenia magnetycznego, projektanci stosują mieszane układy uzwojeń względem siebie, przepłyty, ograniczają liczbę warstw uzwojeń itd.

Skorelowane ze wzrostem częstotliwości straty oraz efekt wypierania strumienia magnetycznego w rdzeniu wymuszają na producentach elementów magnetycznych stosowanie materiałów magnetycznych niskostratnych. W zakresie częstotliwości składowej podstawowej do 1 kHz jest to możliwe poprzez stosowanie cienkich blach o grubości w przedziale 0,01–0,1 mm i dużej rezystywności. Innym sposobem, w tym zakresie częstotliwości, może być ograniczanie wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu. Jednak konieczność czasami nawet kilkukrotnego obniżenia indukcji jest możliwa tylko w ograniczonym zakresie. W przedziale wyższych częstotliwości, kilku – kilkunastu kHz i więcej, konieczne jest jednak stosowanie innych materiałów magnetycznych, w tym taśm ze szkła metalicznego amorficznego lub nanokrystalicznego, rdzeni proszkowych i ferrytowych [2]. Dobór materiału magnetycznego rdzenia podyktowany jest również oczekiwanymi charakterystykami elementów magnetycznych, wchodzących w skład np. przetwornic DC–DC.

Nietypowość rozwiązań magnetyków o podwyższonej częstotliwości oraz ich mnogość jest ogromna. W połączeniu



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska badawczego

z koniecznością przeprowadzania prób typu oraz powszechnym brakiem regulowanych źródeł średniej częstotliwości o dużej mocy zaistniała potrzeba zbudowania stanowiska badawczego.

W niniejszym artykule zostanie zaprezentowane stanowisko, którego celem jest stworzenie pewnej platformy pozwalającej na testowanie transformatorów podwyższonej częstotliwości. Transformatory takie mogą być budowane z wykorzystaniem nowoczesnych materiałów magnetycznych: ferrytowych, amorficznych lub nanokrystalicznych. Artykuł jest wynikiem prac zrealizowanych w ramach projektu POIR.04.01.02-00-0001/16, którego celem było przebadanie możliwości zastosowania materiałów nanokrystalicznych w aplikacjach filtrów i transformatorów stosowanych w energoelektronicznych systemach przetwarzania energii.

## 2. Konstrukcja stanowiska

Schemat stanowiska został zaprezentowany na rys. 1. Składa się ono:

- z układu zabezpieczeń i filtra EMC od strony sieci zasilającej;
- rezystancyjnego układu rozruchowego wraz ze stycznikami;
- prostownika diodowego z kondensatorowym obwodem pośredniczącym napięcia stałego;
- 1-fazowego falownika napięcia.

Falownik został zbudowany w oparciu o moduł SiC MOSFET FMF400BX-24A firmy Mitsubishi [3]. Jest to pełny mostek tranzystorowy o parametrach maksymalnych: napięcia 1200 V i prądu 400 A. Tranzystory zbudowane w oparciu o technologię SiC odznaczają się rezystancyjną charakterystyką przewodzenia, zbliżoną do układów MOSFET (rezystancja przewodzenia 3–5 mΩ w zakresie do 200 A, w zależności od temperatury złącza). Dodatkowo czasy przełączania są tu zdecydowanie niższe w stosunku do podobnych tranzystorów IGBT, co predestynuje je do zastosowań o wyższych częstotliwościach przełączania. Warto zwrócić uwagę, że wg noty katalogowej tranzystory te nie są odporne nawet na krótkotrwałe zjawiska zwarciove, co negatywnie odróżnia je w stosunku do innych modułów, np. IGBT czy MOSFET. Należy więc zastosować dodatkowe środki ograniczające możliwości szybkiego narastania takiego prądu.

Przyjęto, że falownik będzie umożliwiał zasilanie odbiornika napięciem prostokątnym o zadanej, nastawialnej częstotliwości do 20 kHz i regulowanej wartości skutecznej napięcia za pomocą metody modulacji szerokości pojedynczego impulsu. Maksymalny poziom amplitudy prądu wyjściowego ustalono na wartość 200 A.

Na potrzeby stanowiska, a przede wszystkim modułu FMF400BX-24A, został zaprojektowany nowy układ wyzwalania (drajwer) tranzystorów SiC MOSFET oparty o układ firmy Broadcom ACPL 352J [4]. Charakteryzuje się on dużym prądem szczytowym w czasie załączania (5 A) i wyłączenia (4,5 A) tranzystora mocy, 150 ns opóźnieniem w propagacji sygnału sterującego oraz, co najważniejsze, bardzo wysoką odpornością na zmienność składowej wspólnej napięcia  $CMR$  100 kV/ $\mu$ s (przy  $U_{CM} = 1500$  V). Ten ostatni parametr jest niezwykle istotny w obliczu dużej szybkości przełączania tranzystorów SiC i zjawisk pasożytniczych, jakie zachodzą w czasie tego procesu. Układ drajwerowy wykorzystuje mechanizm pomiaru napięcia nasycenia tranzystora  $U_{DESAT}$  w czasie załączania do zabezpieczenia przeciwzwarciowego modułu oraz kontrolę napięć drajwerowych. Na rys. 2 przedstawiono fragment części przekształtnikowej stanowiska obejmujący 1-fazowy falownik wraz z układem sterowania, układami drajwerowymi oraz dławikiem przeciwzwarciowym  $L_{pz}$ . Umieszczony na wyjściu dławik  $L_{pz}$  (rys. 1) ma na celu ograniczenie szybkości narastania prądu zwarciovego na wyjściu falownika i niedopuszczenie do osiągnięcia wartości prądu przekraczającej maksymalne, chwilowe możliwości modułu (800 A). Przyjęto, że dławik o wartości 10  $\mu$ H będzie wystarczający do tego celu, a jednocześnie tylko w małym stopniu spowoduje zniekształcenie napięcia wyjściowego zasilającego badane obiekty. Dławik ten został wykonany na bazie rdzeni kubkowych proszkowych, których zaletą jest szeroki zakres liniowości charakterystyki magnesowania. Niestety przy częstotliwościach wyjściowych falownika powyżej 3,5 kHz należało ograniczyć prąd maksymalny na wyjściu falownika z powodu zbyt wysokiej temperatury rdzenia tego dławika. W celu obniżenia temperatury rdzeni został wyposażony w radiatory chłodzone w sposób wymuszony powietrzem, co można zauważyć na zdjęciu zamieszczonym na rys. 2.

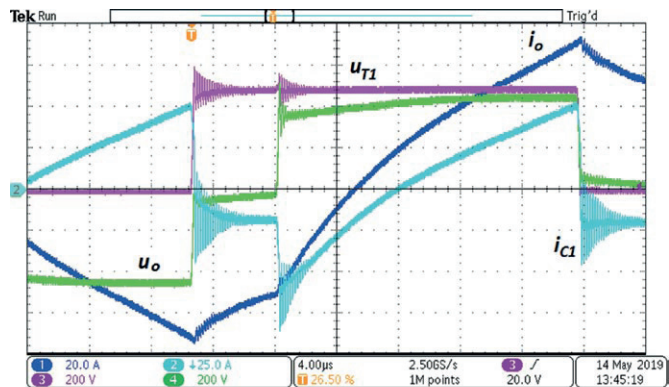


Rys. 2. Zdjęcie fragmentu stanowiska obejmujące 1-fazowy falownik wraz z elementami sterującymi i zabezpieczającymi

### 3. Wyniki badań

Stanowisko zostało wstępnie przebadane w laboratorium firmy ENEL-PC. W ich trakcie rozwiązano kilka problemów, które zauważono w czasie testów. Jedną ze zmian było, wspomniane wyżej, przekonstruowanie dławika  $L_{pz}$  oraz przygotowanie procedury ograniczenia prądowego falownika dla wyższych częstotliwości pracy. Blok ograniczenia prądowego został tak skonstruowany, że pozwala na pracę z maksymalnym prądem dla stanowiska (200 A), ale czas trwania takiej pracy jest ograniczony czasowo w funkcji częstotliwości (powyżej 3,5 kHz) i prądu roboczego.

Drugim istotnym problemem do rozwiązania były zjawiska przebiegowe, jakie występują na tranzystorach mostka w czasie przełączania. W trakcie montażu elementów na module tranzystorowym umieszczono typowe kondensatory *snubber* o pojemności 0,47  $\mu\text{F}$ . Ilustracją problemów, jakie wtedy występują, są przebiegi pokazane na rys. 3. Można tam zauważyć silne oscylacje prądów i napięcia na tranzystorze  $u_{T1}$  w chwili jego wyłączenia. Problemem jest nie tylko amplituda napięcia na tranzystorze proporcjonalna do komutowanego prądu, ale także częstotliwość oscylacji (6 MHz) i wartość skuteczna prądu, który zamyka się przez kondensator *snubbera*.



Rys. 3. Przebiegi prądu wyjściowego  $i_o$ , prądu kondensatora  $i_{C1}$ , napięcia na tranzystorze T1  $u_{T1}$  oraz napięcia na wyjściu ze stanowiska  $u_o$  w trakcie jednego cyklu przełączania  $F = 20 \text{ kHz}$

Powoduje to jego silne i niedopuszczalne nagrzewanie. Okazuje się, że w wyniku przełączenia tranzystora pojawia się rezonansowy prąd WCz wynikający z pojemności *snubbera* i indukcyjności pasożytniczych połączeń oraz przede wszystkim samych kondensatorów. Zmniejszenie tej pasożytniczej indukcyjności byłoby możliwe przez połączenie równoległe wielu małych kondensatorów tworzących pojemność obwodu DC, ale uznano, że jest to rozwiązanie niewłaściwe, ze względu na wymóg dużej mocy czynnej stanowiska. Mała pojemność obwodu DC powodowałaby duże tętnienia napięcia DC i zaburzenia w powtarzalności pomiarów.

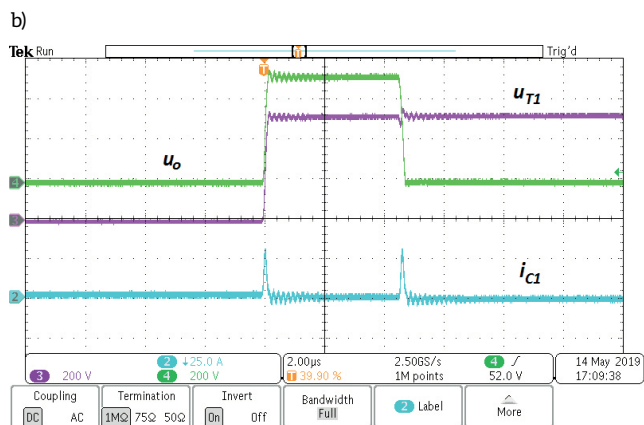
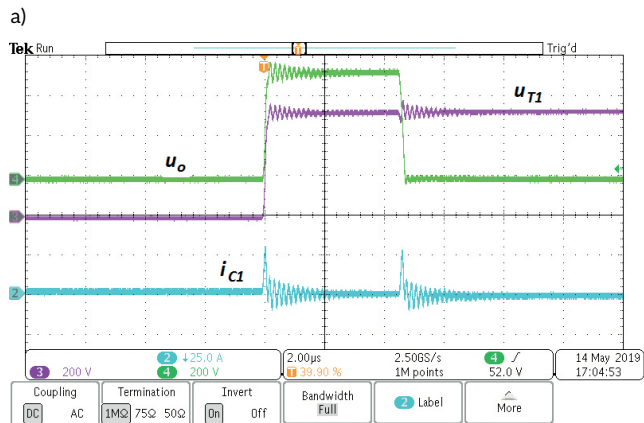
Zaproponowano inne rozwiązanie, pozwalające na uniknięcie problemów przez usunięcie kondensatora odciażającego (*snubber*) i ograniczenie zjawisk przepięciowych przez odpowiedni dobór czasu martwego w sygnałach sterujących. Wpływ tego czasu na zjawiska przepięciowe pokazano na rys. 4, gdzie w części a) pokazano przebiegi dla czasu martwego 1  $\mu\text{s}$ , a w części b) dla czasu optymalnego 0,5  $\mu\text{s}$ .

Pokazane przebiegi przedstawiają stan dla biegu jałowego falownika. Można zauważyć, że przy odpowiednio dobrze dobranym czasie martwym w sterowaniu tranzystorów półmostków możemy ograniczyć amplitudę przepięcia na tranzystorze, ale także szybko wytlumić oscylacje prądu z baterii kondensatorów.

Przedstawione stanowisko zostało przekazane do firmy ELHAND, gdzie jest wykorzystywane do badań transformatorów podwyższonej częstotliwości. Przykładem takich prac jest transformator 1-fazowy o mocy 30 kVA, zaprojektowany na bazie rdzenia z materiału niskostratnego do pracy przy zasilaniu o częstotliwości 10 kHz. Dzięki podwyższonej częstotliwości pracy transformator taki ma znacznie zmniejszone gabaryty.

Na rys. 5 pokazano zdjęcie, które pozwala na porównanie gabarytów zaprojektowanego transformatora o mocy 30 kVA i klasycznego transformatora o znacznie mniejszej mocy 5 kVA, przystosowanego do pracy przy częstotliwości 50 Hz. Dzięki zwiększeniu częstotliwości zasilania osiągamy wielokrotnie mniejsze wymiary i masę transformatora.



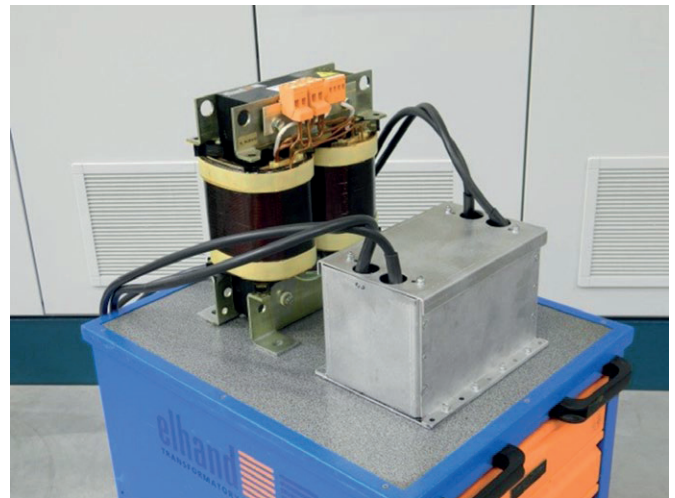


Rys. 4. Przebiegi prądu kondensatora  $i_{C1}$ , napięcia na tranzystorze  $T1$   $u_{T1}$  oraz napięcia na wyjściu ze stanowiska  $u_o$  w trakcie jednego cyklu przełączania  $F = 20$  kHz: a)  $t_{dead} = 1$   $\mu$ s; b)  $t_{dead} = 0,5$   $\mu$ s

Zaprojektowany transformator został przebadany z wykorzystaniem zbudowanego stanowiska, a całość systemu pomiarowego została przedstawiona na rys. 6. Wyniki badań potwierdziły poprawność przyjętych założeń i dobre właściwości cieplne transformatora. Na rys. 7 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu i napięcia na wyjściu w trakcie badań, przy czym obciążeniem był tu rezystor mocy o nastawianej wartości rezystancji.

#### 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono kolejny etap budowy systemów badawczych w ramach projektu POIR.04.01.02-00-0001/16.



Rys. 5. Zdjęcie porównujące gabaryty transformatora 1-fazowego: klasycznego 5 kVA, 50 Hz (po lewej) i 30 kVA, 10 kHz (po prawej)

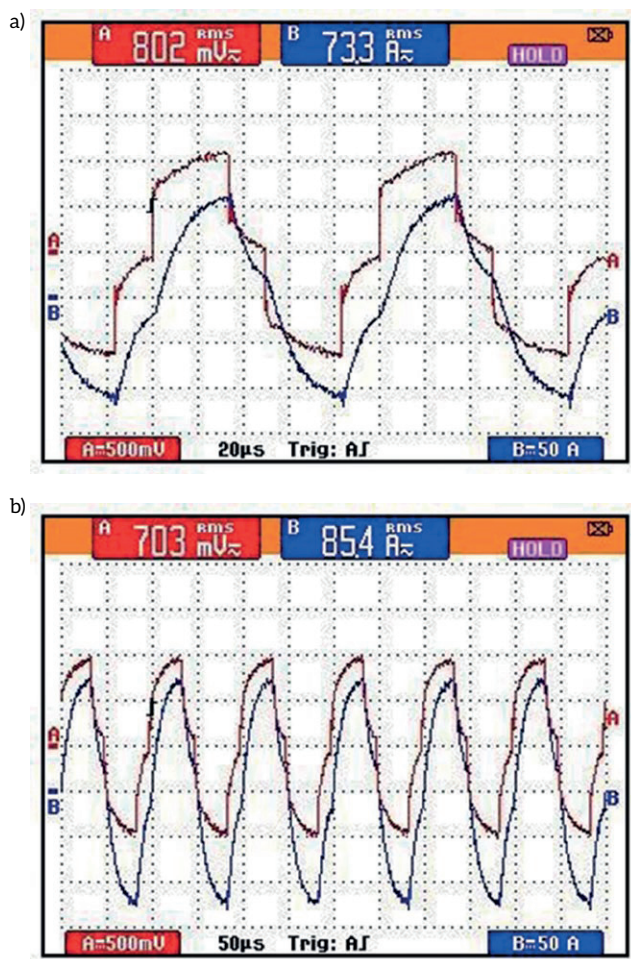


Rys. 6. Zdjęcie stanowiska pomiarowego z badanym transformatorem 30 kVA, 10 kHz

Wcześniej zbudowane zostało stanowisko pozwalające na badanie dławików i filtrów sieciowych dla układów przekształtnikowych [5, 6], w kolejnym etapie system pozwalający na badanie transformatorów podwyższonej częstotliwości o napięciu zasilania do 20 kHz i mocy 100 kVA.

reklama

reklama



Rys. 7. Przebiegi napięciowo-prądowe w trakcie badań transformatora 30 kVA, 10 kHz w przypadku pełnego obciążenia: a) strona pierwotna; b) strona wtórna, skala napięcia 250 V/dz

Transformatory takie znajdują coraz szersze zastosowanie w przetwornicach kolejowych, ładowarkach akumulatorowych czy zgrzewarkach inwertorowych. Przez podnoszenie poziomu częstotliwości pracy transformatora uzyskujemy zmniejszone gabaryty i masę. Jest to okupione zastosowaniem odpowiednich materiałów magnetycznych i specjalnych rozwiązań w zakresie przewodów (lica), ale także wymaga źródeł przekształtnikowych, umożliwiających przetwarzanie energii w odpowiednich warunkach zasilania przy wysokiej sprawności.

## Literatura

- [1] litzwire.com [dostęp 13.02.2020].
- [2] SZYNOWSKI J., KOLANO R., KOLANO-BURIAN A., POŁAK 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.
- [3] Mitsubishi Electric, FMF 400BX-24A – Full SiC module, Data sheet, July 2018.
- [4] Broadcom, ACPL-352J, 5.0 Amp Output Current IGBT and SiC/GaN MOSFET Gate Drive Optocoupler, Data sheet, June 2019.
- [5] BISKUP T., KOŁODZIEJ H., BODORA A., MICHALAK J.: *Stanowisko do badania filtrów dla napędów prądu przemiennego*. „Napędy i Sterowanie” 3/2019.
- [6] BISKUP T., KOŁODZIEJ H., BODORA A., MICHALAK J.: *Stanowisko do testów filtrów sieciowych dla napędów – badania laboratoryjne*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2(122)/2019.

## Informacje dodatkowe

Artykuł prezentuje wyniki związane z realizowanym projektem współfinansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój nr POIR.04.01.02-00-0001/16, pt. „Innowacyjne i energooszczędne nanokrystaliczne dławiki filtrów dla poprawy jakości energii elektrycznej i ograniczenia negatywnego wpływu energetyki na środowisko”.



dr inż. Tomasz Biskup, e-mail: t.biskup@enel-pc.pl  
 dr inż. Henryk Kołodziej, e-mail: henryk.kolodziej@enel-pc.pl  
 mgr inż. Mariusz Lorenc, e-mail: m.lorenc@enel-pc.pl  
 mgr inż. Dariusz Paluszczyk, e-mail: d.paluszczyk@enel-pc.pl  
 mgr inż. Jacek Sontowski, e-mail: j.sontowski@enel-pc.pl  
 ENEL-PC Sp. z o.o.

dr inż. Maciej Haltof, e-mail: m.haltof@elhand.pl  
 ELHAND Transformatory Sp. z o.o.

reklama

# reklama