

**Tomasz Biskup, Andrzej Cieniuch, Henryk Kołodziej, Dariusz Paluszcak,  
Jacek Sontowski**  
ENEL-PC, sp. z o.o., Przyszowice

## **PRZEKSZTAŁTNIK TYPU DAB W SYSTEMIE MAGAZYNOWANIA ENERGII Z AKUMULATOREM NISKONAPIĘCIOWYM**

### **DAB CONVERTER USED IN LOW-VOLTAGE BATTERY STORAGE SYSTEM**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono układ przekształtnika energoelektronicznego o mocy 3 kW, którego celem jest połączenie obwodu DC systemu fotowoltaicznego i akumulatora niskonapięciowego służącego jako lokalny magazyn energii. Ze względu na dwukierunkowy przepływ energii i znaczną różnicę napięć DC zastosowano przekształtnik typu DAB. Istotnym elementem tego przekształtnika jest transformator WCz. W ramach niniejszego rozwiązania analizowano różne materiały magnetyczne do realizacji tego elementu. W trakcie etapu projektowania konstrukcji urządzenia przeprowadzono proces optymalizacji w celu minimalizacji kosztów, przy zachowaniu odpowiedniej funkcjonalności. W artykule pokazano budowę oraz wyniki badań całego układu.

**Abstract:** In the article is presented 3 kW power converter. The aim of the converter is coupling photovoltaic DC circuit with a battery which is used as energy storage system. We used DAB converter because of great voltage difference and bidirectional flow of energy between sources. One of the important element of the system is HF transformer. The analyze of the transformer focused on type of core material. During the design procedure of the converter optimization process was carried out to reduce cost while maintaining the functionality of the system. The authors show in the article construction and measurements of the converter.

**Słowa kluczowe:** *przekształtnik DAB, dławiki i transformatory WCz, energoelektronika, przekształtniki tranzystorowe*

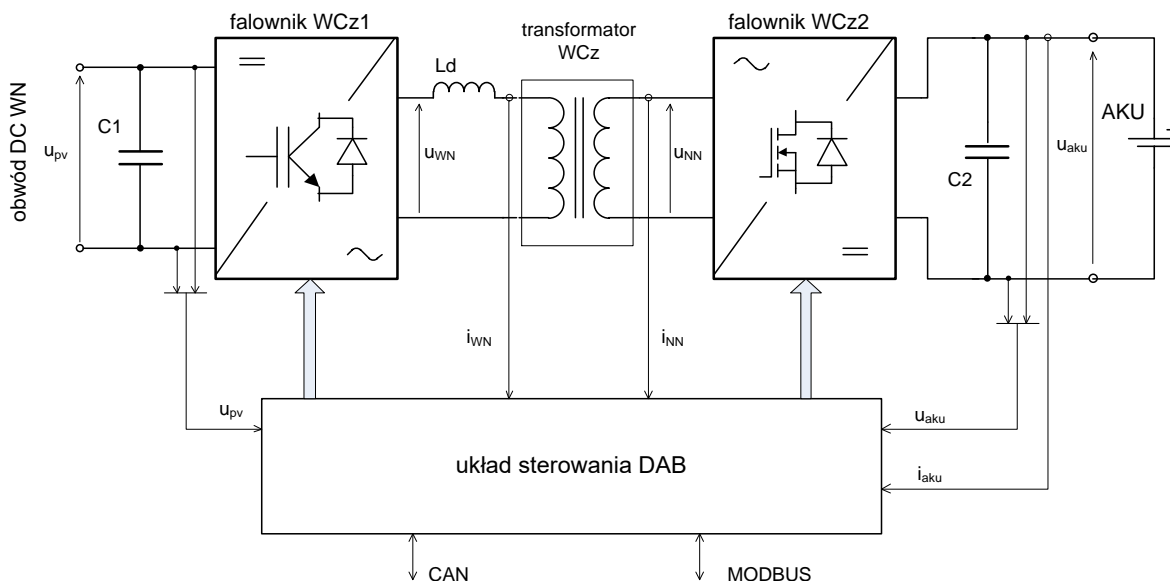
**Keywords:** *DAB converter, HF chokes and transformers, power electronics, transistor converters*

### **1. Wprowadzenie**

Gwałtowny rozwój energetyki odnawialnej, zauważalny w ostatnich latach na całym świecie, powoduje zmianę podejścia do problematyki strategii zarządzania sterowaniem w systemie elektroenergetycznym. Nieprzewidywalność produkcji energii przez generatory wiatrowe czy fotowoltaikę i przesunięcia czasowe między okresami maksymalnej produkcji energii, zwłaszcza z ogniw fotowoltaicznych, w stosunku do momentu większego zapotrzebowania na energię elektryczną, powoduje konieczność budowy magazynów energii. O ile wcześniej typowym magazynem energii były elektrownie szczytowo-pompowe, to obecnie widoczny jest trend rozwojowy w zakresie akumulatorowych zasobników energii dużych i małych mocy.

Biorąc pod uwagę gwałtowny rozwój energetyki prosumenckiej i tendencje sposobu rozliczenia energii dostarczonej do sieci i energii pobranej narzucane przez dystrybutorów, magazyny energii dopasowane mocą do instalacji o stosunkowo małej mocy mają coraz większy sens i uzasad-

nienie także ekonomiczne. Rozwiązania takie generują oczywiście dodatkowe koszty obejmujące sam magazyn energii, ale także przekształtnik energoelektroniczny pozwalający na dwukierunkowy przepływ energii. Stosowane obecnie akumulatory składają się z ogniw o niskim napięciu znamionowym, łączonych szeregowo-równolegle w celu uzyskania odpowiednich parametrów napięciowych i mocowych. Biorąc pod uwagę wartości napięć DC na wyjściu instalacji fotowoltaicznej, dopasowane do wymagań sieci EE i współpracujących z nią przekształtników, zastosowanie akumulatorów o zbliżonym napięciu znamionowym jest rozwiązaniem kosztownym. Jednym z rozwiązań redukujących te nakłady finansowe może być zastosowanie akumulatora o stosunkowo niskim napięciu, np. rzędu 48 V i przekształtnika, który pozwala na sprzęgnięcie dwóch sieci DC o silnie rozbieżnych napięciach roboczych. Takim rozwiązaniem może być przekształtnik typu DAB [1], który nie tylko pozwala na realizację takiego zadania, ale także umożliwia dwukierunkowy przepływ energii elektrycznej,



Rys. 1. Schemat blokowy przekształtnika DAB sprzęgającego obwód DC ogniwa fotowoltaicznego (PV) z akumulatorem

oraz zapewnia separację galwaniczną obu obwodów DC. Może to być element większego systemu np. z ładowarką pojazdu elektrycznego wpiętą w obwód DC o wyższym napięciu. Należy zwrócić uwagę, że w systemie akumulatorowego magazynowania energii i tak przekształtnik byłby wymagany, choćby ze względu na zmienność napięcia na akumulatorze w trakcie procesu ładowania i rozładowania, a jednocześnie w podejściu z akumulatorem niskonapięciowym zyskujemy na jego niższej cenie.

## 2. Budowa przekształtnika

Rozwiązanie wcześniej pokazanych problemów było celem budowy przekształtnika DAB przedstawionego w niniejszym artykule. Przyjęto, że moc podstawowej jednostki to 3 kW, a napięcia znamionowe obu sieci DC to: 460 V po stronie ogniw fotowoltaicznych i 55 V po stronie zasobnika energii. Schemat blokowy przekształtnika wraz z układem sterowania przedstawiono na rys. 1.

Przekształtnik składa się z dwóch 1-fazowych falowników napięcia połączonych ze sobą po stronie napięcia AC za pomocą transformatora WCz. Falownik znajdujący się po stronie wyższego napięcia (rzędu 460 V) został zbudowany w oparciu o tranzystory IGBT STGB20M65, a falownik po stronie akumulatora w oparciu o tranzystory MOSFET IRFB4310. Poza samą częścią przekształtnikową DAB-a, bardzo istotnym jest odpowiednia konstrukcja elementów indukcyjnych, będących integralnymi częściami

przekształtnika: dławika i transformatora WCz. Biorąc pod uwagę fakt redukcji wymiarów tych elementów przyjęto też odpowiednio wysoką częstotliwość przełączania tranzystorów przekształtnika o wartości 20 kHz. Zwiększenie częstotliwości skutkowało by zmniejszeniem gabarytów elementów indukcyjnych, ale z drugiej strony zwiększyłyby straty przełączeniowe obu zaworów energoelektronicznych, zwłaszcza tranzystorów IGBT. Rozwiązanie niniejsze ma więc charakter pewnego kompromisu [2]. W celu uzyskania odpowiedniej kompresji i redukcji wymiarów tranzystory MOSFET i IGBT zostały umieszczone na płytach drukowanych wykonanych w technologii IMS [3]. Obwody drukowane zawierają, poza tranzystorami, właściwe elementy zabezpieczeń przeciwprzepięciowych oraz torów bramkowych. Układ sterowania integruje wszystkie funkcje związane sterowaniem, pomiarami, zabezpieczeniami oraz komunikacją z otoczeniem. Jako centralny układ sterowania wybrano, stosunkowo tani, mikrokontroler firmy Texas Instruments TMS 320F280023. Mikrokontroler należy do nowszych produktów firmy TI, zawiera poza standardową jednostką centralną charakterystyczną dla całej rodziny, szereg układów peryferyjnych. One także zostały nieco zmodyfikowane i unowocześnione, a szczególną właściwością jest możliwość dość swobodnego przypisywania we/wy peryferiów (np. PWM, CAN, A/C itp.) do wyprowadzeń układu scalonego. Tory pomiarowe prądów zostały oparte o tanie przekładniki

prądowe WCz z serii CST206 i CST206 firmy Triad Magnetics w przypadku pomiarów AC oraz bocznik prądowy bez separacji galwanicznej w przypadku pomiaru DC. To ostatnie rozwiązanie jest dopuszczalne, bowiem cały układ sterowania przekształtnika DAB jest zasilany napięciem akumulatora +48V będący elementem magazynu energii.

Tak jak wspomniano wcześniej bardzo istotnym elementem przekształtnika DAB są dławik i transformator WCz, a kluczowym zagadnieniem w ich budowie jest dobór materiału rdzenia. Biorąc pod uwagę zakładaną częstotliwość przełączania przekształtnika DAB 20 kHz, możliwe rozwiązania obejmują rdzenie ferrytowe i materiały nanokrystaliczne wykonane na bazie różnych stopów żelaza z dodatkami kobaltu, niklu, cynku, boru, molibdenu i in. pierwiastków [4], [5]. Jak wykazano w tych pracach materiały nanokrystaliczne pozwalają na podwyższenie maksymalnego poziomu indukcji w rdzeniu, przy ograniczonym poziomie strat. Problemem jest jednak dostępność elementów o standardowych wymiarach, z których można by poskładać odpowiedni rdzeń. Jednak współpraca z Instytutem Metali Nieżelaznych, mającym pewne możliwości produkcyjne, pozwalała autorom na uniknięcie tego problemu. Przeprowadzono wstępne obliczenia i symulacje, które pozwoliły na zaprojektowanie i przebadanie obu rozwiązań. Ze względów głównie ekonomicznych zdecydowano się, w docelowym rozwiązaniu, na zastosowanie rdzenia z materiału 3C94 firmy Ferroxcube do budowy dławika i transformatora WCz. W celu dopasowania roboczych napięć akumulatora oraz obwodu DC WN przyjęto przełożenie transformatora WCz 25:3. To zapewni osiągnięcie optymalnego punktu pracy w dużym zakresie zmienności napięcia akumulatora od poziomu naładowania od 10-100%.

Typowe przekształtniki współpracujące z ogniwami fotowoltaicznymi i pracujące na sieć 3-fazową składają się z trzech części:

- przekształtnika DC/DC przetwarzającego energię z ogniw PV do centralnego obwodu DC z baterią kondensatorów, gdzie utrzymywane jest stałe napięcie pozwalające na poprawną pracę przekształtnika sieciowego,
- przekształtnika sieciowego, który przetwarza energię z centralnego obwodu DC do sieci EE,
- przekształtnika DC/DC pozwalającego na przesył energii między centralnym obwodem DC i dodatkowym magazynem energii (czyli akumulatorem).

Właśnie do obwodu wyjściowego tego ostatniego przekształtnika jest dołączany zaprojektowany tu przekształtnik DAB, który jest elementem pośredniczącym. To pozwala nam na wykorzystanie akumulatora o zdecydowanie niższym napięciu roboczym jako magazynu energii. Dlatego algorytm sterowania przekształtnika DAB opiera się na modelowaniu akumulatora o wysokim napięciu zbliżonym do 400-460V na podstawie napięcia mierzonego na rzeczywistym akumulatorze niskonapięciowym, będącym naszym zasobnikiem energii. Działanie układu składa się z dwóch faz:

- w fazie nr 1 układ sterowania mierzy napięcie po stronie WN i jeśli jest ono mniejsze niż iloczyn napięcia na akumulatorze nn i przekładni transformatora WCz uruchamia proces ładowania kondensatora strony WN tylko za pomocą energii akumulatora i falownika NN.

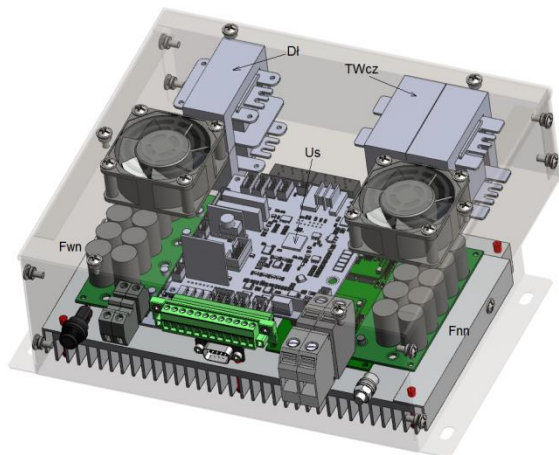
- faza 2 to praca w standardowym trybie DAB, gdzie falowniki pracują ze stałą częstotliwością i pełnym wysterowaniem, a przez przesunięcie fazowe napięć prostokątnych falowników można sterować przepływem mocy między stroną NN i WN.

W niniejszym przypadku układ regulacji jest wyposażony w kaskadowy układ regulacji z podrzędnym regulatorem prądu akumulatora i nadrzędnym regulatorem napięcia po stronie WN przekształtnika DAB. Napięcie zadane jest iloczynem napięcia mierzonego na akumulatorze i przekładni transformatora WCz. Na wartości napięcia zadanego i prądów zadanych są nałożone odpowiednie ograniczenia wynikające z możliwości prądowych akumulatora, przekształtnika DAB i mocy maksymalnej całego układu czyli 3 kW.

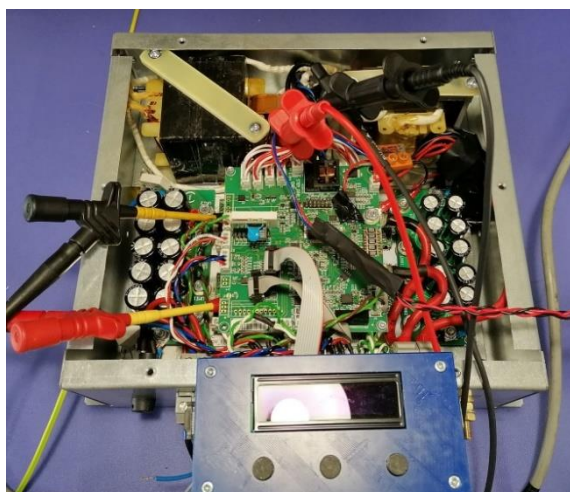
W celu właściwej współpracy z głównym przekształtnikiem PV, tutejszy układ sterowania odbiera ramki CAN przesyłane przez akumulator NN, przelicza prądy i napięcia tam zawarte na wartości WN i takie odsyła także przez CAN, ale już pod innymi adresami do przekształtnika PV. W ten sposób układ faktycznie w pełni emuluje akumulator WN.

Cały przekształtnik został przedstawiony w postaci modelu na rys. 2, a po wykonaniu także na zdjęciu na rys. 3. Na rysunku modelowym oznaczono dodatkowo skrótami poszczególne elementy urządzenia: Us - układ sterowania, Fwn – falownik strony WN, Fnn – falownik strony NN, Dł – dławik, TWcz – transformator WCz. Przekształtnik został dodatkowo wyposażony w panel operatorski widoczny na zdjęciu z rys. 3,

który ułatwia parametryzację i diagnostykę, ale na stałe nie musi być dołączany do urządzenia.



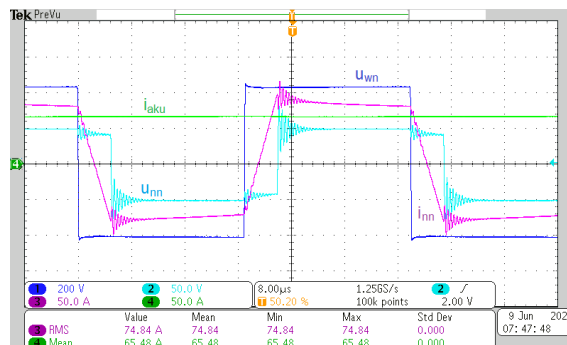
Rys. 2. Model przekształtnika DAB



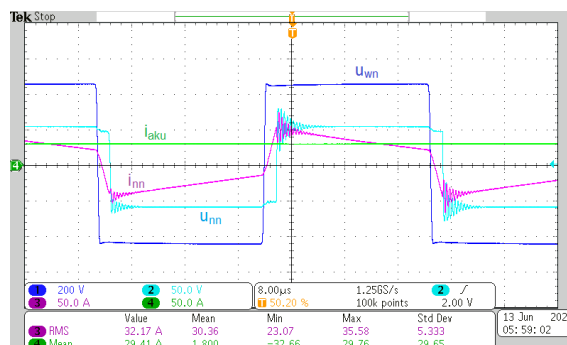
Rys. 3. Zdjęcie wykonanego przekształtnika DAB o mocy 3 kW w czasie badań

### 3. Wyniki badań

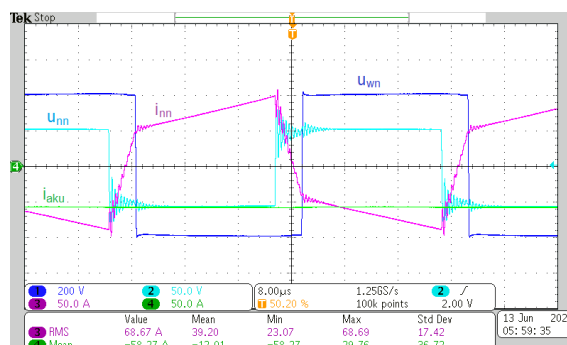
Przekształtnik został poddany wszechstronnym badaniom, które pozwoliły na wskazanie odpowiednich modyfikacji jakie powinny zostać wykonane w docelowym rozwiązaniu. Jednym z problemów było lekkie nasycenie dławika, które może zostać zlikwidowane przez zwiększenie przekroju czynnego rdzenia. Wykonano także badania EMC przekształtnika dla obwodu DC WN, które pozwoli na zintegrowanie z przekształtnikiem odpowiedniego filtra z wykorzystaniem dławika CM na bazie rdzenia z materiału nanokrystalicznego. Właściwe działanie przekształtnika zostało zilustrowane kilkoma oscylogramami uzyskanymi w czasie badań, przedstawiono je na rys. 4, 5 i 6.



Rys. 4. Przebiegi prądów i napięć przekształtnika DAB w czasie ładowania akumulatora przy SOC = 5% i  $I_{aku} = 65$  A



Rys. 5. Przebiegi prądów i napięć przekształtnika DAB w czasie ładowania akumulatora przy SOC = 95% i  $I_{aku} = 29$  A



Rys. 6. Przebiegi prądów i napięć przekształtnika DAB w czasie rozładowania akumulatora przy SOC = 95% i  $I_{aku} = -58$  A

W czasie tych pomiarów urządzenie było zasilane po stronie WN z zasilacza DELTA ELEKTRONIKA SM500-CP-90, a po stronie NN podłączone do akumulatora Li-Ion o pojemności 10 kWh, max. prądzie rozładowania 200 A i max. prądzie ładowania 100 A. Roboczy zakres napięcia tego akumulatora wynosił 42 – 58 V. Na rysunkach 4-6 umieszczono przy przebiegach oznaczenia mierzonych sygnałów, a ich rozmieszczenie w urządzeniu można znaleźć na rys. 1: ch1 –  $u_{wn}$ , ch2 –  $u_{nn}$ , ch3 –  $i_{nn}$ , ch4 –  $i_{aku}$ . Skale prądów i napięć są zgodne z podanymi

w stopce każdego oscylogramu przy oznaczeniu kanałów.

Pierwsze dwa przebiegi z rys. 4 i 5 pokazują proces ładowania akumulatora, przy czym na rys. 4 odbywa się to przy małym poziomie naładowania akumulatora SOC = 5%, a na rys. 5 w końcowej fazie ładowania przy SOC = 95%. W początkowej fazie ładowania wymuszany prąd to 65 A, co wynika z ograniczenia na moc maksymalną przekształtnika 3 kW. Jak można zauważyć faza końcowa ładowania charakteryzuje się natomiast zmniejszoną wartością prądu do 29 A, co wynika z ograniczenia narzuconego już przez BMS akumulatora. Na rys. 6 przedstawiono przebiegi dla procesu rozładowania, na co wskazuje ujemna wartość prądu akumulatora (-58 A). W stosunku do przebiegów z procesu ładowania zmieniło się też przesunięcie fazowe między przebiegami napięcia po stronie WN i NN. Podobnie badania zostały wykonane w układzie zbliżonym do docelowego z przekształtnikiem PV, gdzie ogniwa słoneczne zostały zastąpione przez zasilacz DC. Tam przetestowano zwłaszcza proces wstępnego ładowania obwodu WN i przejście do pracy w trybie DAB.

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły poprawne działanie zaprojektowanego i wykonanego prototypu urządzenia o mocy 3 kW. Uzyskanie doświadczenia zostaną wykorzystane w fazie wdrożenia do produkcji. Można uznać, że zaproponowane rozwiązanie jest dobrą i tańszą alternatywą dla wysokonapięciowych magazynów energii w systemach wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych małej mocy wykorzystywanych przez prosumentów.

#### 5. Literatura

- [1] Qin H., Kimball J.W. : Solid-State Transformer Architecture Using AC-AC Dual-Active-Bridge Converter, *IEEE Tran. on Ind. Electron.*, vol 60, no. 9, Sep. 2013, pp. 3720 – 3730.
- [2]. Biskup T., Kołodziej H., Paluszczak D., Sontowski J., Michalak J.: Analiza możliwości zastosowania materiałów nanokrystalicznych w energoelektronice, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 1/2022 (125), str. 77-83.
- [3]. Domoracki A.: Materiały z izolowanym podłożem metalowym, *Napędy i Sterowanie*, Nr 3/2014, str. 144-149.
- [4]. Szynowski J., Kolano R., Kolano-Burian A., Polak M.: Reduction of power losses in the tape-wound FeNiCuNbSiB nanocrystal line cores using interlam-

inar insulation, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, Iss. 4, Apr 2014, pp 1-4.

[5]. Kolano-Burian A., Łukiewski M., Zackiewicz P., Piłśniak A., Polak M., Łukiewska A., Hreczka M., Kolano R., Biskup T., Karpiński M. : Examination of magnetic properties of three-phase LLC and LCL filter chokes with multi-gap nanocrystalline block cores used in power electronics, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 549 (2022) 169050.

#### Autorzy:

dr inż. Tomasz Biskup, ENEL-PC sp. z o.o.  
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice  
e-mail: [t.biskup@enel-pc.pl](mailto:t.biskup@enel-pc.pl)  
mgr inż. Andrzej Cieniuch, ENEL-PC sp. z o.o.  
ul. Graniczna 74B, 44-178 Przyszowice  
e-mail: [a.cieniuch@enel-pc.pl](mailto:a.cieniuch@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](mailto: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](mailto: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](mailto:j.sontowski@enel-pc.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.*