

doi:10.15199/48.2022.09.16

## Badanie właściwości dławików z rdzeniem hybrydowym

**Streszczenie.** W pracy zaproponowano nowe rozwiązanie dławika zawierającego rdzeń hybrydowy składający się z dwóch połączonych ze sobą rdzeni ferromagnetycznych o identycznych rozmiarach wykonanych z różnych materiałów. Do badań wykorzystano 2 dławiki zawierające rdzenie hybrydowe ferrytowo – proszkowy oraz ferrytowo-nanokrystaliczny. Zbadano wpływ składowej stałej prądu na indukcyjność dławików zawierających rdzenie hybrydowe i temperaturę tych rdzeni. Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie rdzenia hybrydowego ferrytowo – proszkowego pozwoliło na uzyskanie wyższych wartości indukcyjności w całym rozważanym zakresie prądu polaryzującego i prawie 10 % niższej wartości temperatury rdzenia od dławika z rdzeniem hybrydowym ferrytowo - nanokrystalicznym.

**Abstract.** The paper proposes a new solution of inductor containing a hybrid core consisting of two connected ferromagnetic cores of identical sizes, made of different materials. Two inductors containing hybrid ferrite-powder and ferrite-nanocrystalline cores were used for the investigations. Using the known measurement set-up, the influence of the direct current on the inductor inductance and its core temperature was investigated. The investigations show that the use of a ferrite-powder hybrid core allowed to obtain higher inductance values in the whole range of direct current and almost 10% lower value of core temperature. (*Investigation of the properties of an inductor with a hybrid core*).

**Słowa kluczowe:** dławik hybrydowy transformator, materiały ferromagnetyczne

**Keywords:** hybrid inductor, transformer, ferromagnetic materials

### Wstęp

Elementy magnetyczne są powszechnie wykorzystywane w układach przekształcania energii elektrycznej, gdzie służą przede wszystkim do magazynowania energii elektrycznej [1, 2]. Wymagania stawiane tego typu układom zwłaszcza w zakresie zmniejszania ich rozmiarów powodują, że ich projektanci poszukują nowych rozwiązań pozwalających uzyskać niewielkie rozmiary układu przy zachowaniu ich wysokiej sprawności energetycznej [3, 4, 5]. Dławiki i transformatory zazwyczaj w tego typu układach są komponentami o największych rozmiarach, dlatego podczas projektowania takich układów istotny jest dobór odpowiedniego elementu magnetycznego. W tym celu stosuje się rdzenie ferromagnetyczne wykonane z odpowiedniego materiału lub rdzenie hybrydowe składające się z dwóch lub więcej połączonych ze sobą rdzeni wykonanych z różnych materiałów ferromagnetycznych, które spełniają oczekiwania projektantów [6].

Na rynku oferowanych jest wiele rdzeni ferromagnetycznych różniących się między sobą składem chemicznym, właściwościami i przeznaczeniem [7, 8]. Jednak mimo ich szerokiej oferty w dalszym ciągu trwają badania i poszukiwania coraz lepszych rozwiązań. Badania te obejmują zarówno materiały magnetyczne, jak i kształt i konstrukcję rdzenia oraz wpływ jego parametrów na właściwości dławika [9, 10]. W ostatnim czasie zaczęły pojawiać się prace poświęcone nowym rodzajom dławików tj. dławików hybrydowych lub dławików zawierających rdzenie hybrydowe [11-14].

Przykładowo w pracy [11] zaproponowano dławik hybrydowy przeznaczony do aplikacji wysokoczęstotliwościowych. Rdzeń zaproponowanego dławika jest kombinacją materiałów o wysokiej przenikalności magnetycznej, jak ferryty czy taśmy amorficzne z materiałem magnetycznym kompozytowym. Zadaniem zastosowanych materiałów kompozytowych ma być niedopuszczenie do zmniejszenia przenikalności magnetycznej nawet przy wysokiej wartości częstotliwości. Przedstawione w pracy [11] wyniki badań dławika hybrydowego porównali z dławikiem zawierającym rdzeń typu Metglas. Badania przeprowadzono w zakresie od 150 kHz do 80 MHz. Z uzyskanych wyników zaobserwowano, że indukcyjność dławika hybrydowego wzrosła w porównaniu do dławika konwencjonalnego przy

częstotliwości 150 kHz o około 18 %, a przy częstotliwości 80 MHz ponad dwukrotnie.

Z kolei, w pracy [12] zaproponowano element dedykowany do pracy w wysokoczęstotliwościowych układach rezonansowych. Wspomniany element, określany jako element hybrydowy stanowi połączenie dławika i kondensatora, w których zastosowano rdzeń ferromagnetyczny wykonany z cienkich taśm ferrytowych Ni-Zn, pełniąc rolę magnetyka i dielektryka. Do rdzenia w postaci taśm dolutowano elektrody z wyprowadzeniami tworząc kondensator. Połączenie szeregowo lub równoległe elektrod kondensatora z wyprowadzeniami dławika pozwoliło na wykonanie elementu rezonansowego. Z przeprowadzonej w pracy [12] analizy wynika, że wektory natężenia pola elektrycznego i pola magnetycznego są względem siebie ortogonalne i nie zachodzi między nimi żadne oddziaływanie. Zaobserwowano, że w zakresie niskich częstotliwości charakterystyki dławika i kondensatora są stałe i w przypadku dławika nie zależą od parametrów kondensatora i odwrotnie. Przeprowadzono badania właściwości zaproponowanego elementu w zakresie częstotliwości sygnału pobudzającego od 1kHz do 100 MHz. Uzyskane wyniki badań wskazują, że wartości indukcyjności dławika i pojemności kondensatora rozpatrywane jako parametry odrębnych elementów dla częstotliwości  $f < 30$  MHz są stałe, a rezonans zaobserwowano powyżej wspomnianej częstotliwości. Uzyskane wyniki badań wpływu wybranych czynników np. częstotliwości na pojemność hybrydowego kondensatora porównano z wynikami pomiarów kondensatora ceramicznego o podobnych parametrach uzyskując bardzo dobrą zgodność. W pracy przedstawiono także wyniki badań wpływu częstotliwości na indukcyjność nowego dławika jednak nie porównano uzyskanych wyników z indukcyjnością dławika o podobnych parametrach.

W pracy [13] zaproponowano zastosowanie hybrydowego rdzenia magnetycznego do redukcji tętnień momentu obrotowego reluktancyjnej maszyny elektrycznej. W celu poprawy wydajności takiej maszyny zaproponowano zastosowanie blach ze stali krzemowej zorientowanej na ziarno do budowy zębów stojana. Wykorzystując metodę elementów skończonych przeprowadzono analizę rozkładu pola magnetycznego przy gęstości prądu wynoszącej 18 A/mm<sup>2</sup>. Z przeprowadzonych analiz wynika, że indukcja magnetyczna w zębach stojana wykonanych z blach ze

stali krzemowej zorientowanej na ziarno jest dużo wyższa od indukcji magnetycznej gdy zęby stojana wykonane są z innego materiału. Zaobserwowano, że zastosowanie stali krzemowej zorientowanej na ziarno do budowy zębów stojana pozwoliło na uzyskanie indukcji magnetycznej wynoszącej nawet 2,05 T. Natomiast w przypadku, gdy wszystkie zęby stojana wykonano z tego samego materiału możliwie było uzyskanie indukcji magnetycznej nieprzekraczającej 1,87 T. Wykazano, że zastosowanie stali krzemowej do budowy części zębów stojana pozwoliło na poprawę sprawności energetycznej, współczynnika mocy oraz średniego momentu obrotowego.

W pracy [14] zaproponowano hybrydowy rdzeń magnetyczny wykorzystany do budowy transformatora prostownikowego dedykowanego do pracy w układach przekształcania energii elektrycznej stosowanych w przemyśle lotniczym. Do budowy rdzenia zastosowano dwa rdzenie z czego pierwszy wykonano ze stopu amorficznego 1SR a drugi ze stopu magnetycznego miękkiego 49K2FA w celu poprawy sprawności energetycznej oraz redukcji wagi i całkowitych rozmiarów rozważanego transformatora. Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie rdzenia składającego się z dwóch rdzeni wykonanych ze wspomnianych materiałów pozwoliło na wykonanie rdzenia charakteryzującego się wysoką wartością indukcji magnetycznej wynoszącej 1,9 T oraz względną przenikalnością magnetyczną równą 4500. Jednak ograniczeniem zaproponowanego rozwiązania jest niski zakres częstotliwości pracy - do 400 Hz.

Celem pracy jest zbadanie wpływu składowej stałej prądu polaryzującego na właściwości dławika zawierającego toroidalny rdzeń hybrydowy będący połączeniem dwóch rdzeni toroidalnych o tych samych rozmiarach wykonanych z różnych materiałów ferromagnetycznych. W rozdziale 2 omówiono badane rdzenie. W rozdziale 3 przedstawiono układ pomiarowy, a wyniki pomiarów zaprezentowano w rozdziale 4.

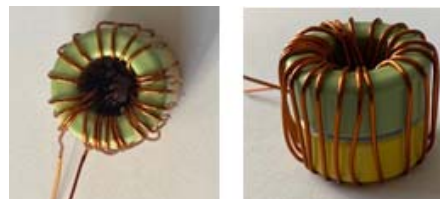
### Badany element

Badania przeprowadzono dla dwóch dławików zawierających toroidalne rdzenie hybrydowe rozumiane jako dwa połączone ze sobą rdzenie toroidalne o jednakowych rozmiarach wykonane z różnych materiałów ferromagnetycznych. Pierwszy dławik zawierał rdzeń składający się z połączonych ze sobą rdzeni: ferrytowego wykonanego z materiału SM-100 oraz rdzenia wykonanego ze sproszkowanego żelaza (-52). W dalszej części pracy dławik ten oznaczany jest jako hybrydowy a. Drugi dławik zawierał rdzeń hybrydowy złożony z rdzenia wykonanego ze sproszkowanego żelaza typu (-26) oraz rdzenia nanokrystalicznego. Dławik ten w dalszej części pracy oznaczany jest jako hybrydowy b.

Dodatkowo badania przeprowadzono dla dwóch przypadków, tj. kiedy rdzenie w miejscu styku pozbawiono izolacji oraz sklejono za pomocą kleju termo i elektrycznie przewodzącego oraz bez kleju. Na oba rdzenie hybrydowe nawinięto 30 zwojów drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm. Jak wspomniano wcześniej wszystkie badane rdzenie miały takie same rozmiary tj. średnice zewnętrzne wynoszące 26,9 mm, średnice wewnętrzne 14,5 mm i wysokość 11 mm. Przykładową realizację dławika z rdzeniem hybrydowym przedstawiono na rysunku 1, natomiast parametry materiałów magnetycznych zastosowanych do budowy rdzeni wchodzących w skład rdzenia hybrydowego przedstawiono w Tabeli 1.

Z zebranych w Tabeli 1 parametrów materiałów magnetycznych zastosowanych do budowy rdzeni badanych dławików można zauważyć, że wartość przenikalności magnetycznej rdzenia z materiału

ferrytowego SM-100 jest ponad 130 razy wyższa od przenikalności magnetycznej rdzenia ze sproszkowanego żelaza typu (-26) i dwukrotnie niższa niż dla rdzenia nanokrystalicznego M070.



Rys.1. Badane dławiki z rdzeniem hybrydowym

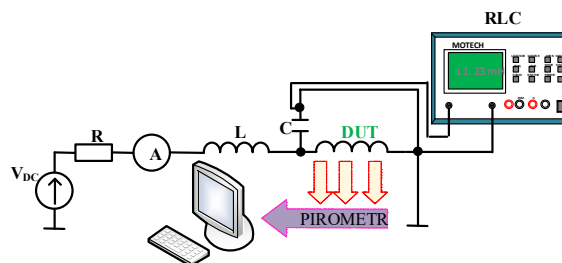
Z kolei, najwyższą wartością indukcji nasycenia charakteryzuje się rdzeń ze sproszkowanego żelaza. Jest ona trzykrotnie wyższa dla rdzenia z materiału ferrytowego niż dla rdzenia proszkowego i o 15% wyższa dla rdzenia nanokrystalicznego niż dla rdzenia proszkowego. Z kolei, najniższą wartość stratności obserwuje się dla materiału ze sproszkowanego żelaza. Istotnym parametrem materiałów magnetycznych jest także temperatura Curie, która dla materiału ferrytowego jest prawie o 500°C niższa od temperatury Curie dla pozostałych materiałów.

Tabela 1. Wartości wybranych parametrów zastosowanych materiałów ferromagnetycznych [15, 16, 17]

Parametr	Materiał		
	SM-100	(-26)	M070
Względna przenikalność magnetyczna	10000	75	20000
Indukcja nasycenia $B_{sat}$ [T]	0,400	1,38	1,2
Stratność $P_v$ [mW/cm <sup>3</sup> ] przy 100 kHz	Brak danych	75	882
Temperatura Curie $T_c$ [°C]	120	750	600

### Układ pomiarowy

W celu zbadania wpływu składowej stałej prądu polaryzującego na indukcyjność dławików z rdzeniami hybrydowymi, zastosowano znany z literatury układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2 [18]. Wykorzystując zaproponowany układ pomiarowy zbadano także wpływ składowej stałej prądu na indukcyjność dławika z każdym rdzeniem będącym częścią rdzenia hybrydowego oraz wpływ składowej stałej prądu na temperaturę rdzenia hybrydowego oraz temperaturę każdego rdzenia będącego jego częścią. Na rdzenie pojedyncze nawinięto taką samą liczbę zwojów jak w przypadku rdzenia hybrydowego.



Rys.2. Układ do pomiaru zależności parametrów dławika od składowej stałej prądu

W układzie tym źródło napięciowe  $V_{DC}$  wymusza przepływ składowej stałej prądu, ograniczanej przez rezystor R i monitorowanej za pomocą amperomierza UNIT T-804 [19]. Dławik L o indukcyjności 2 mH służy do tłumienia składowej zmiennej prądu płynącego przez zasilacz, a kondensator C o wartości 4,7  $\mu F$  zastosowano

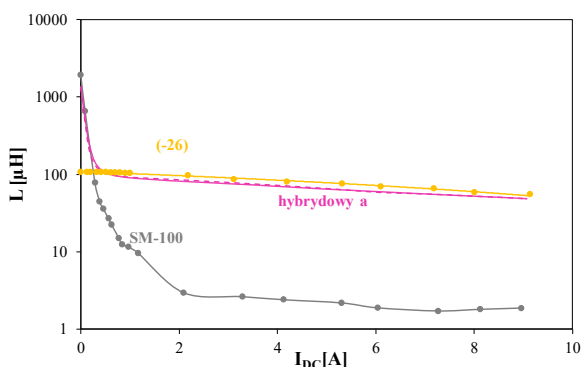
do zabezpieczenia mostka RLC przed składową stałą prądu. Badany dławik oznaczono jako DUT, a pomiar jego parametrów realizowany jest za pomocą mostka automatycznego MOTECH MT4010 [20]. Z kolei, pirometr typu PT-3S [21] zastosowano do rejestracji temperatury rdzenia i uzwojenia.

W celu uzyskania wiarygodnych wyników pomiaru, zaproponowana metoda pomiarowa wymagała zastosowania dławika tłumiącego L o indukcyjności znacznie większej od indukcyjności dławika badanego. Dodatkowo, w czasie pomiarów mostek RLC pracował w trybie pomiaru indukcyjności w szeregowym układzie zastępczym i generował napięcie o amplitudzie wynoszącej 1V.

### Wyniki badań

Wykorzystując układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2 przeprowadzono badania wpływu składowej stałej prądu na indukcyjność dławików opisanych w rozdziale 2. Dodatkowo zbadano wpływ składowej stałej prądu na temperaturę rdzeni wspomnianych elementów.

Na rysunku 3 przedstawiono zmierzoną zależność indukcyjności dławika zawierającego rdzeń hybrydowy (hybrydowy a – kolor różowy), dławika zawierającego pojedynczy rdzeń ferrytowy (SM-100 – kolor szary) oraz dławika zawierającego pojedynczy rdzeń wykonany ze sproszkowanego żelaza (-26 – kolor żółty) od składowej stałej prądu polaryzującego. Dodatkowo linią przerywaną zaznaczono zależność  $L(I_{DC})$  dławika z rdzeniem hybrydowym, dla którego zastosowano klej termo-elektrycznie przewodzący a linią ciągłą - zależność  $L(I_{DC})$  dławika hybrydowego bez zastosowania kleju pomiędzy rdzeniami.



Rys.3. Zależność indukcyjności dławika z rdzeniem hybrydowym a, dławika z rdzeniem ferrytowym i dławika z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza od składowej stałej prądu

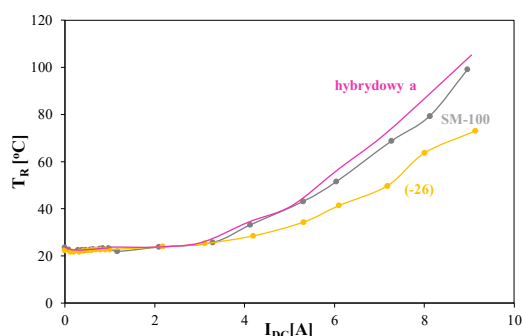
Z zależności przedstawionej na rysunku 3 można zauważyć, że zastosowanie kleju termo-elektrycznie przewodzącego nie wpływa na zależność  $L(I_{DC})$  dławika hybrydowego. Dlatego w dalszej części niniejszego rozdziału rozważa się przypadek dławika z rdzeniami hybrydowymi bez zastosowania kleju w miejscu styku między rdzeniami.

Dodatkowo, jak można zauważyć zależność indukcyjności dławika zawierającego rdzeń ferrytowy SM-100 jest silnie malejącą funkcją prądu, przede wszystkim dla  $I_{DC} < 2$  A. Obserwuje się, że wartość indukcyjności dławika z rdzeniem ferrytowym spada prawie 800 razy. Natomiast dla  $I_{DC} > 2$  A indukcyjność dławika z rdzeniem ferrytowym uzyskuje wartość ok. 2μH.

Z kolei, indukcyjność dławika zawierającego rdzeń ze sproszkowanego żelaza również maleje ze wzrostem składowej stałej prądu jednak zależność  $L(I_{DC})$  w tym przypadku nie jest tak silna.

Z kolei, z zależności indukcyjności dławika z rdzeniem hybrydowym od składowej stałej prądu można zauważyć, że indukcyjność tego dławika jest silnie malejącą funkcją prądu tylko dla  $I_{DC} < 0,1$  A. Powyżej tej wartości indukcyjność dławika również maleje, przy czym jej wartość przy składowej stałej prądu równej ok. 9 A jest o ok. 8% niższa od wartości indukcyjności dławika z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza i prawie 25 razy wyższa od indukcyjności dławika z rdzeniem ferrytowym. Zastosowanie rdzenia hybrydowego pozwoliło na uzyskanie wyższych wartości indukcyjności niż dla dławika zawierającego rdzeń ferrytowy w całym rozważanym zakresie zmian składowej stałej prądu. Uzyskano także wyższe wartości indukcyjności dławika z rdzeniem ferrytowym niż dla dławika zawierającego rdzeń wykonany ze sproszkowanego żelaza w zakresie składowej stałej prądu nieprzekraczającej 0,1 A.

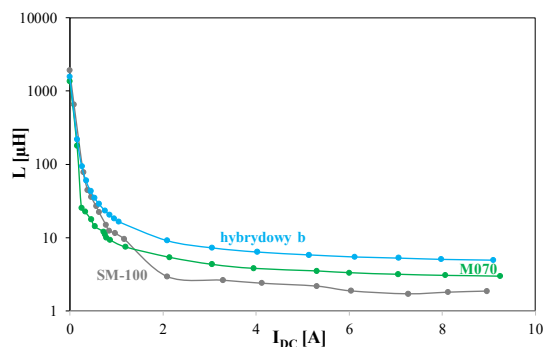
Na rysunku 4 przedstawiono zależność temperatury rdzenia hybrydowego (hybrydowy a – kolor różowy), pojedynczego rdzenia ze sproszkowanego żelaza (-26 – kolor żółty) oraz pojedynczego rdzenia ferrytowego (SM-100 – kolor szary) dławika od składowej stałej prądu.



Rys.4. Zależność temperatury rdzenia hybrydowego a i jego komponentów

Jak można zauważyć na rys.4, wraz ze wzrostem składowej stałej prądu rośnie temperatura rdzenia dławika dla  $I_{DC} > 3$  A. Przy składowej stałej prądu polaryzującego wynoszącego ok. 9 A obserwuje się, że najwyższą temperaturę uzyskał dławik z rdzeniem hybrydowym - o ok. 5°C wyższą od temperatury dławika z rdzeniem ferrytowym i około 20 °C wyższą od dławika z rdzeniem wykonanym ze sproszkowanego żelaza.

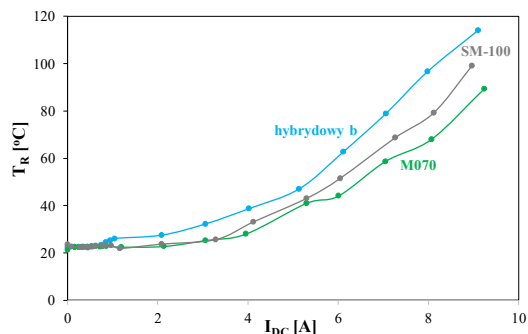
Na rysunku 5 przedstawiono zmierzone zależności indukcyjności dławika zawierającego rdzeń hybrydowy (hybrydowy b – kolor niebieski), dławika zawierającego pojedynczy rdzeń ferrytowy (SM-100 – kolor szary) oraz dławika zawierającego pojedynczy rdzeń nanokrystaliczny (M070 - kolor zielony) od składowej stałej prądu polaryzującego.



Rys.5. Zależność indukcyjności dławika z rdzeniem hybrydowym b, dławika z rdzeniem ferrytowym i dławika z rdzeniem nanokrystalicznym od składowej stałej prądu

Z zależności indukcyjności rozważanych dławików od składowej stałej prądu polaryzującego można zauważyć, że indukcyjność wszystkich rozważanych dławików silnie maleje ze wzrostem składowej stałej prądu. Największy wpływ składowej stałej prądu na zależność  $L(I_{DC})$  obserwuje się dla  $I_{DC} < 2$  A. Obserwuje się także, że indukcyjność wszystkich rozważanych dławików przy składowej stałej prądu  $I_{DC} = 0$  uzyskuje podobne wartości. Zastosowanie rdzenia hybrydowego do budowy dławika pozwoliło na uzyskanie wartości indukcyjności wyższych o około 50 % w porównaniu z dławikiem zawierającym rdzeń nanokrystaliczny i ponad dwukrotnie wyższej od dławika zawierającego rdzeń ferrytowy przy  $I_{DC} > 2$  A.

Na rysunku 6 przedstawiono zależność temperatury rdzenia „hybrydowego b”, rdzenia nanokrystalicznego M070 oraz rdzenia ferrytowego SM-100 od składowej stałej prądu polaryzującego.



Rys.6. Zależność temperatury rdzenia hybrydowego b i jego komponentów

Zgodnie z oczekiwaniami zależność temperatury rozważanych rdzeni jest rosnącą funkcją prądu polaryzującego. Przy składowej stałej prądu polaryzującego wynoszącego ok. 9 A obserwuje się, że najwyższą temperaturę uzyskał dławik z rdzeniem hybrydowym - o ok. 15°C wyższą od temperatury dławika z rdzeniem ferrytowym i około 25 °C wyższą od dławika z rdzeniem nanokrystalicznym.

## Podsumowanie

W pracy zaproponowano nowe rozwiązanie dławika zawierającego rdzeń hybrydowy w postaci dwóch połączonych ze sobą rdzeni o jednakowych rozmiarach wykonanych z różnych materiałów ferromagnetycznych. Wykorzystując znany z literatury układ pomiarowy przeprowadzono pomiary właściwości zaproponowanych dławików w funkcji składowej stałej prądu. Mierzono indukcyjność dławików z rozważanymi rdzeniami oraz ich temperaturę.

Z przeprowadzonych badań wynika, że dławik z rdzeniem hybrydowym będący połączeniem rdzenia ferrytowego oraz rdzenia ze sproszkowanego żelaza uzyskał wyższe wartości indukcyjności w całym rozważanym zakresie prądu polaryzującego, co oznacza, że dominujący wpływ na parametry tego rdzenia hybrydowego ma rdzeń ze sproszkowanego żelaza. Co ciekawe dla niskich wartości składowej stałej prądu uzyskano wartości indukcyjności dużo wyższe od indukcyjności dławika z pojedynczym rdzeniem wykonanym ze sproszkowanego żelaza. Z kolei z wyników badań dławika zawierającego rdzeń hybrydowy ferrytowo – nanokrystaliczny obserwuje się, że zgodnie z oczekiwaniami indukcyjność nowego dławika jest najwyższa w porównaniu z indukcyjnością dławików z pojedynczymi rdzeniami, jednak w tym przypadku nie uwidacznia się dominujący charakter żadnego z zastosowanych rdzeni do budowy dławika hybrydowego.

Z przeprowadzonych badań można zauważyć także, że stosowanie dławika z rdzeniem ferrytowo – nanokrystalicznym generuje wyższą wartość temperatury rdzenia o około 10 % w porównaniu z dławikiem hybrydowym zawierającym rdzeń ferrytowo – proszkowy. Dławiki takie mogą znaleźć zastosowanie w układach wymagających dużej wartości indukcyjności w zakresie niskich wartości prądu oraz układach wrażliwych na zmiany prądu jak np. przy równoległymłączeniu tyrystorów.

**Autorzy:** dr inż. Kalina Detka, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.detka@we.umg.edu.pl; student Sebastian Ligęza, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: sebastianligeza93@gmail.com.

## LITERATURA

- [1] Bariik R., Nowak M., *Energoelektronika elementy podzespoły układy*, Politechnika Warszawska, 2014
- [2] Górecki P., Górecki K.: *Methods of fast analysis of DC-DC converters-a review*, Electronics, Vol.10, No.23, 2021, 2920; <https://doi.org/10.3390/electronics10232920>
- [3] Kazimierczuk M., *High-Frequency Magnetic Components*, Wiley, 2014
- [4] Górecki K., Górecki P., Zarębski J.: *Measurements of Parameters of the Thermal Model of the IGBT Module*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 68, No. 12, 2019, pp. 4864-4875, doi: 10.1109/TIM.2019.2900144
- [5] Bisewski D., Zarębski J.: *Investigations of thermal parameters of GaAs and SiC MESFETs*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 87, Nr.1, 2011, s. 271-274
- [6] Tumański S., *Handbook of Magnetic Measurements*, Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2011
- [7] Van den Bossche A., Valchev VC., *Inductor and Transformers for Power Electronic*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.
- [8] Detka K., Górecki K.: *Modelling power losses in an inductor contained in the boost converter*, Proceedings 2018 IEEE 12th International Conference On Compatibility, Power Electronics And Power Engineering (Cpe-Powereng 2018), Doha, Qatar, doi: 10.1109/CPE.2018.8372564
- [9] Detka K., Górecki K.: *Influence of the Size and Shape of Magnetic Core on Thermal Parameters of the Inductor*, Energies, Vol.13, No.15, 2020, 3842, doi: 10.3390/en13153842
- [10] Detka K., Górecki K.: *The methods of measurement the power losses in the core of inductor*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 95, Nr. 9, 2019, s.150-153, doi: 10.15199/48.2019.09.31
- [11] Tanaka M., Shimura K., Sato M., Mizuno T., Matsuoka T.: *Hybrid inductor for improving gain attenuation characteristics of a Pi filter circuit*, Energy Reports, Vol. 6, No. 9, 2020, pp. 446-451, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.215>
- [12] Sakaki Y.: *An inductor/capacitor hybrid made of ferrite only*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 5, 1992, pp. 3009-3011.
- [13] Liu C.: *Torque ripple reduction of synchronous reluctance machine by using asymmetrical barriers and hybrid magnetic core*, CES Transactions on Electrical Machines and Systems Vol. 5, No.1, 2021, pp. 13-20, doi: 10.30941/CESTEMS.2021.00003.
- [14] Ismagilov F., Vavilov V., Gusakov D.: *Hybrid Magnetic Core for Perspective Supply System of the Aircraft*, 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18738285, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8729131
- [15] Dane katalogowe materiału SM-100 [https://en.aet.com.pl/Portals/en/ZelNet\\_HermesNet/ProductFiles/W%20%20%81A%20%20%9ACIWO%20%20%9ACI%20MATERIA%20%20%81U%20SM-100.pdf](https://en.aet.com.pl/Portals/en/ZelNet_HermesNet/ProductFiles/W%20%20%81A%20%20%9ACIWO%20%20%9ACI%20MATERIA%20%20%81U%20SM-100.pdf) dostęp 05.04.2022
- [16] Dane katalogowe materiału M070: <https://feryster.pl/rdzenie-rt> Dostęp 05.04.2022.
- [17] Dane katalogowe materiały (-26) <https://feryster.pl/rdzenie-proszkowe-rtp>, Dostęp 05.04.2022.
- [18] Detka K., Górecki K., Grzejszczak P., Bariik R.: *Modeling and Measurements of Properties of Coupled Inductors*, Energies, Vol. 14, No. 14, 4088, doi: 10.3390/en14144088
- [19] Nota katalogowa multimetru UT804 <file:///C:/Users/Admin/Downloads/ut804-instr.pdf> dostęp 05.04.2022
- [20] Nota katalogowa mostka RLC [http://www.zfian.imif.uph.edu.pl/images/pliki\\_pdf/pliki/instr\\_sprzet/MIC4090.pdf](http://www.zfian.imif.uph.edu.pl/images/pliki_pdf/pliki/instr_sprzet/MIC4090.pdf) dostęp 05.04.2022
- [21] Nota katalogowa pirometru Optex Product Information <http://www.dewetron.cz/optex/katlisty/PT-3S.pdf>. Dostęp 05.04.2022.