

Wpływ materiału rdzenia na parametry elektryczne i ciepne dławików sprzężonych

Streszczenie. W pracy przeanalizowano właściwości dławików sprzężonych szeroko wykorzystywanych w układach energoelektronicznych. Zbadano wpływ materiału ferromagnetycznego użytego do budowy rdzenia rozważanego elementu na jego parametry elektryczne oraz ciepne. Do badań zastosowano dławiki zawierające rdzenie wykonane z materiału nanokrystalicznego M-070, ferrytu SM-100 oraz rdzenie ze sproszkowanego żelaza T106-26. Na rdzenie badanych dławików nawinięto 3 uzwojenia po 8 zwojów każde. Zbadano wpływ składowej stałej prądu na indukcyjność dławików sprzężonych oraz na temperaturę ich komponentów. Rozpatrzono 3 przypadki, w których uzwojenia były nawinięte w tym samym kierunku oraz jeden, w którym jedno z uzwojeń nawinięte było w kierunku przeciwnym.

Abstract. The paper analyzes the properties of coupled inductors widely used in power electronic circuits. The influence of ferromagnetic material used to construct the core of the considered element on its electrical and thermal parameters was investigated. To investigation used the inductors containing cores made of nanocrystalline material M-070, ferrite core SM-100, and powdered iron cores T106-26 and T106-2. Three windings of 8 turns each were wound on the cores of the investigated inductors. The influence of the DC component of the current on the inductance of the coupled inductors and the temperatures of their components was investigated. Three cases were considered in which the windings were wound in the same direction and one case where one of the windings was wounded in the opposite direction. (Influence of core material on electrical and thermal parameters of coupled chokes)

Słowa kluczowe: dławik sprzężony, indukcyjność, samonagrzewanie sprzężenia termiczne, temperatura rdzenia, temperatura uzwojenia
Keywords: coupled inductor, inductance, self-heating, thermal coupling, core temperature, winding temperature

Wstęp

Większość współczesnych urządzeń elektronicznych lub energoelektronicznych, takich jak systemy magazynowania energii elektrycznej, układy służące do eliminacji wysoko częstotliwościowych zaburzeń elektromagnetycznych (filtry EMI), pojazdy elektryczne czy systemy zintegrowane z odnawialnymi źródłami energii elektrycznej wymagają stosowania odpowiednich układów przekształcania energii elektrycznej [1, 2]. Układy te powinny charakteryzować się wysoką sprawnością energetyczną oraz wysokim współczynnikiem wzmocnienia napięciowego [3, 4, 5, 6]. Coraz częściej we wspomnianych układach wykorzystuje się elementy magnetyczne w postaci dławików sprzężonych. Stosuje się je przede wszystkim ze względu na niewielkie rozmiary oraz możliwości pracy przy znacznych prądach - rzędu kilkudziesięciu amperów. Dodatkowo, wartość współczynnika sprzężenia proponowanych przez producentów elementów sięga 0.995 [1, 4].

Jednak jak wynika z literatury [7 - 11] właściwości elementów magnetycznych, w tym dławików sprzężonych istotnie zależą od wielu czynników, np. rodzaju materiału ferromagnetycznego zastosowanego do budowy rdzenia tych elementów, sposobu ich uzwojenia itp. Dodatkowo, podczas pracy dławika obserwuje się wzrost temperatury jego komponentów na skutek zjawisk termicznych, tzn. samonagrzewania oraz wzajemnych sprzężeń termicznych pomiędzy komponentami rozważanego elementu. Skutkuje to wzrostem mocy traconej w elemencie i w konsekwencji wpływa na sprawność układu przekształcania energii elektrycznej.

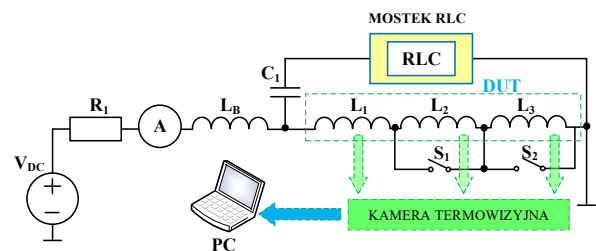
Przykładowo w pracy [12] przedstawiono badania wpływu składowej stałej prądu na indukcyjność dławika sprzężonego oraz wpływ częstotliwości na moduł i fazę jego impedancji. Dodatkowo, w cytowanej pracy przedstawiono model tego elementu. W rozważanym modelu nie uwzględniono występujących w tym elemencie zjawisk termicznych. Z kolei, w pracy [13] przeanalizowano wpływ zjawisk termicznych na właściwości dławików sprzężonych oraz zaproponowano sposób modelowania dławika sprzężonego uwzględniający te zjawiska. Jednak w pracach

[12, 13] ograniczono się jedynie do analizy właściwości dławika z rdzeniem nanokrystalicznym.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu zastosowanego materiału do budowy rdzenia dławika sprzężonego na jego parametry elektryczne oraz ciepne. Aby zrealizować ten cel przeprowadzono badania eksperymentalne wpływu składowej stałej prądu na indukcyjność rozważanego dławika oraz na wartości temperatury jego komponentów.

Zastosowane układy pomiarowe

W celu zbadania wpływu składowej stałej prądu na parametry dławika sprzężonego (indukcyjność, temperatura jego komponentów) zastosowano układ pomiarowy, którego schemat zaprezentowano na rysunku 1.



Rys.1. Układ do pomiaru parametrów elektrycznych i ciepnych dławika sprzężonego.

W zaprezentowanym układzie pomiarowym rezystor $R_1 = 4,7 \Omega$ służy do ograniczania wartości prądu polaryzującego badany dławik ze źródła zasilania V_{DC} . Wartość tego prądu mierzona jest za pomocą multimetru UNIT-T 803. Kondensator C_1 o pojemności $6,7 \mu F$ zastosowano w celu zabezpieczenia mostka pomiarowego przed składową stałą prądu, a dławik L_B o indukcyjności 5 mH służy do tłumienia składowej zmiennej prądu płynącego przez zasilacz V_{DC} . W celu zapewnienia wiarygodnego pomiaru indukcyjności badanego dławika należy zapewnić spełnienie warunku $L_B \gg L_{DUT}$ [14].

Do badań zastosowano dławiki sprzężone zawierające trzy uzwojenia, które omówiono w dalszej części pracy. Pomiar indukcyjności rozważanego elementu realizowany

był za pomocą mostka automatycznego RLC Motech MT4090 [15]. W zależności od położenia przełączników S_1 i S_2 badano odpowiednio indukcyjność dławika w przypadku, gdy prąd płynął tylko przez jedno uzwojenie L_1 , gdy prąd przepływał przez dwa uzwojenia L_{12} oraz gdy prąd przepływał przez trzy uzwojenia L_{123} . W czasie pomiarów mostek RLC pracował w trybie pomiaru indukcyjności w szeregowym układzie zastępczym. Amplituda napięcia o częstotliwości 200 kHz generowanego przez mostek RLC wynosiła 1V.

Z kolei, w celu zbadania wpływu składowej stałej prądu na temperaturę poszczególnych komponentów dławika w zależności od ułożenia przełączników S_1 i S_2 , zastosowano kamerę termowizyjną FLIR [16] połączoną z komputerem.

Badane elementy

W celu zbadania wpływu materiału ferromagnetycznego zastosowanego do budowy rdzeni dławików sprzężonych na ich parametry elektryczne oraz cieplne zbudowano 3 takie dławiki, na które nawinięto trzy uzwojenia po osiem zwojów każde za pomocą drutu miedzianego o średnicy 0,9 mm. Do badań zastosowano dławiki zawierające rdzenie toroidalne o podobnych rozmiarach tj. 26,9x14,5x11 (średnica zewnętrzna, średnica wewnętrzna, wysokość). Wykorzystano dławik z rdzeniem nanokrystalicznym (M-070), z rdzeniem ferrytowym (SM-100) oraz z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza (T106-26).

W dwóch przypadkach, tj. dla dławików z rdzeniami M-070 i SM-100 uzwojenia dławika były nawinięte w tym samym kierunku, natomiast w przypadku dławika z rdzeniem T106-26 jedno z uzwojeń było nawinięte w przeciwnym kierunku do pozostałych. Dodatkowo, należy zwrócić uwagę, że rdzenie ze sproszkowanego żelaza posiadają rozproszoną szczelinę powietrzną.

W Tabeli 1 zebrano parametry zastosowanych materiałów ferromagnetycznych [18, 19].

Tabela 1. Podstawowe parametry materiałów, z których wykonano rdzenie dławików sprzężonych [19].

Materiał	Indukcja nasycenia B_{sat} [T]	Przenikalność początkowa μ_i	Temperatura Curie T_c [°C]
SM-100	0,4	10000	120
M-070	1,2	80000	600
T106-26	1,38	75	750

Jak można zauważyć z danych zestawionych w Tabeli 1, rdzeń nanokrystaliczny charakteryzuje się najwyższą wartością przenikalności początkowej oraz temperatury Curie. Pozwala to na uzyskiwanie bardzo wysokich wartości indukcyjności rozważanych elementów, przy niewielkich ich rozmiarach. Z kolei, najniższą wartość przenikalności magnetycznej mają rdzenie wykonane ze sproszkowanego żelaza, jednak charakteryzują się one wysoką wartością temperatury Curie.

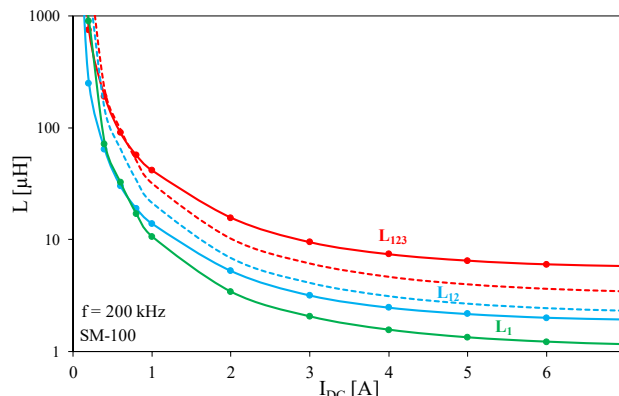
Jak wynika z literatury [18, 19] istotną wadą materiałów nanokrystalicznych i ferrytowych stosowanych do budowy rdzeni elementów magnetycznych jest to, że ich właściwości istotnie zależą od temperatury. Powoduje to zmianę nachylenia krzywej magnesowania i szybsze nasycenie się rdzenia w porównaniu do rdzeni wykonanych ze sproszkowanego żelaza.

Wyniki badań

Wykorzystując przedstawiony układ pomiarowy i badane dławiki sprzężone wykonano pomiar wpływu składowej stałej prądu polaryzującego na indukcyjność rozważanych dławików. Badania przeprowadzono dla składowej stałej prądu z zakresu od 0 do 10 A. Jednocześnie za pomocą kamery termowizyjnej połączonej do komputera rejestrowano temperatury wszystkich komponentów

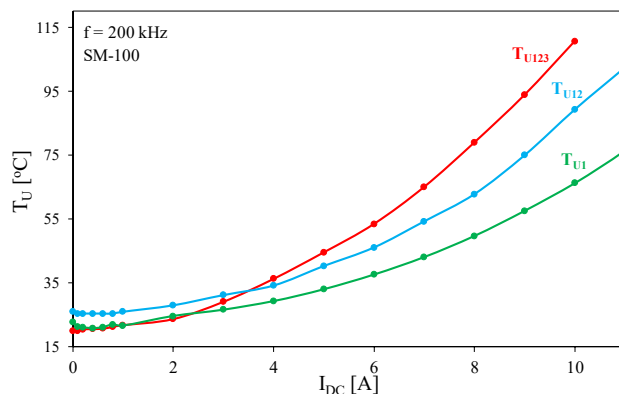
badanego elementu. Wyniki badań przedstawiono na rys. 2 -9. W opisie tych rysunków symbolem L_1 oznaczono przypadek kiedy prąd przepływał tylko przez jedno uzwojenie, symbolem L_{12} oznaczono indukcyjność dwóch szeregowo połączonych uzwojeń przez, które przepływał prąd oraz symbolem L_{123} oznaczono indukcyjność 3 szeregowo połączonych uzwojeń, przez które przepływał prąd. Zmierzone wartości indukcyjności odpowiednio L_1 , L_{12} i L_{123} oznaczono linią ciągłą, natomiast linią przerywaną oznaczono indukcyjność stanowiącą sumę dwóch (niebieski) lub trzech (czerwony) połączonych szeregowo uzwojeń bez uwzględnienia wzajemnych sprzężeń magnetycznych.

Na rysunku 2 przedstawiono zmierzoną zależność indukcyjności dławika sprzężonego zawierającego rdzeń ferrytowy od składowej stałej prądu polaryzującego.



Rys. 2. Zależność indukcyjności dławika sprzężonego z rdzeniem ferrytowym od składowej stałej prądu

Jak można zauważyć indukcyjność dławika z rdzeniem ferrytowym jest silnie malejącą funkcją prądu polaryzującego. W rozważanym zakresie zmian tego prądu wartość indukcyjności maleje nawet tysiąc krotnie. Obserwuje się, że zmierzona wartość indukcyjności dwóch szeregowo połączonych uzwojeń L_{12} przyjmuje o ponad 20% niższe wartości od sumy indukcyjności dwóch jednakowych cewek. To oznacza, że indukcyjność wzajemna między tymi cewkami wynosi około 10% wartości ich indukcyjności własnej. Z kolei, dla trzech szeregowo połączonych cewek sumaryczna indukcyjność jest o ponad 60% większa od sumy indukcyjności własnych poszczególnych uzwojeń. Oznacza to, że w tym przypadku indukcyjność wzajemna między poszczególnymi parami uzwojeń też osiąga 10% indukcyjności własnej tych uzwojeń.

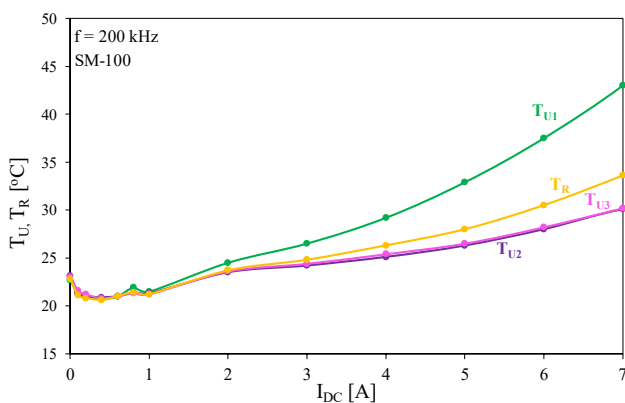


Rys.3. Zależność temperatury uzwojenia L_1 dławika sprzężonego z rdzeniem ferrytowym od składowej stałej prądu przy różnym zasilaniu uzwojeń

Na rysunku 3 przedstawiono zależność temperatury uzwojenia L_1 dławika sprzężonego z rdzeniem ferrytowym od prądu polaryzującego I_{DC} . Na rysunku tym T_{U1} oznacza temperaturę tego uzwojenia, gdy prąd przepływa tylko przez jedno uzwojenie, T_{U12} - temperaturę tego uzwojenia, gdy prąd przepływa przez dwa szeregowo połączone uzwojenia, a T_{U123} - dotyczy przypadku, gdy prąd przepływa jednocześnie przez 3 uzwojenia.

Można zauważyć (rys.3), że temperatura uzwojenia rośnie ze wzrostem prądu. Obserwuje się, że przy prądzie $I_{DC} = 10$ A temperatura T_{U1} wynosi ponad 60 °C, co jest spowodowane zjawiskiem samonagrzewania. Wzajemne sprzężenia cieplne między uzwojeniami powodują, że dodatkowy przyrost temperatury uzwojenia aż o 50 °C. Oznacza to, że wzajemne sprzężenia termiczne między uzwojeniami silniej wpływają na ich temperaturę niż samonagrzewanie.

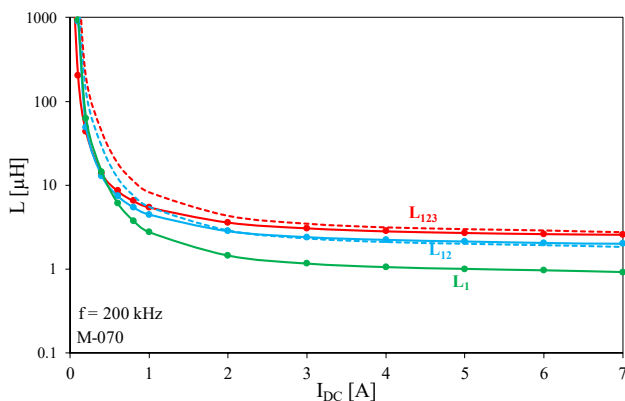
Na rysunku 4 zaprezentowano zależność temperatury poszczególnych komponentów dławika sprzężonego od składowej stałej prądu zasilającego jedynie uzwojenie L_1 .



Rys.4. Zależność temperatury komponentów dławika sprzężonego z rdzeniem ferrytowym od składowej stałej prądu płynącego tylko przez uzwojenie L_1

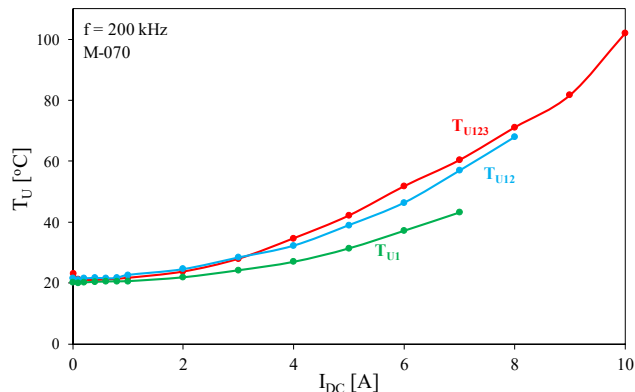
Jak widać z zależności temperatury poszczególnych uzwojeń T_{U1} , T_{U2} , T_{U3} oraz temperatury rdzenia T_R od prądu I_{DC} są funkcjami rosnącymi. Najwyższą wartość ma temperatura T_{U1} , która przy $I_{DC} = 7$ A osiąga 45 °C. Na uwagę zasługuje fakt, że ze wszystkich pozostałych komponentów badanego dławika, najwyższą temperaturę zarejestrowano dla rdzenia. Osiąga ona 32 °C. Temperatura obu pozostałych uzwojeń jest praktycznie identyczna osiągając maksymalnie 29 °C.

Z kolei na rysunkach 5-7 zilustrowano wpływ składowej stałej prądu polaryzującego na indukcyjności dławika z rdzeniem nanokrystalicznym oraz temperatury jego komponentów.



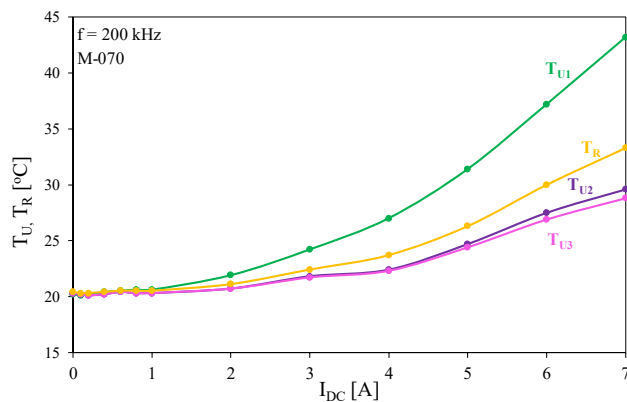
Rys.5. Zależność indukcyjności dławika sprzężonego z rdzeniem nanokrystalicznym od składowej stałej prądu

Z zależności $L(I_{DC})$ pokazanej na rys.5 można zauważyć, że wartości zmierzonych indukcyjności L_{12} i L_{123} w zakresie $I_{DC} > 2$ A są prawie takie same jak suma indukcyjności poszczególnych uzwojeń. Rozbieżność w wartościach rozpatrywanych indukcyjności nie przekracza 10%. Oznacza to, że dla dławika z rdzeniem nanokrystalicznym wartości indukcyjności wzajemnej są znacznie mniejsze od indukcyjności każdego z uzwojeń nie przekraczając 2% tej wartości.



Rys.6. Zależność temperatury uzwojenia L_1 dławika sprzężonego z rdzeniem nanokrystalicznym od składowej stałej prądu przy różnej liczbie zasilanych jednocześnie uzwojeń

Z zależności przedstawionej na rys. 6 można zauważyć, że różnica pomiędzy temperaturami uzwojenia T_{U1} , T_{U12} oraz T_{U123} przez które przepływa prąd jest mniejsza niż w przypadku dławika z rdzeniem ferrytowym i nie przekracza 10 °C. Wynika to z mniejszej wartości przewodności cieplnej rdzenia nanokrystalicznego umieszczonego w plastikowym korpusie.

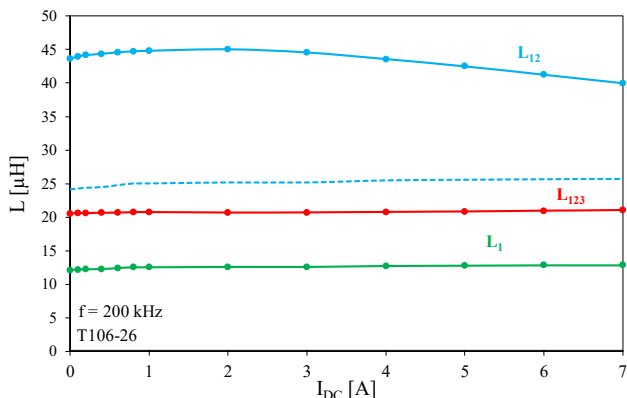


Rys.7. Zależność temperatury uzwojeń i rdzenia dławika sprzężonego z rdzeniem nanokrystalicznym od składowej stałej prądu przy zasilaniu jedynie uzwojenia L_1

Przedstawione zależności temperatury komponentów dławika sprzężonego z rdzeniem nanokrystalicznym (rys.7) wykazują podobny charakter i przyjmują podobne wartości do zależności zaprezentowanych na rys. 4. Również w rozważanym przypadku obserwuje się wpływ sprzężeń termicznych między komponentami dławika na temperaturę rdzenia i dwóch pozostałych uzwojeń, przez które nie przepływa prąd.

Na rysunkach 8-9 przedstawiono wpływ składowej stałej prądu polaryzującego na indukcyjność dławika z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza oraz temperatury jego komponentów przy zasilaniu jedynie uzwojenia L_1 . W rozważanym przypadku jedno z uzwojeń nawinięte zostało w przeciwnym kierunku. Z zależności $L(I_{DC})$ pokazanej na rys.5 można zauważyć, że wartości zmierzonych indukcyjności L_{12} i L_{123} w zakresie $I_{DC} > 2$ A są prawie takie

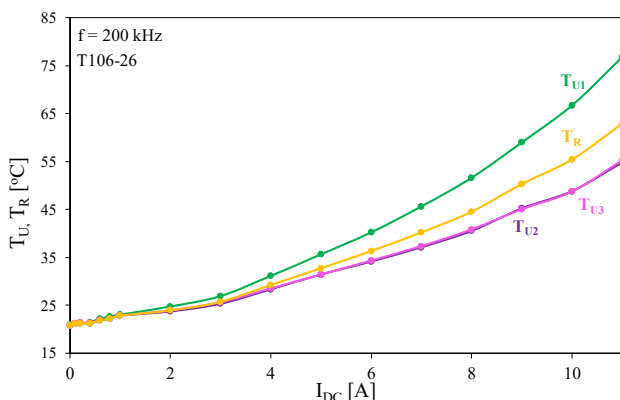
same jak suma indukcyjności poszczególnych uzwojeń. Rozbieżność w wartościach rozpatrywanych indukcyjności nie przekracza 10%. Oznacza to, że dla dławika z rdzeniem nanokrystalicznym wartości indukcyjności wzajemnej są znacznie mniejsze od indukcyjności każdego z uzwojeń nie przekraczając 2% tej wartości.



Rys. 8. Zależność indukcyjności dławika sprężonego z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza od składowej stałej prądu

Jak można zauważyć wszystkie zmierzone wartości indukcyjności dławika sprężonego z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza słabo zależą od prądu polaryzującego, co jest efektem występowania rozproszonej szczeliny powietrznej w jego rdzeniu. Dodatkowo, obserwuje się, że wartość indukcyjności wzajemnej jest duża, osiągając nawet 50% wartości indukcyjności własnej pojedynczych cewek, co widać porównując wartość zmierzoną indukcyjności L_{12} z podwojoną wartości indukcyjności L_1 . Różnica między nimi osiąga aż 80%, co oznacza, że indukcyjność wzajemna jest na poziomie aż 40% indukcyjności własnej. Widać także, że zgodnie z oczekiwaniem, nawinięcie jednego z uzwojeń w przeciwnym kierunku skutkuje uzyskaniem niższej wartości indukcyjności L_{123} w porównaniu do wartości indukcyjności szeregowo połączonych dwóch uzwojeń. W przypadku połączenia w tym samym kierunku wartość indukcyjności L_{123} powinna być znacznie wyższa od L_{12} .

Z kolei, na rysunku 9 przedstawiono zależność temperatury wszystkich komponentów dławika sprężonego z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza od składowej stałej prądu przy zasilaniu jedynie uzwojenia L_1 .



Rys. 9. Zależność indukcyjności dławika sprężonego z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza od składowej stałej prądu płynącego tylko przez uzwojenie L_1

Zgodnie z oczekiwaniem, zależność zaprezentowana na rysunku 9 ma podobny charakter do zależności temperatury komponentów dławika od składowej stałej prądu w przypadku omówionych wcześniej dławików sprężonych. Na uwagę zasługuje fakt, że w rozważanym przypadku przy

składowej stałej prądu $I_{DC} = 10A$ uzyskano wyższą wartość temperatury uzwojenia T_{U1} przez, które przepływał prąd oraz temperatury rdzenia o ponad $10^\circ C$ i $20^\circ C$ w porównaniu do temperatur komponentów omówionych wcześniej dławików.

Znając wartości temperatur komponentów rozważanych dławików oraz mocy wydzielanej w uzwojeniu można wyznaczyć rezystancję termiczną uzwojenia R_{thU} oraz wzajemną rezystancję termiczną pomiędzy rdzeniem a uzwojeniem R_{thUR} korzystając z zależności zaproponowanej w pracach [13, 20].

W charakterze przykładu w Tabeli 2 zestawiono przykładowe wartości wspomnianych rezystancji termicznych dla badanych dławików wyznaczone na podstawie pomiarów przeprowadzonych dla rozważanych elementów przy składowej stałej prądu równej 8 A.

Tabela 2. Wartości rezystancji termicznych badanych dławików.

	M-070	SM-100	T106-26
R_{thU} [K/W]	28,31	27,33	29,16
R_{thUR} [K/W]	16,30	15,76	21,96
R_{thUU} [K/W]	10,11	11,57	18,93

Z danych przedstawionych w Tabeli 2 można zauważyć, że wartości rezystancji termicznych uzwojeń R_{thU} wszystkich rozważanych dławików mają podobne wartości równe około 28 K/W. Obserwuje się natomiast istotną zależność materiału zastosowanego do budowy rdzenia dławika sprężonego na wzajemną rezystancję termiczną pomiędzy rdzeniem a uzwojeniem R_{thUR} . W przypadku materiału ferrytowego i nanokrystalicznego R_{thUR} przyjmuje ona podobne wartości, natomiast zastosowanie rdzenia ze sproszkowanego żelaza skutkuje wzrostem rozważanego parametru o ponad 40%. Podobnie wzajemna rezystancja termiczna między uzwojeniami R_{thUU} przyjmuje zbliżone wartości dla dławików z rdzeniem ferrytowym i nanokrystalicznym. Wartość tego parametru dla dławika z rdzeniem ze sproszkowanego żelaza jest o około 40% wyższa od wartości R_{thUU} pozostałych dławików.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych wpływu materiału ferromagnetycznego zastosowanego do budowy rdzenia dławika sprężonego na jego parametry elektryczne i cieplne. Badania przeprowadzono dla 3 dławików sprężonych zawierających rdzeń nanokrystaliczny, ferrytowy i ze sproszkowanego żelaza. Wszystkie rdzenie miały podobne rozmiary i nawinięto na nie 3 identyczne uzwojenia po 8 zwojów każde.

Z przeprowadzonych badań można zauważyć, że zgodnie z oczekiwaniem rodzaj zastosowanego materiału istotnie wpływa na zależność $L(i)$, co związane jest między innymi z różną wartością przenikalności magnetycznej tych rdzeni. Dodatkowo, z faktu występowania rozproszonej szczeliny powietrznej w rdzeniu ze sproszkowanego żelaza rozważana zależność w zasadzie nie zależy od składowej stałej prądu w rozpatrywanym zakresie. Zaobserwowano także, że wartości indukcyjności wzajemnej w relacji do indukcyjności własnej uzwojeń są największe dla rdzenia ze sproszkowanego żelaza (osiągając 40% indukcyjności własnej) a najmniejsze - dla dławika z rdzeniem nanokrystalicznym (osiągając zaledwie 2% indukcyjności własnej). Potwierdzono też, że kierunek nawinięcia uzwojenia także wpływa na wartość sumarycznej indukcyjności połączonych uzwojeń badanych dławików.

Obserwuje się także silne sprzężenia termiczne pomiędzy komponentami rozpatrywanych elementów. Na uwagę zasługuje fakt, że w przypadku dławika zawierającego rdzeń ferrytowy uzyskano wartość

temperatury rdzenia wynikającej ze sprzężenia termicznego pomiędzy nim a uzwojeniem T_{U1} przez, które przepływał prąd o 20°C niższą niż w przypadku zastosowania rdzenia nanokrystalicznego. Warto także wskazać, że dla dławika z rdzeniem ferrytowym i nanokrystalicznym wartości rezystancji termicznych uzwojenia i wzajemnej rezystancji termicznej między rdzeniem a uzwojeniem przyjmują podobne wartości. Natomiast zastosowanie rdzenia ze sproszkowanego żelaza skutkowało uzyskaniem wyższej o 40 % od wartości tego parametru dla pozostałych rozważanych dławików. To oznacza, że rdzeń ze sproszkowanego żelaza wykazuje najsilniejsze sprzężenia cieplne między uzwojeniami.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki mogą posłużyć projektantom układów przekształcania energii elektrycznej w celu doboru odpowiedniego materiału do budowy dławika sprzężonego uwzględniając charakter zależności $L(i)$ oraz wpływ sprzężeń termicznych na komponenty tego elementu w szerokim zakresie wartości prądu polaryzującego.

Autorzy: dr hab. inż. Kalina Detka, prof. UMG, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.detka@we.umg.edu.pl; k.gorecki@we.umg.edu.pl; mgr inż. Paweł Bokota, absolwent Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, project engineer, Deep project management GmbH.

LITERATURA

- [1] M. Harasimczuk.: Przekształtnik podwyższający napięcie z dławikiem sprzężonym do zastosowań w fotowoltaice, *Poznan University of Technology Academic Journals*, No. 89, 2017, pp.385 – 394, doi 10.21008/j.1897-0737.2017.89.0036
- [2] R. Barlik, M. Nowak: Energoelektronika elementy podzespoły układy, Politechnika Warszawska, 2014
- [3] K. Kroics.: Design and Analysis of Directly Coupled Inductor for Application in GaN Based Interleaved DC-DC converter, PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 7-8 July 2020, Germany
- [4] Super dławiki sprzężone, dostęp online 25.04.2023 <https://evertiq.pl/design/21845>
- [5] M. Hirakawa, M. Nagano, Y. Watanabe, K. Andoh, S. Nakatomi and S. Hashino, High power density DC/DC converter using the close-coupled inductors, *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, USA, 2009, pp. 1760-1767, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316389.
- [6] M. Forouzesh, Y. Shen, K. Yari, Y. P. Siwakoti and F. Blaabjerg, High-Efficiency High Step-Up DC–DC Converter With Dual Coupled Inductors for Grid-Connected Photovoltaic Systems, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 7, pp. 5967-5982, July 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2746750
- [7] R. Barlik, P. Grzejszczak, M. Zdanowski. Determination of the basic parameters of the high-frequency planar transformer., *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92, nr 6, 2016, s. 71-78, doi:10.15199/48.2016.06.13
- [8] K. Górecki, J. Zarebski, K. Detka, Application of the electrothermal average inductor model for analyses of boost converters, *2015 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES)*, Torun, Poland, 2015, pp. 417-421, doi: 10.1109/MIXDES.2015.7208554.
- [9] K. Detka, K. Górecki, Modelling power losses in an inductor contained in the boost converter, *2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*, Doha, Qatar, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPE.2018.8372564.
- [10] K. Detka, K. Górecki, Influence of the size and the material of the magnetic core on thermal properties of the inductor, *Microelectronics Reliability*, Vol. 129, 2022, 114458, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114458>.
- [11] T. Daszczyński, M. Zdanowski. Vector fitting implementation for use of modeling of reduced self-capacitance inductor, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, Nr 8, 2013, s. 329-332.
- [12] K. Detka, K. Górecki, P. Grzejszczak, R. Barlik, Modeling and Measurements of Properties of Coupled Inductors. *Energies*, Vol. 14, No. 14, 2021, 4088, <https://doi.org/10.3390/en14144088>
- [13] K. Detka, K. Górecki, Electrothermal Model of Coupled Inductors with Nanocrystalline Cores. *Energies*. Vol. 15, No. 1, 2022, 224, <https://doi.org/10.3390/en15010224>
- [14] A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki, *Metrologia elektryczna*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000.
- [15] Instrukcja obsługi Mostka RLC MOTECH, dostęp online 25.04.2023, https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi6nqeH-vf-AhXtBxAlHcwlCPAQFnoECA YQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.zfian.imif.uph.edu.pl%2Fimages%2Fpliki_pdf%2Fpliki%2Finstr_sprzet%2FMIC4090.pdf&usg=AOvVaw16cF_67Xs_dDSzIIFe6rREU
- [16] ETS 320 Kamera termowizyjna FLIR, dostęp online 25.04.2023, <https://www.farnell.com/datasheets/2282680.pdf-ets320-manual.pdf&usg=AOvVaw21V-91Yliq-Vj0s-GyvPSA>
- [17] Rdzenie ferromagnetyczne, dostęp online 25.04.2023 <https://feryster.pl/filtry-emi-rdzenie>
- [18] M. S. Rylko, K. J. Hartnett, J. G. Hayes, M. G. Egan, Magnetic Material Selection for High Power High-Frequency Inductors in DC-DC Converters, *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Washington, DC, USA, 2009, pp. 2043-2049, doi: 10.1109/APEC.2009.4802955.
- [19] L. Solimene, C. S. Ragusa, S. Musumeci, The role of materials in the optimal design of magnetic components for DC–DC converters, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 564, 2022, 170038.
- [20] E. J. Diebold, W. Luft. Transient thermal impedance of semiconductor devices, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, Vol. 79, No.6, 1961, pp. 719-726.