

**Krzysztof Górecki, Katarzyna Górecka**  
**Katedra Elektroniki Morskiej, Akademia Morska w Gdyni**  
**Kalina Detka**  
**Pomorska Wyższa Szkoła Nauk Stosowanych w Gdyni**

## POMIARY PARAMETRÓW TERMICZNYCH DŁAWIKÓW

### MEASUREMENTS OF THERMAL PARAMETERS OF CHOKING-COILS

**Streszczenie:** Dławiki są niezbędnym komponentem układów impulsowego przetwarzania energii elektrycznej. Jak wynika z literatury, temperatura w istotny sposób wpływa na charakterystyki i parametry eksploatacyjne elementów i urządzeń elektronicznych oraz na czas ich pracy do uszkodzenia. Temperatura dławika rośnie wraz z temperaturą otoczenia oraz z mocą strat tego elementu. W celu wyznaczenia temperatury dławika przy znanym przebiegu mocy wydzielanej w tym elemencie niezbędna jest informacja o przebiegu jego przejściowej impedancji termicznej. W pracy zaproponowano elektryczną metodę pomiaru przejściowej impedancji termicznej dławika przy wykorzystaniu rezystancji uzwojenia w charakterze parametru termoczułego oraz pirometryczną metodę pomiaru wzajemnej przejściowej impedancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem. Opisano koncepcję pomiaru i konstrukcję układu pomiarowego realizującego opracowaną metodę. Przeanalizowano również wpływ mocy traconej w uzwojeniu dławika na rozkład temperatury w rdzeniu i w uzwojeniu w stanie termicznie ustalonym. Rozważania teoretyczne zilustrowano wynikami pomiarów wybranych konstrukcji dławików. W oparciu o uzyskane wyniki pomiarów sformułowano zalecenia dla konstruktorów układów elektronicznych dotyczące chłodzenia dławików.

**Abstract:** Choking-coils are a requisite components of the switching converters of the electrical energy. As it is known from literature, the temperature influences in the essential manner to the characteristics and exploitive parameters of components and electronic equipment, as well as it determines the lifetime of elements and electronic equipment. Temperature of the choking-coil increases together with the ambient temperature and with an increase of power losses dissipated in this element. In order to calculate the temperature of the choking-coil at the well-known course of the power dissipated in this element, the transient thermal impedance of the choking-coil is indispensable. In the paper, the electrical method of the measurement of the transient thermal impedance of the choking-coil is proposed. In this method the resistance of the winding of the choking-coils is used as an thermally sensitive parameter. The idea of the measurement method and the construction of the measuring set were described. Additionally, the influence of the power dissipated in winding of the choking-coil on the temperature distribution in the core and in the winding in the steady state was analyzed. Theoretical considerations were illustrated with the results of measurements of selected constructions of choking-coils. Basing on the obtained measurements results the suggestions for the designers of electronic circuits connected with the cooling of choking-coils are formulated.

**Słowa kluczowe:** dławiki, parametry cieplne, pomiary

**Keywords:** choking-coils, thermal parameters, measurements

### 1. Wstęp

Dławiki są bardzo ważnymi komponentami układów impulsowego przetwarzania energii elektrycznej [1], które są wykorzystywane do magazynowania energii. Elementy te zawierają rdzeń wykonany z materiału ferromagnetycznego oraz uzwojenie z drutu miedzianego. Na skutek przepływu prądu przez uzwojenie oraz przemagnesowywania rdzenia występują w dławiku straty energii, która jest zamieniana na ciepło. Ciepło generowane w rdzeniu i w uzwojeniu powoduje wzrost temperatury dławika ponad temperaturę otoczenia na skutek zjawiska samonagrzewania

oraz wzajemnych sprzężeń termicznych między rdzeniem a uzwojeniem [2, 3, 4].

W celu scharakteryzowania zdolności elementu elektronicznego do rozpraszania generowanego w nim ciepła stosuje się parametry termiczne. W pracach [3, 4, 5] zaproponowano wykorzystanie w tym celu przejściowej impedancji termicznej  $Z_{th}(t)$ , definiowanej wzorem o postaci analogicznej, jak dla elementów półprzewodnikowych [6, 7, 8, 9]

$$Z_{th}(t) = \frac{T_j(t) - T_a}{P} \quad (1)$$

gdzie  $T_j$  oznacza temperaturę wnętrza elementu,  $T_a$  – temperaturę otoczenia, zaś  $P$  – amplitudę

uskoku mocy wydzielanej w badanym elemencie. Wartość przejściowej impedancji termicznej w stanie ustalonym równa jest rezystancji termicznej  $R_{th}$ .

Jak zaznaczono powyżej, w dławiku występuje uzwojenie o temperaturze  $T_U$  oraz rdzeń o temperaturze  $T_R$ . Wartości tych temperatur zależą zarówno od mocy wydzielanej w każdym z wymienionych komponentów, jak i od wzajemnych sprzężeń termicznych między rdzeniem a uzwojeniem. Dlatego zdefiniowano własną przejściową impedancję termiczną rdzenia  $Z_{thR}(t)$  i uzwojenia  $Z_{thU}(t)$  oraz wzajemną przejściową impedancję termiczną między uzwojeniem a rdzeniem  $Z_{thUR}(t)$  [3, 4]. W literaturze można znaleźć opisy wielu metod pomiaru przejściowej impedancji termicznej elementów półprzewodnikowych [6, 7, 8, 10, 11, 12], ale do tej pory nie opisano metody pomiaru wymienionych parametrów termicznych dławika.

W kolejnych rozdziałach przedstawiono koncepcję metody pomiarowej oraz wyniki pomiarów parametrów termicznych wybranych dławików.

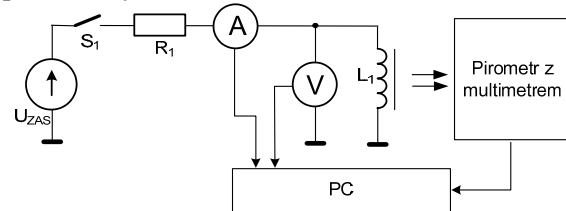
## 2. Koncepcja metody pomiarowej

Zgodnie z definicją przejściowej impedancji termicznej, danej wzorem (1), pomiar tego parametru wymaga rejestrowania czasowego przebiegu temperatury wnętrza badanego elementu przy pobudzeniu go uskokiem mocy [7, 11, 12].

W przypadku pobudzenia dławika prądem stałym energia tracona jest jedynie w uzwojeniu, ponieważ straty energii w rdzeniu występują jedynie przy zmiennym polu magnetycznym. Wartość temperatury uzwojenia można wyznaczyć m.in. mierząc rezystancję uzwojenia, która zmienia się proporcjonalnie do temperatury [13]. Z kolei, temperatura rdzenia i uzwojenia może być mierzona przy wykorzystaniu detektora promieniowania podczerwonego [7, 14].

Schemat układu do pomiaru przejściowej impedancji termicznej uzwojenia oraz wzajemnej przejściowej impedancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem dławika pokazano na rys.1. Układ ten zawiera zasilacz  $U_{ZAS}$ , przełącznik elektroniczny  $S_1$ , badany dławik  $L_1$ , rezystor  $R_1$  ograniczający wartość prądu dławika, woltomierz cyfrowy i amperomierz cyfrowy połączone z komputerem PC rejestrującym wyniki pomiarów oraz

pirometr PT-3S [15]. Do pomiaru napięcia i prądu oraz rejestrowania wskazań pirometru wykorzystano multimetry APPA 207 sprzężone z komputerem PC za pomocą interfejsu USB. W celu zminimalizowania wpływu rezystancji doprowadzeń na wynik pomiaru zastosowano styki Kelwina do połączenia dławika z układem pomiarowym.



Rys.1 Schemat układu pomiarowego

Pomiar przejściowej impedancji termicznej uzwojenia dławika oraz wzajemnej przejściowej impedancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem wykonywany jest w trzech etapach.

W pierwszym etapie pomiaru mierzona jest rezystancja uzwojenia dławika  $R_{L1}$  przy małej wartości prądu dławika  $I_1$ , niepowodującej wzrostu temperatury uzwojenia ponad temperaturę otoczenia  $T_a$ . W oparciu o uzyskaną wartość rezystancji  $R_{L1}$  oraz znaną wartość temperaturowego współczynnika zmian rezystywności miedzi  $\alpha_{Cu}$  określana jest wartość nachylenia  $F$  charakterystyki termometrycznej  $R_{L1}(T)$ . Nachylenie to dane jest wzorem

$$F = R_{L1} \cdot \alpha_{Cu} \quad (2)$$

W drugim etapie mierzone są synchronicznie czasowe przebiegi napięcia na dławiku  $u_2(t)$  i prądu dławika  $i_2(t)$  po zwarceniu przełącznika  $S_1$  w chwili  $t = 0$  oraz rejestrowany jest czasowy przebieg temperatury rdzenia  $T_R(t)$  za pomocą pirometru. W etapie tym prąd  $i_2$  powinien być na tyle duży, aby zapewnić znaczny przyrost temperatury uzwojenia  $T_U$  oraz temperatury rdzenia  $T_R$  ponad temperaturę otoczenia  $T_a$ . Drugi etap pomiaru trwa do uzyskania stanu termicznie ustalonego, który jest wykrywany przez ograniczenie zmian wartości mierzonej temperatury rdzenia w ciągu jednej minuty do co najwyżej 0,5 K.

W trzecim etapie pomiaru wyznaczane są przebiegi przejściowej impedancji termicznej uzwojenia  $Z_{thU}(t)$  oraz wzajemnej przejściowej impedancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem  $Z_{thUR}(t)$  ze wzorów

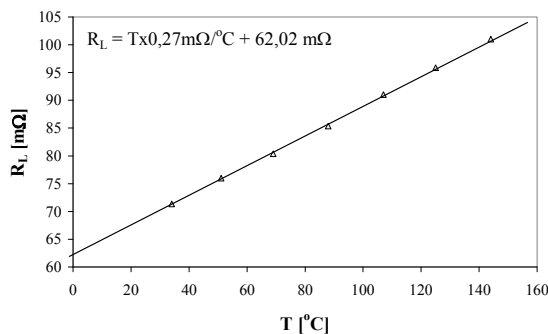
$$Z_{thU}(t) = \frac{u_2(t)/i_2(t) - R_{L1}}{F \cdot u_2(t) \cdot i_2(t)} \quad (3)$$

$$Z_{thUR}(t) = \frac{T_R(t) - T_a}{u_2(t) \cdot i_2(t)} \quad (4)$$

### 3. Wyniki pomiarów

Wykorzystując opisaną w poprzednim rozdziale metodę pomiarową i układ pomiarowy z rys. 1, wyznaczono przebiegi przejściowych impedancji termicznych dławików zawierających rdzenie wykonane z wybranych materiałów ferromagnetycznych.

W pierwszej kolejności, w celu potwierdzenia liniowości i wyznaczenia nachylenia charakterystyki termometrycznej uzwojenia, zmierzono zależność rezystancji uzwojenia dławika od temperatury otoczenia przy ustalonej wartości prądu dławika. Pomiar, których wyniki (oznaczone punktami) pokazano na rys.2, przeprowadzono dla dławika zawierającego 50 zwojów drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm nawiniętego na rdzeń pierścieniowy HF 106026 firmy Arnold [16]. W czasie pomiaru badany dławik umieszczony był w komorze badań cieplnych. Na rysunku tym zaznaczono również linię aproksymującą wyniki pomiarów opisaną równaniem umieszczonym na tym rysunku.



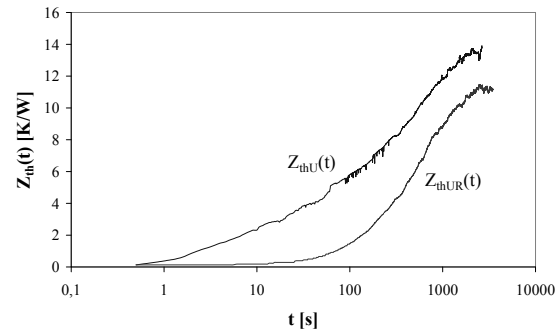
Rys.2. Charakterystyka termometryczna uzwojenia dławika

Jak widać, w całym rozważanym zakresie zmian temperatury rezystancja uzwojenia jest liniową funkcją temperatury, a nachylenie charakterystyki termometrycznej odpowiada wartości danej wzorem (2).

Na rys.3 przedstawiono zmierzone przebiegi przejściowej impedancji termicznej uzwojenia i wzajemnej impedancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem dławika zawierającego 30 zwojów drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm nawiniętego na rdzeniu proszkowym RTP 39,9x24,1x14,5 T157-26

[17]. Pomiar wykonano przy prądzie dławika równym około 9 A.

Jak można zauważyć na rys. 3, proces nagrzewania rdzenia i uzwojenia dławika przebiegają wolno. Czas niezbędny do uzyskania stanu ustalonego przekracza 2000 s. Warto zwrócić uwagę, że szybciej przebiega proces nagrzewania uzwojenia, a przebieg  $Z_{thUR}(t)$  jest opóźniony w stosunku do przebiegu  $Z_{thU}(t)$  nawet o 100 s.

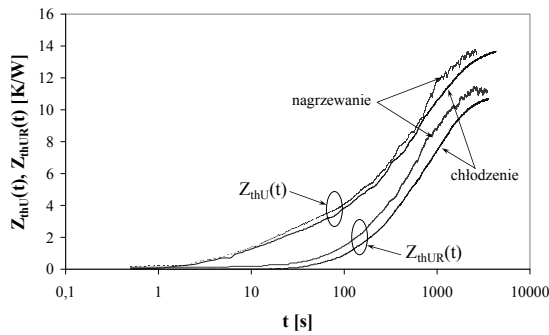


Rys.3. Zmierzone przebiegi przejściowych impedancji termicznych dławika z rdzeniem proszkowym

Ze względu na duże rozmiary geometryczne rozważanego dławika (pierścień o średnicy zewnętrznej równej 39,9 mm, średnicy wewnętrznej 24,1 mm oraz wysokości 14,5 mm), należało spodziewać się nierównomiernego rozkładu temperatury w rdzeniu. Dlatego na rys. 3 umieszczono krzywą oznaczoną  $Z_{thUR}(t)$ , którą uzyskano mierząc temperaturę rdzenia w punkcie najbardziej odległym od uzwojenia. Jak można zauważyć, w stanie ustalonym wartości przejściowej impedancji termicznej  $Z_{thU}(t)$  są nawet o 20% większe od wartości  $Z_{thUR}(t)$ .

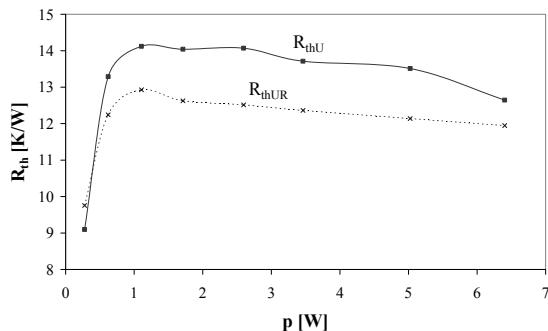
Zmierzono również metodą pirometryczną czasowe przebiegi temperatury rdzenia oraz uzwojenia w czasie nagrzewania i chłodzenia dławika. W oparciu o uzyskane przebiegi temperatury rdzenia i uzwojenia wyznaczono i pokazano na rys.4 przebiegi przejściowych impedancji termicznych  $Z_{thU}(t)$  oraz  $Z_{thUR}(t)$  odpowiadające krzywej nagrzewania i krzywej chłodzenia.

Jak można zauważyć, procesy nagrzewania i chłodzenia w swej początkowej fazie przebiegają identycznie. Różnice między analizowanymi przebiegami są widoczne dopiero po upływie kilkuset sekund. Czas potrzebny na ostudzenie rdzenia jest nawet o 300 s dłuższy od czasu niezbędnego do nagrzania rdzenia oraz uzwojenia.



Rys. 4. Przebiegi  $Z_{thU}(t)$  oraz  $Z_{thUR}(t)$  dla wiatka z rdzeniem proszkowym zmierzone metodą pirometryczną przy jego nagrzewaniu i chłodzeniu

Podobnie, jak dla elementów półprzewodnikowych [10, 18], w wiatku obserwuje się zależność rezystancji termicznej  $R_{th}$  od mocy wydzielanej w badanym elemencie. Zależność rezystancji termicznej uzwojenia  $R_{thU}$  oraz wzajemnej rezystancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem  $R_{thUR}$  od mocy  $p$  wydzielanej w uzwojeniu rozważanego wiatka pokazano na rys.5.

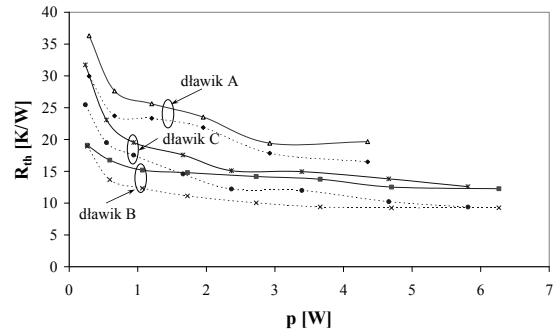


Rys. 5. Zmierzone zależności rezystancji termicznych wiatka z rdzeniem proszkowym od wydzielanej mocy

Jak można zaobserwować, w szerokim zakresie mocy wydzielanych w wiatku rezystancja termiczna uzwojenia jest większa o kilkanaście procent od wzajemnej rezystancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem. Dopiero przy mocach przekraczających 5 W wartości obu rozważanych parametrów są zbliżone. Może być to związane ze wzrostem udziału promieniowania w odprowadzaniu ciepła generowanego w uzwojeniu.

Na rys.6 przedstawiono zmierzone zależności rezystancji termicznej uzwojenia (linie ciągłe) oraz rezystancji termicznej wzajemnej między uzwojeniem a rdzeniem (linie kreskowe) od mocy wydzielanej w uzwojeniu dla wybranych wiatków. Wiatki A zawiera 50 zwojów drutu

miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm nawiniętych na rdzeniu HF 106026, wiatki B zawiera 30 zwojów drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm nawiniętych na rdzeniu HF 157060-2, zaś wiatki C zawiera 30 zwojów drutu miedzianego w emalii o średnicy 0,8 mm nawiniętych na rdzeniu RTF36 4A11.



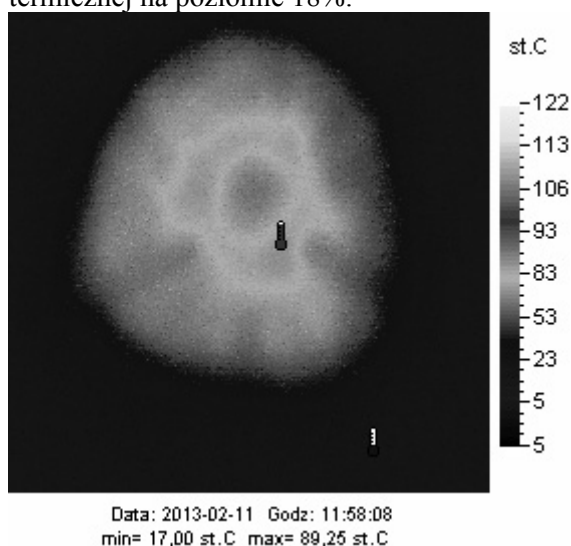
Rys. 6. Zmierzone zależności rezystancji termicznych wybranych wiatków od wydzielanej mocy

Jak można zauważyć, zależności  $R_{thU}(p)$  oraz  $R_{thUR}(p)$  są funkcjami malejącymi. W rozważanym zakresie wartości mocy wartość rezystancji termicznej maleje nawet o 40%. Dla wszystkich rozważanych wiatków, wartość rezystancji termicznej uzwojenia jest większa, nawet o 20%, od wzajemnej rezystancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem. Warto zwrócić uwagę na fakt, że mniejsze wartości rezystancji termicznej są obserwowane dla wiatków zawierających rdzenie o większych rozmiarach. Rdzeń wiatka A ma średnicę zewnętrzną 26,92 mm, średnicę wewnętrzną 14,73 mm i wysokość 14 mm. Z kolei, rdzeń wiatka B ma średnicę zewnętrzną 39,88 mm, średnicę wewnętrzną 24,13 mm i wysokość 14,48 mm. Rdzeń wiatka C ma średnicę zewnętrzną 36 mm, średnicę wewnętrzną 23 mm i wysokość 15 mm.

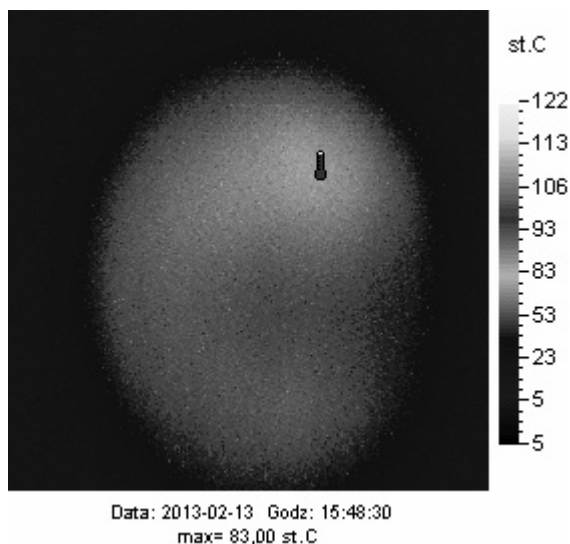
Obserwowany wpływ wymiarów geometrycznych na rezystancję termiczną wiatka wynika ze zmiany powierzchni wiatka, na której zachodzi konwekcja ciepła i promieniowanie. Przy wzroście wymiarów rdzenia wymienione procesy są wydajniejsze. Podobnie, wzrost temperatury uzwojenia i rdzenia spowodowany wzrostem wartości wydzielanej mocy powoduje skuteczniejszą konwekcję ciepła prowadzącą do obniżenia wartości rezystancji termicznej [10].

Na rys.7 i 8 przedstawiono przestrzenne rozkłady temperatury w wiatku A (rys.7) oraz w wiatku B (rys.8) zmierzone w stanie

termicznie ustalonym za pomocą kamery termograficznej Vigo V-20 [19]. Jak można zauważyć, dla dławika A, w którym uzwojenie rozłożone jest równomiernie na całym obwodzie rdzenia, różnice temperatur między najcieplejszym i najchłodniejszym punktem na powierzchni dławika nie przekraczają 15 K, co odpowiada różnicy w wartości rezystancji termicznej na poziomie 18%.



Rys.7. Zmierzony rozkład temperatury na powierzchni dławika A przy mocy 4,35 W



Rys.8. Zmierzony rozkład temperatury na powierzchni dławika B przy mocy 6,25 W

Z kolei, dla dławika B, w którym uzwojenie zajmuje zaledwie 30% obwodu rdzenia, różnice temperatur między najchłodniejszym a najcieplejszym punktem na powierzchni dławika dochodzą do 25 K, co odpowiada różnicy wartości rezystancji termicznej na poziomie 30%.

Z porównania wyników pomiarów przedstawionych na rys. 7 i 8 widać, że sposób uzwojenia dławika w istotny sposób wpływa na nierównomierność rozkładu temperatury na jego powierzchni.

#### 4. Podsumowanie

W pracy zaproponowano metodę wyznaczania własnych i wzajemnych przejściowych impedancji termicznych w dławiku. Opracowaną metodę zastosowano do pomiaru przejściowej impedancji termicznej uzwojenia dławika oraz wzajemnej przejściowej impedancji termicznej między uzwojeniem a rdzeniem dławika.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że czas potrzebny na ustalenie się warunków cieplnych pracy dławika może dochodzić nawet do kilkudziesięciu minut. Czas ten jest dłuższy dla dławików o większych rozmiarach. Czas nagrzewania rdzenia jest nawet o kilkaset sekund dłuższy od czasu nagrzewania się uzwojenia.

Wartości rezystancji termicznej w dławiku maleją przy wzroście wymiarów dławika oraz przy wzroście wartości mocy wydzielanej w tym elemencie. Wartość rezystancji termicznej  $R_{thUR}$  jest nawet o 20% mniejsza od rezystancji termicznej  $R_{thU}$ .

W celu uzyskania małej wartości rezystancji termicznych  $R_{thU}$  oraz  $R_{thUR}$  celowe jest stosowanie rdzeni o dużych rozmiarach oraz równomierne rozmieszczenie uzwojenia na całym obwodzie rdzenia pierścieniowego.

#### 5. Literatura

- [1]. Rashid M.H.: *Power Electronic Handbook*, Academic Press, Elsevier, 2007.
- [2]. Van den Bossche A., Valchev V.C.: *Inductors and transformers for Power Electronics*. CRC Press, Taylor & Francis Group Boca Raton, 2005.
- [3]. Górecki K., Detka K.: *Electrothermal model of choking-coils for the analysis of dc-dc converters*. Materials Sciences & Engineering B, Vol. 177, No. 15, 2012, pp. 1248-1253.
- [4]. Górecki K., Zarębski J.: *Electrothermal analysis of the self-excited push-pull dc-dc converter*. Microelectronics Reliability, Vol. 49, No.4, 2009, pp. 424-430.
- [5]. Górecki K., Stepowicz W.J.: *Wpływ zjawiska samonagrzewania w dławiku na charakterystyki przetwornicy buck*. Przegląd Elektrotechniczny, R. 85, Nr 11, 2009, ss. 145-148.
- [6]. Janke W.: *Zjawiska termiczne w elementach i układach półprzewodnikowych*, WNT, Warszawa 1992.

- [7]. Zarębski J.: *Modelowanie, symulacja i pomiary przebiegów elektrotermicznych w elementach półprzewodnikowych i układach elektronicznych*, Prace Naukowe Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni, Gdynia 1996.
- [8]. Blackburn D.L., Oettinger F.F.: *Transient Thermal Response Measurements of Power Transistors*, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-22, No. 2, 1976, s. 134-141.
- [9]. Szekely V.: *A New Evaluation Method of Thermal Transient Measurement Results*, Microelectronic Journal, Vol. 28, No. 3, 1997, s. 277-292.
- [10]. Górecki K., Zarębski J.: *Badanie wpływu wybranych czynników na parametry cieplne tranzystorów mocy MOS*. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 85, No. 4, 2009, pp. 159-164.
- [11]. Zarębski J., Górecki K.: *A Method of the BJT Transient Thermal Impedance Measurement with the Double Junction Calibration*. Proc. 11-th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM), San Jose, 1995, pp.80-82.
- [12]. Zarębski J., Górecki K.: *A Method of Measuring the Transient Thermal Impedance of Monolithic Bipolar Switched Regulators*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 30, No. 4, 2007, pp:627 – 631.
- [13]. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: *Metrologia elektryczna*. WNT, Warszawa, 2010.
- [14]. Suszynski Z., Arsoba R., Napieralski A., Tylman W.: *Infrared Investigation of Thyristor Structure Using Induction Heating*, Proceedings of 9th MIXDES, Wrocław 2002, pp. 381-384
- [15]. *Thermo-hunter PT-3S Portable non-contact thermometer. Instruction Manual*, Optex co., 1997.
- [16]. *Arnold Magnetics Limited Powder Cores* – catalogue data, [www.arnoldmagnetics.com](http://www.arnoldmagnetics.com)
- [17] *Strona internetowa firmy Feryster* <http://www.feryster.com.pl/polski/kat10.php>
- [18]. Rubin S., Oettinger F.: *Thermal Resistance Measurement on Power Transistors*. National Bureau of Standards, NBS 400-14, U.S. Dept. of Commerce, 1979.
- [19]. *Instrukcja obsługi kamery termograficznej serii V-20*, Vigo-System, Warszawa 2001.

## Autorzy

dr hab. inż. Krzysztof Górecki, prof. nadzw. AMG  
inż. Katarzyna Górecka  
Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 83,  
81-225 Gdynia, e-mail: [gorecki@am.gdynia.pl](mailto:gorecki@am.gdynia.pl)  
mgr inż. Kalina Detka  
Pomorska Wyższa Szkoła Nauk Stosowanych w Gdyni  
ul. Opata Hackiego 8-10, 81- 213 Gdynia,  
e-mail:[kala.45.wp.pl](mailto:kala.45.wp.pl)

## Informacje dodatkowe

Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST7/06738.

## Recenzent

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski