

## Wpływ konstrukcji transformatorów planarnych na ich właściwości elektryczne i cieplne

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych właściwości transformatorów planarnych. Rozważano transformatory zawierające rdzenie ferrytowe wykonane z różnych materiałów oraz uzwojenia zawierające różne liczby zwojów w postaci ścieżek o różnych szerokościach. Pomiarów charakterystyk elektrycznych wykonano przy pobudzeniu sinusoidalnym i różnych wartościach rezystancji obciążenia i częstotliwości. Dokonano oceny wpływu konstrukcji badanych transformatorów na ich pasmo częstotliwościowe oraz na własne i wzajemne rezystancje termiczne charakteryzujące badane transformatory. Przedyskutowano uzyskane wyniki badań.

**Abstract.** The paper presents the results of experimental investigations on the properties of planar transformers. Transformers containing ferrite cores made of different materials and windings containing different numbers of turns in the form of tracks of different widths are considered. Measurements of electrical characteristics are made with sinusoidal excitation and various values of load resistance and frequency. The construction of the tested transformers is assessed for their frequency band and for their self and transfer thermal resistances characterising the tested transformers. The obtained research results were discussed. (Influence of the design of planar transformers on their electrical and thermal properties).

**Słowa kluczowe:** transformatory planarne, pomiary, parametry elektryczne, parametry cieplne.

**Keywords:** planar transformers, measurements, electric parameters, thermal parameters.

### Wprowadzenie

Transformatory planarne są coraz powszechniej stosowane w układach impulsowego przekształcania energii elektrycznej [1]. Uzwojenia takich transformatorów wykonuje się często w postaci ścieżek na płycie drukowanej [1 – 3] i rdzeń ferromagnetyczny otaczający taką płytkę z obu stron. W czasie pracy takich transformatorów występują straty mocy w obu uzwojeniach i w rdzeniu [3, 4, 16] powodując obniżenie sprawności przekazywania energii między uzwojeniami oraz wzrost temperatury komponentów transformatora. Ten wzrost temperatury wynika ze zjawiska samonagrzewania w każdym z uzwojeń i w rdzeniu oraz wzajemnych sprzężeń cieplnych między wymienionymi komponentami transformatora [6-9].

Badania właściwości cieplnych transformatora planarnego przy zasilaniu jego uzwojeń prądem stałym są przedmiotem pracy [10]. W takich warunkach zasilania moc tracona jest tylko w jednym uzwojeniu, a wzrost temperatury pozostałych komponentów transformatora wynika jedynie z wzajemnych sprzężeń cieplnych między komponentami transformatora. Obecnie odczuwa się brak literatury, która w sposób kompleksowy przedstawiałaby wpływ zjawisk cieplnych na właściwości rozważanej klasy transformatorów przy ich zasilaniu napięciem przemiennym.

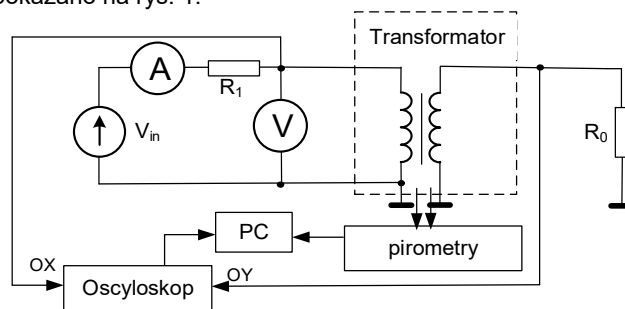
Ze względu na niedoskonałości rzeczywistych transformatorów planarnych (m.in. rezystancja i pojemność uzwojeń) należy oczekiwać wpływu częstotliwości oraz prądu obciążenia na ich charakterystyki. Zmiany wartości tych wielkości mogą ograniczać zakres zastosowań poszczególnych konstrukcji transformatorów.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych ilustrujących wpływ częstotliwości i rezystancji obciążenia na wartości napięcia na uzwojeniach, temperaturę uzwojeń i rdzenia oraz sprawność energetyczną wybranych transformatorów planarnych. Wyznaczono także rezystancje termiczne występujące w skupionym modelu termicznym transformatora planarnego, tzn. własne i wzajemne rezystancje termiczne występujące w tym modelu.

### Układ pomiarowy

Pomiary właściwości elektrycznych i cieplnych badanych transformatorów przeprowadzono przy

wykorzystaniu układu pomiarowego, którego schemat pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

Źródło napięciowe  $V_{in}$  zasila uzwojenie pierwotne badanego transformatora. Przy pomiarze parametrów cieplnych tego transformatora wykorzystuje się źródło napięcia stałego, a przy pomiarze parametrów elektrycznych – źródło napięcia sinusoidalnego uzyskiwane z generatora sygnałowego połączony kaskadowo ze wzmacniaczem mocy typu AE Techron typu 7228 [11].

Rezystor  $R_0$  stanowi obciążenie transformatora. Pirometry służą do pomiaru temperatury każdego z uzwojeń oraz rdzenia transformatora. Rezystor  $R_1$  ogranicza wartość prądu uzwojenia pierwotnego. Czasowe przebiegi napięć na obu uzwojeniach są rejestrowane za pomocą oscyloskopu. Woltomierz i amperomierz służą do pomiaru napięcia na uzwojeniu pierwotnym oraz prądu tego uzwojenia.

Wartości własnych rezystancji termicznych każdego z uzwojeń i wzajemnych rezystancji termicznych między każdym uzwojeniem a rdzeniem wyznaczone są przy wykorzystaniu metod pomiarowych opisanych w pracach [6, 7]. Przy tych pomiarach, realizowanych przy zasilaniu uzwojeń napięciem stałym, nie występują straty mocy w rdzeniu.

### Badane transformatory

Badania przeprowadzono dla transformatorów planarnych zawierających rdzenie ferrytowe typu ELP 22/6/16 [12] o wymiarach 22x6x16 mm wykonane z różnych materiałów ferrytowych. Rdzenie te składają się z dwóch

kształtek typu E między które włożone są płytki drukowane, na których wykonano uzwojenia. Płytki te mają grubość 1.6 mm i są wykonane na podłożu z laminatu FR-4. Zastosowano dwa rodzaje uzwojeń o kształcie owalnym. Pierwszy z nich, oznaczony dalej przez UZ1, zawiera 6 zwojów o szerokości 0.5 mm i odległości między nimi równej 0.2 mm. Drugi rodzaj uzwojeń, nazywany dalej UZ2, zawiera 13 zwojów o szerokości 0.15 mm i odległości między nimi równej 0.2 mm. Na każdej warstwie ścieżek o grubości 35  $\mu\text{m}$  nałożono maskę przeciwłutową. Rezystancja uzwojeń UZ2 dla prądu stałego wynosi 5,3  $\Omega$ , a uzwojeń UZ1 – 0,76  $\Omega$ . Poszczególne transformatory oznaczono symbolami Tr1 – Tr6.

Widok uzwojeń wykonanych na płytkach PCB pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Widok płytek tworzących uzwojenia transformatora

Jak widać, z każdym uzwojeniem związane są pola lutownicze, do których lutowane są przewody łączące uzwojenia transformatora z resztą układu pomiarowego.

Do budowy transformatorów użyto rdzeni ferrytowych firmy EPCOS wykonanych z następujących materiałów: N49 [13], N87 [14], N92 [15] oraz N97 [16]. Każdy z tych rdzeni opisują następujące parametry geometryczne: długość drogi magnetycznej  $l_e = 32,5$  mm, pole przekroju rdzenia  $A_e = 78,3$  mm<sup>2</sup> oraz objętość rdzenia  $V_e = 2540$  mm<sup>3</sup> [12]. Wartości wybranych parametrów zastosowanych materiałów ferromagnetycznych zebrano w Tabeli 1.

Tabela 1. Wartości wybranych parametrów ferrytów użytych na konstrukcję rdzeni badanych transformatorów

Materiał ferrytowy	$B_{\text{sat}} @ T = 25^\circ\text{C}$ [mT]	$B_{\text{sat}} @ T = 100^\circ\text{C}$ [mT]	$P_v @ f=300$ kHz, $B_m=0.1$ T, $T=100^\circ\text{C}$ [kW/m <sup>3</sup> ]
N49	490	400	330
N87	490	390	390
N92	500	440	410
N97	510	410	340

Jak można zauważyć, przy temperaturze  $T = 25^\circ\text{C}$  wartość indukcji nasycenia  $B_{\text{sat}}$  dla wszystkich rozważanych materiałów równa jest  $500 \pm 10$  mT. Przy temperaturze  $T = 100^\circ\text{C}$  różnice w wartościach tego parametru są większe i dochodzą aż do 50 mT. Z kolei, wartości stratności zmierzone przy częstotliwości  $f = 300$  kHz, amplitudzie indukcji  $B_m = 0,1$  T i temperaturze  $T = 100^\circ\text{C}$  mieszczą się w zakresie od 330 do 410 kW/m<sup>3</sup>.

### Wyniki pomiarów

Wykorzystując opisany powyżej układ pomiarowy zmierzono parametry elektryczne i cieplne badanych transformatorów. W Tabeli 2 zebrano dane o konstrukcji badanych transformatorów. Podano w niej także zmierzone wartości parametrów cieplnych badanych transformatorów, tzn. własnej rezystancji termicznej uzwojenia pierwotnego  $R_{\text{th}W1}$  oraz wzajemnych rezystancji termicznych między tym uzwojeniem a rdzeniem  $R_{\text{th}W1C}$  oraz uzwojeniem wtórnym  $R_{\text{th}W1W2}$ . W czasie pomiarów moc wydzielana w uzwojeniu wynosiła około 3,5 W.

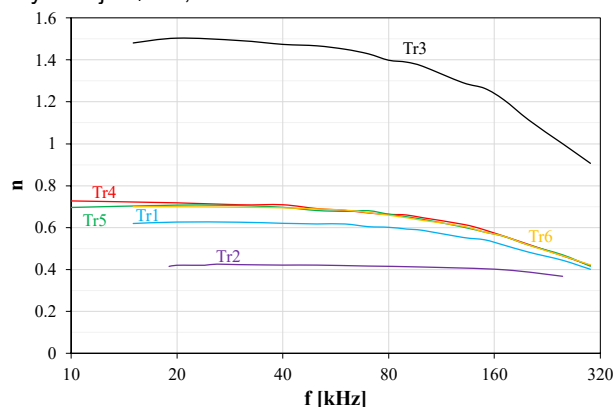
Widać, że dla wszystkich transformatorów, w których na uzwojeniu pierwotnym i wtórnym wykorzystano uzwojenie UZ2 uzyskano zbliżone wartości własnej rezystancji termicznej uzwojenia pierwotnego  $R_{\text{th}W1}$  równe  $29,85 \pm 0,93$  K/W oraz wzajemnej rezystancji termicznej między uzwojeniami  $R_{\text{th}W1W2} = 23,05 \pm 0,71$  K/W. Wzajemna rezystancja termiczna  $R_{\text{th}W1C} = 16,94 \pm 1,24$  K/W. W transformatorach Tr2 i Tr3, w których znajduje się jedno uzwojenie UZ1 uzyskano zmniejszenie wartości wszystkich zmierzonych rezystancji termicznych. W szczególności, dla transformatora Tr3 z uzwojeniem pierwotnym UZ1 wartości każdej z rozważanych rezystancji termicznych znacznie maleje, nawet o ponad 40%.

Tabela 2. Wartości zmierzonych własnych i wzajemnych rezystancji termicznych w modelu badanych transformatorów

Transformator	Rdzeń	Uzwojenie pierwotne	Uzwojenie wtórne	$R_{\text{th}W1}$ [K/W]	$R_{\text{th}W1C}$ [K/W]	$R_{\text{th}W1W2}$ [K/W]
Tr1	N49	UZ2	UZ2	30,17	16,09	23,76
Tr2	N49	UZ2	UZ1	25,65	13,02	20,13
Tr3	N49	UZ1	UZ2	17,79	10,26	14,80
Tr4	N87	UZ2	UZ2	30,78	18,18	22,91
Tr5	N92	UZ2	UZ2	29,61	15,71	22,34
Tr6	N97	UZ2	UZ2	28,93	16,01	23,20

Na kolejnych rysunkach przedstawiono charakterystyki badanych transformatorów wyznaczone w szerokim zakresie zmian rezystancji obciążenia i częstotliwości przy pobudzeniu sinusoidalnym uzwojenia pierwotnego ze źródła napięciowego o różnej wartości międzyszczytowej. Wartość międzyszczytowa napięcia zasilania  $V_{\text{in}}$  była równa 60 V w większości rozważanych przypadków, jedynie dla transformatorów Tr5 i Tr6 wartości tego napięcia była równa 50 V, a dla transformatora Tr2 – 90 V.

Na rys. 3 przedstawiono zależność przekładni napięciowej badanych transformatorów od częstotliwości. Pomiary wykonano dla rezystancji obciążenia  $R_0 = 15$   $\Omega$  i rezystancji  $R_1 = 4,7$   $\Omega$ .

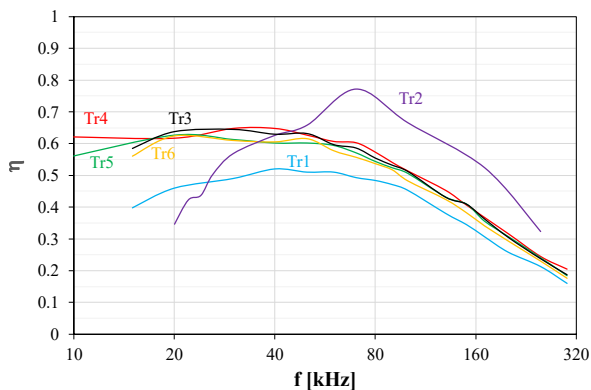


Rys. 3. Zmierzone zależności przekładni napięciowej badanych transformatorów od częstotliwości

Jak można zauważyć, tylko dla transformatora Tr3, w którym liczba zwojów uzwojenia wtórnego jest większa niż uzwojenia pierwotnego, uzyskano wartość przekładni napięciowej  $n$  większą od 1. W pozostałych przypadkach przekładnia  $n$  przyjmuje wartości poniżej 1. Dla wszystkich transformatorów zależność  $n(f)$  jest funkcją malejącą. Daje się zaobserwować, że zakres częstotliwości, w którym wartość  $n$  jest praktycznie stała jest najszerszy w przypadku transformatora Tr2 o najmniejszej wartości przekładni zwojowej. Dochodzi on aż do 150 kHz. Z kolei, dla transformatora Tr3, o największej przekładni zwojowej, zależności  $n(f)$  wyraźnie maleje już przy  $f = 30$  kHz. A zatem widać, iż szerokie pasmo częstotliwościowe uzyskuje się przy małych wartościach przekładni zwojowej.

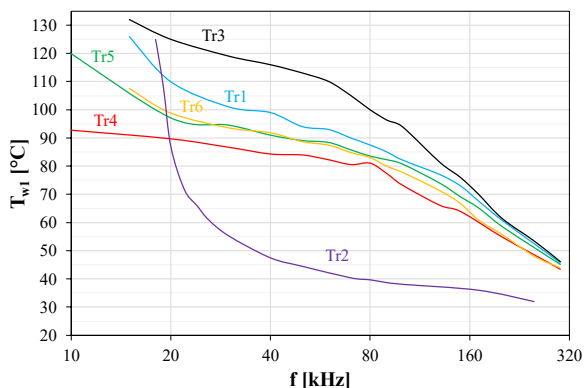
Rys. 4 ilustruje wpływ częstotliwości na sprawność energetyczną  $\eta$  badanych transformatorów.

Widać, że dla każdego z badanych transformatorów zależność  $\eta(f)$  posiada maksimum. Osiąga ono największą wartość równą 77% dla transformatora Tr2 przy częstotliwości  $f = 70$  kHz. Najmniejszą wartość równą 52% rozważane maksimum osiąga dla transformatora Tr1 przy częstotliwości  $f = 40$  kHz. Dla wszystkich rozważanych transformatorów sprawność szybko maleje przy wzroście częstotliwości powyżej 70 kHz. Dla  $f = 300$  kHz sprawność ta maleje nawet poniżej 20%.

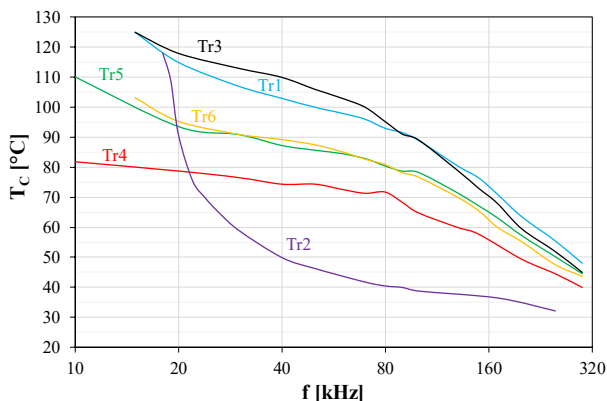


Rys. 4. Zmierzone zależności sprawności energetycznej badanych transformatorów od częstotliwości

Na rys. 5-6 pokazano zmierzone zależności temperatury uzwojenia pierwotnego  $T_{W1}$  (rys. 5) oraz rdzenia  $T_c$  (rys. 6) od częstotliwości.



Rys. 5. Zmierzone zależności temperatury uzwojenia pierwotnego badanych transformatorów od częstotliwości

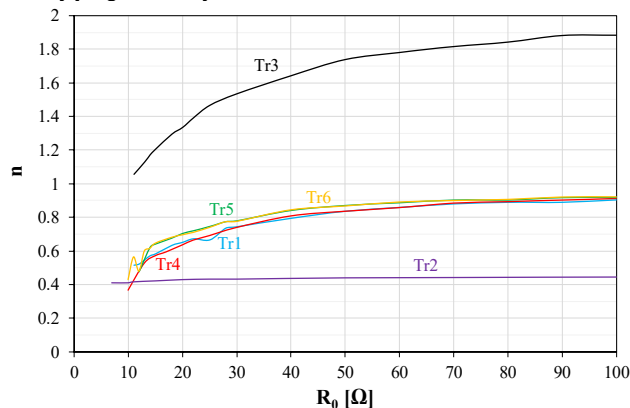


Rys. 6. Zmierzone zależności temperatury rdzenia badanych transformatorów od częstotliwości

Dla wszystkich badanych transformatorów uzyskano monotonicznie malejącą zależność temperatury każdego z komponentów transformatora od częstotliwości. Najwyższą

wartość ma temperatura uzwojenia pierwotnego. Spadek wartości temperatury komponentów transformatora wiąże się ze spadkiem wartości prądu płynącego przez uzwojenia przy wzroście wartości częstotliwości oraz spadkiem przekładni napięciowej w funkcji częstotliwości. Głównym źródłem ciepła jest uzwojenie pierwotne, a straty mocy w rdzeniu są niewielkie ze względu na małą wartość amplitudy indukcji pola magnetycznego – rdzenie transformatorów pracują przy amplitudzie indukcji dużo mniejszej od indukcji nasycenia. Wartość amplitudy indukcji jest największa przy małych wartościach częstotliwości i szybko maleje ze wzrostem częstotliwości.

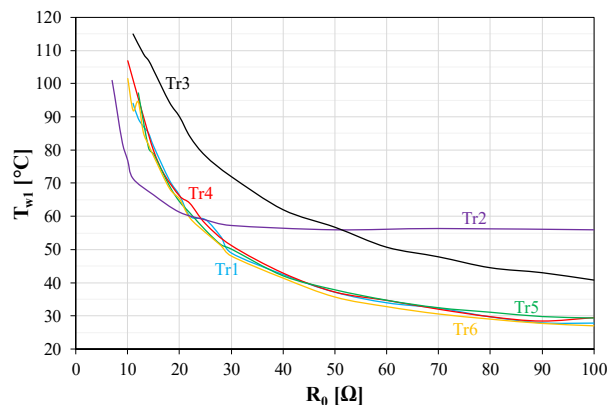
Na rys. 7 zilustrowano wpływ rezystancji obciążenia na przekładnię napięciową badanych transformatorów. Pomiary wykonano przy częstotliwości napięcia zasilającego równej 100 kHz.



Rys. 7. Zmierzone zależności przekładni napięciowej badanych transformatorów od rezystancji obciążenia

Można zauważyć, że dla wszystkich badanych transformatorów zależność  $n(R_0)$  jest funkcją monotonicznie rosnącą. Przy zmianach rezystancji  $R_0$  od 10 do 100  $\Omega$  wartość  $n$  rośnie nawet o 90% i osiąga wartości zbliżone do przekładni zwojowej. Tylko dla transformatora Tr2 praktycznie nie zaobserwowano wpływu wartości  $R_0$  na przekładnię  $n$ . Silny wpływ wartości  $R_0$  na wartość  $n$  wynika ze stosunkowo dużej wartości rezystancji uzwojeń transformatora osiągającej nawet 5,3  $\Omega$ .

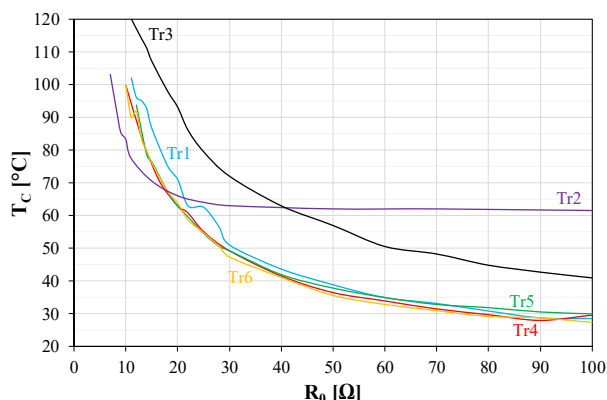
Na rys. 8-9 pokazano zależność temperatury komponentów badanych transformatorów od rezystancji obciążenia.



Rys. 8. Zmierzone zależności temperatury uzwojenia pierwotnego badanych transformatorów od rezystancji obciążenia

We wszystkich rozważanych przypadkach uzyskano monotonicznie malejące zależności wszystkich mierzonych temperatur od rezystancji obciążenia. Zawsze najwyższe wartości temperatury odnotowywano dla uzwojenia wtórnego  $T_{W2}$ . Relacja między temperaturami uzwojeń  $T_{W1}$  oraz  $T_{W2}$  wynika z różnic w liczbie zwojów oraz szerokości

ścieżek stanowiących uzwojenia. Przy wzroście rezystancji obciążenia temperatury wszystkich komponentów transformatora maleją na skutek spadku wartości prądu uzwojeń i traconej w nich mocy.



Rys. 9. Zmierzone zależności temperatury rdzenia badanych transformatorów od rezystancji obciążenia

Przy małej liczbie zwojów uzwojenia pierwotnego indukcyjność tego uzwojenia jest mniejsza, co powoduje przepływ prądu o większej wartości przez to uzwojenie i silniejsze jego nagrzewanie. Wraz ze wzrostem częstotliwości rośnie moduł impedancji każdego z uzwojeń, co powoduje spadek prądu uzwojeń, a w ślad za tym spadek traconej mocy i temperatury uzwojeń.

Dla transformatora Tr2 przy rezystancji  $R_0 > 30 \Omega$  wartości temperatury komponentów transformatora są praktycznie stałe. Najwyższą wartość przyjmuje temperatura rdzenia  $T_c$ . Oznacza to, że w tym przypadku dominują straty mocy w rdzeniu, których wartość nie zależy od prądu obciążenia. Straty te zależą od amplitudy indukcji, która jest proporcjonalna do amplitudy napięcia na uzwojeniach.

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów właściwości elektrycznych i cieplnych wybranych transformatorów planarnych w szerokim zakresie zmian częstotliwości i rezystancji obciążenia. Badania przeprowadzono dla transformatorów z rdzeniami ferrytowymi wykonanymi z 4 różnych materiałów ferrytowych oraz dwoma rodzajami uzwojeń w postaci płytek PCB o różnym wzorze mozaiki.

Zmierzone charakterystyki dowodzą, że przekładnia napięciowa jest malejącą funkcją częstotliwości i rosnącą funkcją rezystancji obciążenia. Dla badanych transformatorów zaobserwowano, że stałą wartość przekładni napięciowej w szerokim zakresie częstotliwości łatwiej jest uzyskać przy mniejszej wartości przekładni zwojowej. Najwyższą wartość sprawności energetycznej uzyskano przy częstotliwości równej około 70 kHz.

Zmierzone zależności temperatury komponentów transformatora od częstotliwości i rezystancji obciążenia są funkcjami monotonicznie malejącymi. Na skutek silnych wzajemnych sprzężeń termicznych między komponentami transformatora temperatury tych komponentów nie różnią się znacznie między sobą. Różnice te są największe przy małej wartości częstotliwości i małej wartości rezystancji obciążenia dochodząc do 15°C. W większości zbadanych przypadków temperatury uzwojeń są większe od temperatury rdzenia, co dowodzi, że straty mocy występują głównie w uzwojeniach, a straty w rdzeniu są zaniedbywalne. Tylko dla transformatora Tr2 dominują straty w rdzeniu.

Przedstawione wyniki badań mogą być użyteczne dla projektantów układów energoelektronicznych z transformatorami planarnymi. Będą one także użyteczne przy weryfikacji elektrotermicznych modeli transformatorów planarnych.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, inż. Przemysław Kuryłto, dr hab. inż. Kalina Detka, prof. UMG, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: k.gorecki@we.umg.edu.pl, k.detka@we.umg.edu.pl

## LITERATURA

1. A. Van den Bossche and V.C. Valchev, Inductors and transformers for power electronics, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2005.
2. Barlik, R.J.; Nowak, K.M. Energoelektronika. Elementy Podzespoły, Układy; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej: Warszawa, Poland, 2014.
3. Bissuel, V.; Codecasa, L.; Monier-Vinard, E.; Rogie, B.; Olivier, A.; Mahe, A.; Laraqi, N.; Dralessandro, V.; Gougis, C. Novel Approach to the Extraction of Delphi-like Boundary-Condition-Independent Compact Thermal Models of Planar Transformer Devices. 24rd Int. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC); 2018; pp. 1–7.
4. K. Górecki, M. Godlewska: Modelling characteristics of the impulse transformer in a wide frequency range. International Journal of Circuit Theory and Applications, Vol. 48, No. 5, 2020, pp. 750-761.
5. Swift, G.; Molinski, T.S.; Bray, R. A fundamental approach to transformer thermal modeling. Part I: Theory and equivalent circuit. IEEE Trans. Power Deliv. 2001, 16, 171–175.
6. K. Górecki, K. Górski: SPICE-aided compact electrothermal model of impulse transformers. Applied Sciences, Vol. 11, no. 19, 2021, 8894, doi: 10.3390/app11198894.
7. Tang, W.H.; Wu, Q.H.; Richardson, Z.J. A simplified transformer thermal model based on thermal–electric analogy. IEEE Transactions on Power Delivery 2004, 19, 1112–1119.
8. P.R. Wilson, J.N. Ross and A.D. Brown, "Simulation of magnetic component models in electric circuits including dynamic thermal effects", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 1, 2002, pp. 55-65.
9. M.A. Tslis, E.I. Amoiralis, A.G. Kladas, A.T. Souflaris, "Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 53, 2012, pp. 188-201.
10. K. Górecki, K. Detka, K. Górski: Compact thermal model of the pulse transformer taking into account nonlinearity of heat transfer. Energies, Vol. 13, No. 11, 2020, 2766, doi: 10.3390/en13112766.
11. AETECHRON 7228 1kVA, DC-enabled Linear Power Amplifier Technical Specifications <https://www.aetechron.com/pdf/7228TechSpecs.pdf>
12. ELP 22/6/16 with I 22/2.5/16 Cores and accessories (with and without clamp recess) [https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/elp\\_22\\_6\\_16.pdf](https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/elp_22_6_16.pdf)
13. Siferrit material N49 datasheet <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/528856/cf394eea3fae828c345f46dc297b76ab/pdf-n49.pdf>
14. Siferrit material N87 datasheet <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/528882/71e02c7b9384de1331b3f625ce4b2123/pdf-n87.pdf>
15. Siferrit material N92 datasheet <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/528888/9cb0f2e7a6588054b0028af888c16339/pdf-n92.pdf>
16. Siferrit material N97 datasheet <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/528886/cf0d9784d3d2438b52ade72fbb86ecf6/pdf-n97.pdf>