

Damian BISEWSKI*
Janusz ZARĘBSKI*

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNYCH TRANZYSTORA MOS MOCY CHŁODZONEGO CIECZĄ

W pracy zaprezentowano wyniki pomiarów parametrów termicznych tranzystora MOS mocy, dla którego zastosowano cieczowy system chłodzący firmy Aquacomputer. Zbadano wpływ wybranych parametrów systemu chłodzącego w tym m.in.: rodzaj wymiennika ciepła oraz prędkość przepływu cieczy chłodzącej na właściwości cieplne tranzystora. Dla porównania, przedstawiono wyniki pomiarów parametrów termicznych rozważanego tranzystora umieszczonego na radiatorze. Porównano skuteczność odprowadzania ciepła z wnętrza tranzystora do otoczenia przy zastosowaniu wymienionych wyżej układów chłodzenia.

SŁOWA KLUCZOWE: tranzystor MOS, parametry termiczne

1. WPROWADZENIE

Od wielu lat ważne miejsce w technologii elektronicznej zajmują tranzystory MOS mocy [1], które są stosowane głównie w układach wzmacniających i kluczujących. Jednym z istotnych zjawisk zachodzących w przyrządach półprzewodnikowych, w tym w tranzystorach MOS mocy, jest zjawisko samonagrzewania, które skutkuje wzrostem temperatury wnętrza przyrządu półprzewodnikowego ponad temperaturę otoczenia [2, 3]. Wzrost temperatury jest spowodowany zamianą energii elektrycznej wydzielanej w przyrządzie półprzewodnikowym na ciepło i może w znaczący sposób wpływać na charakterystyki tego przyrządu oraz jego niezawodność [4, 5]. W celu ograniczenia skutków zjawiska samonagrzewania stosuje się odpowiednie systemy chłodzące przyrząd półprzewodnikowy.

Nieustanny rozwój technologii elektronicznej skutkuje opracowaniem nowoczesnych struktur półprzewodnikowych, które charakteryzują się zwiększoną gęstością mocy wydzielaną w tych strukturach. Powoduje to konieczność stosowania systemów chłodzenia o zwiększonej wydajności, w tym m. in. systemów chłodzenia cieczowego. Obecnie systemy tego typu są powszechnie sto-

* Akademia Morska w Gdyni.

sowane na przykład do chłodzenia podzespołów oraz komponentów komputerów PC [10].

Ważnym zagadnieniem badawczym jest określenie właściwości termicznych przyrządu półprzewodnikowego, co pozwala zarówno na bardziej precyzyjne określenie obszaru bezpiecznej pracy tego przyrządu, jak i na zaprojektowanie i zastosowanie odpowiednio wydajnego systemu chłodzącego.

Do scharakteryzowania właściwości termicznych przyrządów półprzewodnikowych wykorzystuje się dwa parametry: przejściową impedancję termiczną $Z_{th-a}(t)$ oraz rezystancję termiczną R_{th-a} , opisujące transport ciepła z wnętrza przyrządu do otoczenia [3, 4, 6]. Pierwszy wymieniony parametr opisuje właściwości termiczne przyrządu półprzewodnikowego w termicznych stanach przejściowych, natomiast drugi parametr – w termicznym stanie ustalonym.

Jak opisano między innymi w pracach [2, 4, 6 – 9], wartości parametrów termicznych tranzystora MOS zależą od wielu czynników takich, jak: moc wydzielana w tranzystorze, temperatura otoczenia, długość wyprowadzeń tranzystora oraz sposób jego montażu, wielkość pól lutowniczych, rodzaj oraz wymiary radiatora, a nawet sposób zamontowania tranzystora w obudowie urządzenia elektronicznego.

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów parametrów termicznych tranzystora MOS mocy, dla którego zastosowano ciekłowy system chłodzący typu Aquastream firmy Aquacomputer [10]. Określono wpływ parametrów systemu chłodzącego takich, jak np.: rodzaj wymiennika ciepła oraz prędkość przepływu cieczy chłodzącej na właściwości cieplne tranzystora. Dodatkowo, zaprezentowano wyniki pomiarów parametrów termicznych rozważanego tranzystora umieszczonego na aluminiowym radiatorze, co miało na celu porównanie skuteczności odprowadzania ciepła z wnętrza tranzystora do otoczenia przy zastosowaniu wyżej wymienionego układu chłodzenia.

2. DEFINICJE PARAMETRÓW TERMICZNYCH I METODA ICH POMIARU

Przejściowa impedancja termiczna $Z_{th}(t)$ przyrządu półprzewodnikowego jest zdefiniowana jako odpowiedź termiczna tego przyrządu na pobudzenie mocą $p_{th}(t)$ w postaci funkcji skokowej Heaviside'a [6]:

$$Z_{th}(t) = \frac{\Delta T(t)}{P_0} = \frac{T_x(t) - T_0}{P_0} \quad (1)$$

przy czym $p_{th}(t) = P_0 \cdot I(t)$, gdzie P_0 jest wartością uskoku, natomiast $\Delta T(t)$ oznacza nadwyżkę temperatury $T_x(t)$ przyrządu ponad temperaturę odniesienia T_0 .

Ze względu na to, że transport ciepła między wnętrzem przyrządu półprzewodnikowego a otoczeniem odbywa się różnymi drogami, a tor przepływu cie-

pła składa się najczęściej z kilku elementów [8, 9], w praktyce inżynierskiej definiowane są różne rodzaje przejściowej impedancji termicznej.

Przykładowo, w przypadku dokonania we wzorze (1) podstawienia $T_x = T_j$ oraz $T_0 = T_c$ co oznacza, że $\Delta T(t)$ stanowi nadwyżkę temperatury wnętrza T_j ponad temperaturę obudowy przyrządu T_c , mówi się o przejściowej impedancji termicznej $Z_{thj-c}(t)$ między wnętrzem przyrządu a jego obudową. W analogiczny sposób, do opisu właściwości termicznych przyrządu półprzewodnikowego może być stosowana przejściowa impedancja termiczna na przykład: między łącznikiem a otoczeniem Z_{thj-a} oraz między obudową a otoczeniem Z_{thc-a} .

Z kolei, rezystancja termiczna R_{th} przyrządu półprzewodnikowego stanowi wartość asymptotyczną przejściowej impedancji termicznej $Z_{th}(t)$ dla $t \rightarrow \infty$.

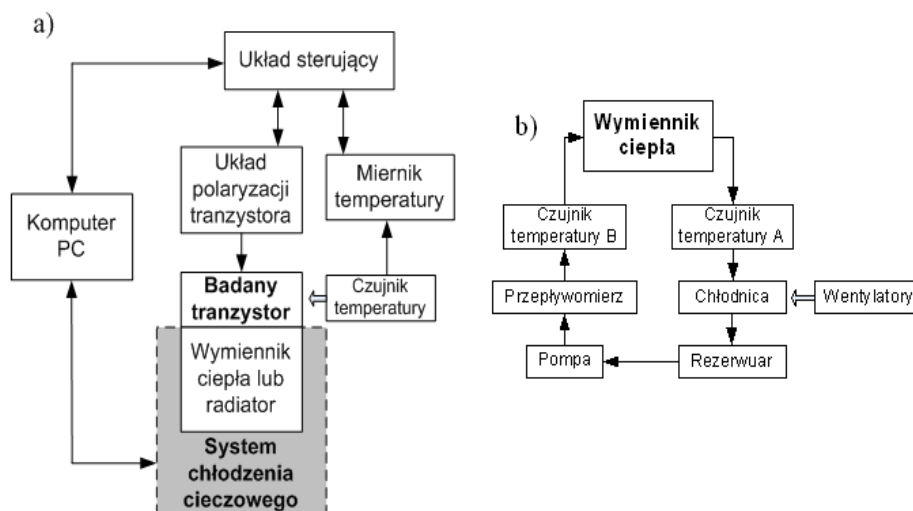
Zasady pomiaru przejściowej impedancji termicznej i rezystancji termicznej są podobne i wynikają z definicji tych parametrów. Polegają one na wydzieleniu w elemencie znanej mocy elektrycznej p_{th} (mocy cieplnej) i zmierzeniu przyrostu temperatury (np. przyrostu temperatury wnętrza ponad temperaturę otoczenia) tego elementu dla określonych warunków odprowadzania ciepła, przy czym w przypadku pomiaru rezystancji termicznej temperatura musi osiągnąć stan ustalony [1–3].

W ramach pracy zrealizowano pomiary przejściowej impedancji termicznej Z_{thc-a} oraz rezystancji termicznej R_{thc-a} między obudową tranzystora a otoczeniem przy wykorzystaniu tzw. krzywych chłodzenia elementu [6, 8, 9]. W tym celu badany tranzystor był pobudzony impulsem mocy o wartości P_0 i czasem trwania na tyle długim, aby w tym elemencie wystąpił stan termicznie ustalony. Następnie, moc cieplna została wyłączona i przeprowadzany był wielokrotny pomiar temperatury obudowy T_c elementu w funkcji czasu do momentu, w którym $T_c \approx T_a$. Wykorzystując zmierzone wartości $T_c(t)$ wyznaczono czasowe przebiegi przejściowej impedancji termicznej Z_{thc-a} oraz rezystancji termicznej R_{thc-a} korzystając ze wzoru (1).

3. UKŁAD POMIAROWY

Na rys. 1a pokazano schemat blokowy układu pomiarowego. W rozważanym układzie badany tranzystor MOS jest zamocowany na wymienniku ciepła, stanowiącym element składowy systemu chłodzenia cieczowego. Zadaniem układu polaryzacji tranzystora z rys. 1a jest pobudzenie tranzystora badanego impulsem mocy o wartości P_0 w ściśle określonym punkcie pracy. Funkcją miernika wraz z czujnikiem temperatury jest rejestracja temperatury obudowy tranzystora w fazie odłączenia mocy cieplnej. Układ sterujący ma za zadanie sterowanie przebiegiem procesu pomiarowego, tj. załączanie oraz wyłączanie układu polaryzacji tranzystora oraz miernika temperatury w odpowiednich (omówionych w rozdziale 2) cyklach procesu pomiaru parametrów termicznych. W układzie

pomiarowym funkcją komputera PC jest generowanie sygnałów dla układu sterującego, a także sterowanie systemem chłodzenia cieczowego. Schemat blokowy cieczowego systemu chłodzącego zastosowanego w układzie pomiarowym pokazano na rys. 1b.



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego (a) oraz systemu chłodzenia cieczowego (b)

System chłodzenia cieczowego posiada obieg zamknięty, a kierunek przepływu cieczy zaznaczono strzałkami na rys. 1b. Ciecz chłodząca przepływa z wymiennika ciepła poprzez czujnik temperatury A do chłodnicy, na której umieszczone są wentylatory. Rezerwuarek służy do uzupełniania ewentualnych niedoborów cieczy chłodzącej, a także do odpowietrzania systemu. Zadaniem pompy oraz przepływomierza jest zapewnienie odpowiedniej kontrolowanej prędkości przepływu cieczy w układzie. Z kolei, zadaniem czujnika temperatury B jest pomiar temperatury cieczy wpływającej do wymiennika ciepła. Funkcją komputera PC jest sterowanie prędkością obrotową pompy oraz wentylatorów chłodnicy, a także rejestracja prędkości przepływu oraz temperatury cieczy.

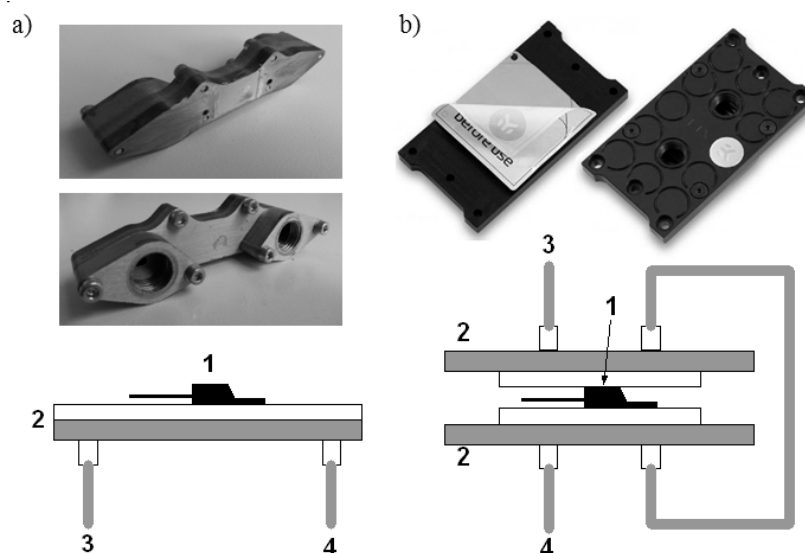
W systemie chłodzenia cieczowego zastosowano następujące komponenty: pompa typu Aquastream XT, przepływomierz typu High Flow USB, chłodnica NexXxoS XT45, cztery wentylatory Yate Loon typu D12SH-12, rezerwuarek Aqualis XT. Szczegółowe informacje nt. danych technicznych komponentów są dostępne na stronie producenta [10].

4. WYNIKI POMIARÓW

Wykonano pomiary przejściowej impedancji termicznej $Z_{thc-a}(t)$ oraz rezystancji termicznej R_{thc-a} tranzystora MOS mocy typu IRFP460 firmy Vishay Siliconix [11] dla trzech różnych wariantów jego chłodzenia, tj.:

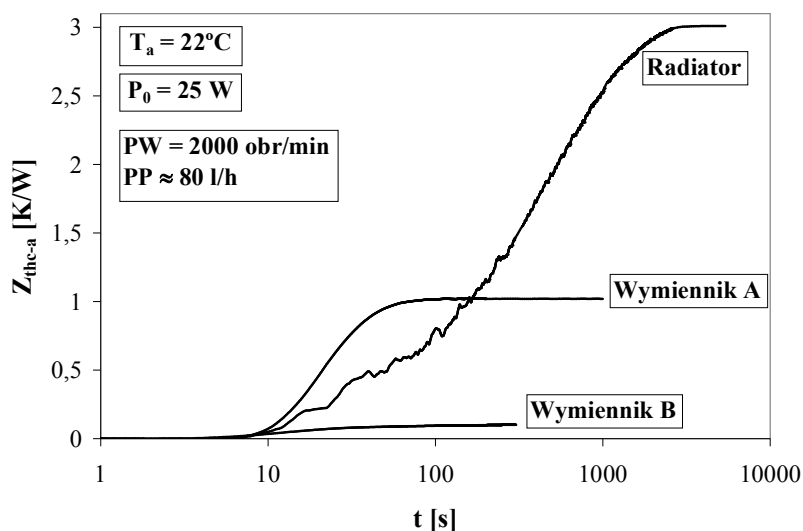
- tranzystora umieszczonego na aluminiowym radiatorze typu A4726 o wymiarach 50 x 35 x 135 mm,
- tranzystora umieszczonego na jednostronnym wymienniku ciepła typu EVX-58 firmy Enzotech,
- tranzystora umieszczonego na dwustronnym wymienniku ciepła typu EK-Supremacy firmy EK Waterblocks.

Widok wspomnianych wymienników ciepła, które roboczo nazwano odpowiednio: wymiennik A oraz wymiennik B wraz ze sposobem zamocowania tranzystora na tych wymiennikach zilustrowano na rys. 2a i 2b.



Rys. 2. Widok oraz sposób zamocowania tranzystora na wymienniku A (a) oraz wymienniku B (b): 1 – tranzystor, 2 – wymiennik, 3 – wlot cieczy, 4 – wylot cieczy

Na rys. 3 pokazano zmierzone przebiegi przejściowej impedancji termicznej $Z_{thc-a}(t)$ tranzystora zamocowanego na radiatorze oraz na wymiennikach A i B, pracującego z mocą cieplną o wartości 25 W w temperaturze pokojowej. W przypadku wyników pomiaru tranzystora umieszczonego na wymiennikach ciepła prędkość przepływu cieczy chłodzącej PP wynosi około 80 l/h, natomiast prędkość obrotowa wentylatorów chłodnicy PW wynosi w przybliżeniu 2000 obr/min.



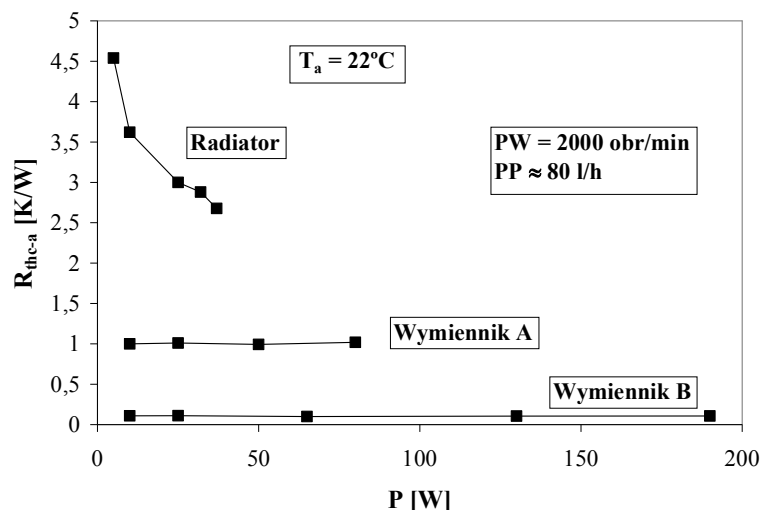
Rys. 3. Przebiegi przejściowej impedancji termicznej $Z_{thc-a}(t)$ tranzystora IRFP460 dla różnych wariantów chłodzenia

Jak widać (rys. 3), kształt przebiegu przejściowej impedancji termicznej $Z_{thc-a}(t)$ jest zróżnicowany w zależności od zastosowanego układu chłodzenia. Stan termicznie ustalony, w przypadku tranzystora zamocowanego na radiatorze jest osiągnięty po upływie około jednej godziny, natomiast w przypadku wymiennika ciepła A oraz B wynosi zaledwie 130 sekund. Stosunkowo krótki czas osiągnięcia przez tranzystor stanu termicznie ustalonego dla wymienników ciepła jest związany najprawdopodobniej z realizacją w tym czasie przez system chłodzący pełnego obiegu cieczy chłodzącej.

Ponadto, w stanie termicznie ustalonym wartość przejściowej impedancji termicznej pomiędzy obudową tranzystora a otoczeniem jest około 3 razy mniejsza w przypadku wymiennika A oraz około 30 razy mniejsza w przypadku wymiennika B w stosunku do wartości tej impedancji dla tranzystora umieszczonego na radiatorze.

Na rys. 4 przedstawiono zależność rezystancji termicznej R_{thc-a} tranzystora IRFP460 w funkcji mocy cieplnej dla różnych wariantów chłodzenia.

Wpływ mocy cieplnej na wartości rezystancji termicznej między obudową tranzystora a otoczeniem jest widoczny wyłącznie w przypadku tranzystora umieszczonego na radiatorze. Wartość tego parametru maleje blisko dwukrotnie przy wzroście mocy cieplnej w zakresie pokazanym na rys. 4. Z kolei, w przypadku tranzystora umieszczonego na wymiennikach ciepła wpływ mocy cieplnej na wartości rezystancji termicznej jest praktycznie niezauważalny.



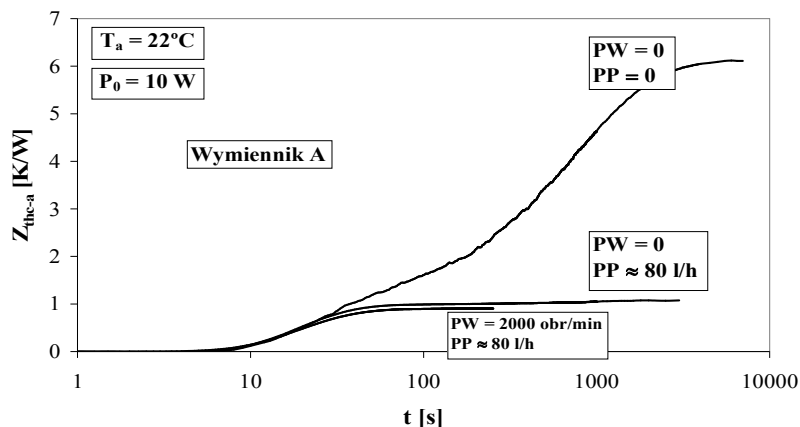
Rys. 4. Zależność rezystancji termicznej R_{thc-a} tranzystora IRFP460 w funkcji mocy cieplnej dla różnych wariantów chłodzenia

Przeprowadzono badania oceniające wpływ parametrów cieczowego systemu chłodzącego takich, jak prędkość przepływu cieczy chłodzącej oraz prędkość obrotowa wentylatorów chłodnicy, na wartości parametrów termicznych rozważanego w pracy tranzystora.

Na rys. 5 zaprezentowano wyniki pomiarów przejściowej impedancji termicznej $Z_{thc-a}(t)$ tranzystora MOS pracującego na wymienniku A z mocą cieplną o wartości 10 W w temperaturze pokojowej dla następujących przypadków:

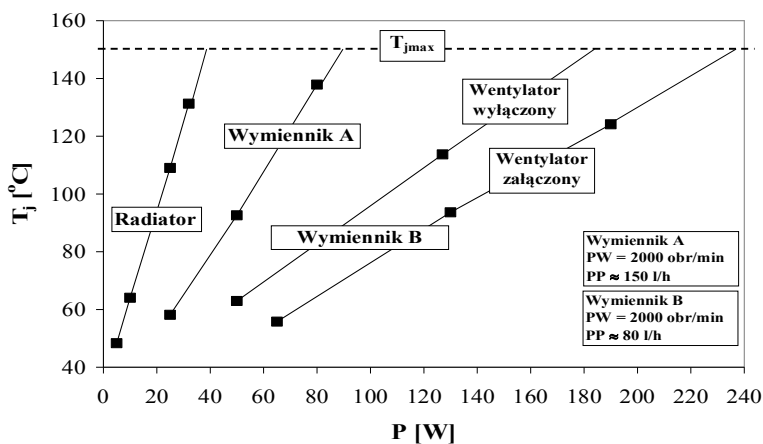
- przepływ cieczy wyłączony, wentylatory chłodnicy wyłączone (PP = 0, PW = 0),
- przepływ cieczy załączony, wentylatory chłodnicy wyłączone (PP = 80 l/h, PW = 0),
- przepływ cieczy załączony, wentylatory chłodnicy załączone (PP = 80 l/h, PW = 2000 obr/min.).

Okazuje się, że kluczowym czynnikiem decydującym o skuteczności cieczowego systemu chłodzącego jest prędkość przepływu cieczy, natomiast mniejsze znaczenie ma prędkość obrotowa wentylatorów chłodnicy. Jak widać z rys. 5, wartości przejściowej impedancji termicznej $Z_{thc-a}(t)$ tranzystora w stanie termicznie ustalonym z załączonym oraz wyłączonym przepływem cieczy różnią się około 6-krotnie. Z kolei, załączenie wentylatorów chłodnicy przy takiej samej prędkości przepływu powoduje spadek wartości Z_{thc-a} tranzystora zaledwie o około 10%.



Rys. 5. Przebiegi przejściowej impedancji termicznej $Z_{thc-a}(t)$ tranzystora IRFP460 na wymienniku A

Na rys. 6 zaprezentowano zależność temperatury wnętrza rozważanego tranzystora w funkcji mocy cieplnej dla różnych wariantów chłodzenia.



Rys. 6. Zależność temperatury wnętrza T_j tranzystora IRFP460 w funkcji mocy cieplnej dla różnych wariantów chłodzenia

Temperaturę wnętrza tranzystora T_j wyznaczono na podstawie wyników pomiarów temperatury jego obudowy, zgodnie ze wzorem:

$$T_j = T_c + R_{thj-c} \cdot p_{th} \quad (2)$$

gdzie: R_{thj-c} stanowi katalogową wartość rezystancji termicznej między wnętrzem tranzystora a jego obudową i wynoszącą $0,45^\circ\text{C/W}$ [11]. Dodatkowo, na

rys. 6 linią przerywaną zaznaczono wartość katalogowej dopuszczalnej temperatury wnętrza rozważanego tranzystora równą 150°C [11].

Jak widać (rys. 6), dopuszczalna temperatura wnętrza w przypadku tranzystora umieszczonego: na radiatorze, na wymienniku A oraz na wymienniku B z wyłączonymi i załączonymi wentylatorami jest osiągana przez tranzystor przy mocy cieplnej wynoszącej w przybliżeniu odpowiednio: 40 W, 90 W, 180 W oraz 240 W, co świadczy o wielokrotnie wyższej skuteczności odprowadzania ciepła w przypadku wymienników ciepła w stosunku do skuteczności radiatora.

Ponadto, jak wynika z karty katalogowej [11] wartość dopuszczalnej mocy strat badanego tranzystora P_{TOT} wynosi 260 W i podawana jest przy założeniu idealnych warunków chłodzenia obudowy (tj. przy $T_c = 25^\circ\text{C}$). Z drugiej strony, zastosowanie w badaniach dwustronnego wymiennika ciepła (wymiennik B) pozwoliło na wydzielenie w rozważanym tranzystorze mocy zaledwie o 20 W niższej od wyżej wymienionej wartości katalogowej, przy jednoczesnym nie przekroczeniu dopuszczalnej temperatury wnętrza tranzystora, co dodatkowo potwierdza wysoką sprawność tego systemu chłodzącego.

5. UWAGI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów parametrów termicznych tranzystora MOS mocy umieszczonego na wymiennikach ciepła zintegrowanych z cieczowym systemem chłodzenia. Zaprezentowane w pracy wyniki pomiarów potwierdzają znaczącą przewagę systemu cieczowego nad klasycznym chłodzeniem przy zastosowaniu radiatora, nawet o znaczących rozmiarach. Przykładowo, zastosowanie dwustronnego wymiennika ciepła powoduje nawet 30-krotny spadek wartości rezystancji termicznej między obudową a otoczeniem w stosunku do wartości tego parametru występującej dla radiatora. W efekcie możliwe jest wydzielenie w tranzystorze znacznie wyższych wartości mocy cieplnych przy zachowaniu wytycznych producenta tranzystora odnośnie nie przekraczania dopuszczalnej temperatury jego wnętrza.

LITERATURA

- [1] Shichman H., Hodges D. A.: Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Volume SC-3, Number 285, ISSN 0018-9200, 1968.
- [2] Szekely V., Rencz M., Courtois B., Thermal Investigations of IC's and Microstructures, Microelectronics Journal, Volume 28, Number 3, ISSN 0026-2692, 1997.
- [3] Zarębski J., Górecki K., The electrothermal large-signal model of power MOS transistor for SPICE, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 25, Number 5-6, ISSN 0885-8993, 2010.

- [4] Górecki K., Zarębski J., Nonlinear compact thermal model of power semiconductor devices, IEEE Transactions on Component and Packaging Technologies, Volume 33, Number 3, ISSN 1521–3331, 2010.
- [5] Coguery G. et al., Power module lifetime estimation from chip temperature direct measurement in an automotive traction inverter, Microelectronics Reliability, Volume 41, ISSN 0026–2714, 2001.
- [6] Oettinger F. F., Blackburn D. L., Semiconductor Measurement Technology: Thermal Resistance Measurements, U. S. Department of Commerce, NIST/SP–400/86, 1990.
- [7] Górecki K., Zarębski J., The influence of the selected factors on transient thermal impedance of semiconductor devices. Proceedings of the 21st International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES, 2014.
- [8] Górecki K., Zarębski J., Bisewski D., An influence of the selected factors on the transient thermal impedance model of power MOSFET. Informacje MIDEM – Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materiale, Volume 45, Number 2, ISSN 0352–9045, 2015.
- [9] Górecki K., Zarębski J., The semiconductor device thermal model taking into account non–linearity and multithreading of the cooling system, Journal of Physics: Conference Series, Volume 494, ISSN 1742–6596, 2014.
- [10] www.aquacomputer.de
- [11] www.vishay.com

INVESTIGATIONS OF THERMAL PARAMETERS OF LIQUID–COOLED POWER MOSFET

The paper presents the results of measurements of thermal parameters of power MOSFET implemented in liquid cooling system offered by Aquacomputer. The influence of selected cooling system parameters, such as: the type of heat exchanger and the flow rate of the coolant on the thermal properties of transistor, has been examined. In comparison, the results of measurements of thermal parameters of the considered transistor located on the heat sink, have been presented. Efficiency of heat radiation to the surroundings of the transistor using the above–mentioned cooling systems, has been investigated.

(Received: 10. 03. 2016, revised: 11. 03. 2016)