

doi:10.15199/48.2022.01.29

Realizacja praktyczna układu do pomiaru parametrów cieplnych tranzystorów MOS mocy

Streszczenie. W pracy przedstawiono autorski system pomiarowy do wyznaczania parametrów cieplnych tranzystorów mocy MOSFET umieszczonych na wspólnym podłożu. Zaprezentowano koncepcję metody pomiarowej oraz układ umożliwiający wyznaczenie własnych i wzajemnych przejściowych impedancji termicznych tranzystorów MOSFET. Przedstawiono podstawowe informacje o zastosowanych komponentach układu pomiarowego oraz opisano autorskie oprogramowanie. Pokazano i przedyskutowano przykładowe wyniki pomiarów i wzajemnych przejściowych impedancji termicznych.

Abstract. The paper presents an original measuring system for determining thermal parameters of power MOSFETs placed on a common base. The concept of the measurement method and the system enabling the determination of self and transfer transient thermal impedances of power MOSFETs are presented. Basic information about the applied components of the measuring system is presented and the proprietary software was described. Some measurements results of the self and transfer transient thermal impedance are shown and discussed. (**Practical realisation of set-up for the measurement of thermal parameters of power MOSFETs.**)

Słowa kluczowe: układ pomiarowy, parametry cieplne, tranzystory MOSFET mocy, zjawiska cieplne
Keywords: measurement set-up, thermal parameters, power MOSFETs, thermal phenomena

Wstęp

Jednym z czynników wpływających na właściwości elementów i układów elektronicznych jest temperatura. Jej wzrost powoduje zarówno zmiany w przebiegu charakterystyk takich elementów, jak i skrócenie czasu ich życia [1, 2]. Wartość temperatury wnętrza elementów elektronicznych rośnie na skutek zjawisk cieplnych: samonagrzewania i wzajemnych sprzężeń cieplnych między elementami umieszczonymi na wspólnym podłożu [3].

Wpływ mocy wydzielanej w rozważanym elemencie elektronicznym na temperaturę jego wnętrza charakteryzuje własna przejściowa impedancja termiczna $Z_{th}(t)$, a wpływ mocy wydzielanej w innych elementach elektronicznych na tę temperaturę – wzajemna przejściowa impedancja termiczna $Z_{thw}(t)$ [3, 4]. Producenci przyrządów półprzewodnikowych podają w danych katalogowych informacje o przebiegu przejściowej impedancji termicznej wyznaczonym przy doskonałym odprowadzaniu ciepła z obudowy elementu i braku wzajemnych oddziaływań cieplnych [5]. Aby wyznaczyć parametry cieplne przyrządów półprzewodnikowych pracujących w rzeczywistych warunkach niezbędne jest wykonanie odpowiednich pomiarów.

Parametry cieplne przyrządów półprzewodnikowych mogą być mierzone przy wykorzystaniu metod stykowych [6], metod optycznych i pośrednich metod elektrycznych [7]. Standardy międzynarodowe [8] zalecają stosowanie pośrednich metod elektrycznych, w których mierzony jest przebieg czasowy parametru termoczułego (np. napięcia na spolaryzowanym w kierunku przewodzenia złączu p-n) przy ustalonej wartości mocy wydzielanej w badanym przyrządzie. W oparciu o uzyskany przebieg czasowy zmian tego parametru wyliczany jest przebieg temperatury wnętrza i przejściowa impedancja termiczna rozważanego elementu.

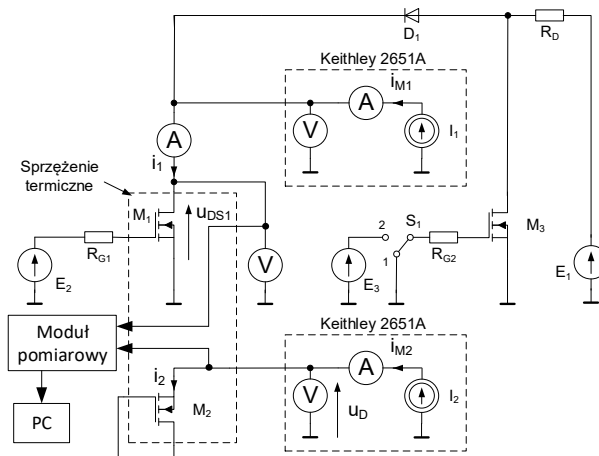
W literaturze [6, 8, 9] można znaleźć opisy różnych systemów pomiarowych dedykowanych do pomiaru parametrów cieplnych przyrządów półprzewodnikowych. Każdy z nich realizuje inną metodę pomiarową i używa innego przyrządu rejestrującego zmiany wartości parametru termoczułego.

W niniejszej pracy przedstawiono autorski system do pomiaru parametrów cieplnych tranzystorów MOS mocy.

Opisano budowę i koncepcję pracy tego systemu. W szczególności zwrócono uwagę na właściwości modułu rejestrującego wartości parametru termoczułego i programu zarządzającego procesem pomiarowym. Poprawność działania systemu pomiarowego zilustrowano wynikami pomiarów.

Struktura układu pomiarowego

Opracowany układ pomiarowy umożliwia wyznaczenie własnych i wzajemnych przejściowych impedancji termicznych tranzystorów MOS mocy. Schemat tego układu pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat opracowanego układu pomiarowego

W układzie tym badane tranzystory MOS mocy sprzężone ze sobą termicznie, np. przez wspólny radiator, oznaczono symbolami M_1 oraz M_2 . W charakterze parametru termoczułego wykorzystywana jest rezystancja kanału włączonego tranzystora M_1 oraz napięcie na spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diodzie podłożowej tranzystora M_2 . Pomiar wykonywany jest w 4 etapach. Najpierw mierzone są charakterystyki termometryczne obu tranzystorów przy ich polaryzacji ze źródeł mierzających Keithley 2651A prądami równymi odpowiednio I_{M1} oraz I_{M2} . W tym etapie pomiaru przełącznik S_1 znajduje się w pozycji 2, a temperatura wnętrza

badanych tranzystorów jest regulowana przez zmianę temperatury otoczenia. W wyniku pomiaru wyznaczone jest nachylenie charakterystyk termometrycznych α_{ON} oraz α_D .

W drugim etapie pomiaru przełącznik S_1 znajduje się w pozycji 1 i w tranzystorze M_1 wydzielana jest moc równa iloczynowi prądu i_1 oraz napięcia u_{DS1} powodująca wzrost temperatury wnętrza obu tranzystorów. Etap ten trwa aż do uzyskania stanu termicznie ustalonego w badanych tranzystorach.

Etap trzeci rozpoczyna się w chwili $t = 0$, tj. w momencie przełączenia tranzystora M_3 na skutek zmiany pozycji przełącznika S_1 z 1 na 2. Wówczas rozpoczyna się studzenie tranzystorów M_1 i M_2 oraz rejestracja czasowych przebiegów obu parametrów termoczulych (R_{ON} tranzystora M_1 oraz u_D tranzystora M_2), aż do uzyskania stanu termicznie ustalonego. Ostatecznie, przebiegi $Z_{th}(t)$ oraz $Z_{thw}(t)$ są obliczane na podstawie przebiegów parametrów termoczulych zmierzonych w etapie trzecim, za pomocą wzorów

$$(1) \quad Z_{th}(t) = \frac{R_{ON}(t=0) - R_{ON}(t)}{\alpha_{ON} \cdot i_1 \cdot u_{DS1}}$$

$$(2) \quad Z_{thw}(t) = \frac{u_D(t=0) - u_D(t)}{\alpha_D \cdot i_1 \cdot u_{DS1}}$$

gdzie $R_{ON}(t=0)$ oraz $u_D(t=0)$ oznaczają odpowiednio rezystancję kanału włączanego tranzystora M_1 oraz napięcie na diodzie podłożowej tranzystora M_2 natychmiast po zakończeniu drugiego etapu pomiaru.

Napięcia na źródłach napięciowych E_2 i E_3 są znacznie większe od napięcia progowego zastosowanych tranzystorów, napięcie na źródle E_1 umożliwia regulację wartości prądu i_1 . Na dokładność pomiaru wpływa m.in. rozdzielczość i szybkość przetwarzania przetwornika analogowo-cyfrowego (modułu pomiarowego) zastosowanego do pomiaru rezystancji R_{ON} oraz napięcia u_D .

Karta pomiarowa

Rejestrację czasowych przebiegów parametrów termoczulych realizuje karta pomiarowa Measurement Computing USB-2404-60 [10]. Karta ta jest urządzeniem pomiarowym wyposażonym w 4 w pełni izolowane względem siebie oraz względem masy kanały pomiarowe.

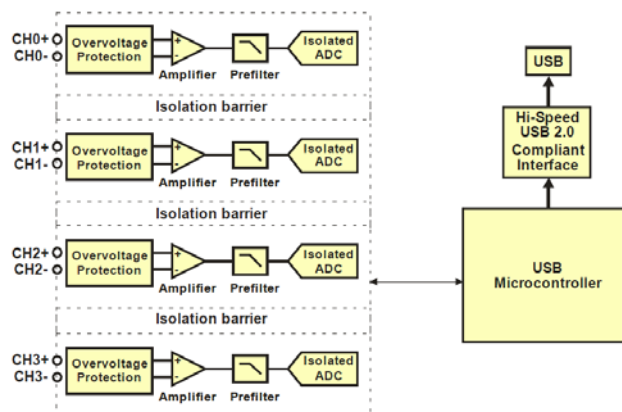
Schemat blokowy karty pomiarowej przedstawiono na rys. 2 [10].

Sygnał wejściowy jest kondycjonowany i następnie próbkowany przez 24-bitowe przetworniki A/C typu Delta-Sigma. Każdy kanał posiada niezależną ścieżkę sygnałową oraz przetwornik, pozwalające na próbkowanie wszystkich czterech kanałów jednocześnie. W torze sygnału wykorzystano filtry analogowe i cyfrowe. Częstotliwość graniczna pasma przenoszenia jest ustalana przez filtr cyfrowy i wynosi $0,547 \cdot f_s$. Filtr jest używany głównie w celu zapobiegania aliasingowi. Tłumienie w paśmie zaporowym przekracza 100 dB. Górna częstotliwość pasma wolnego od aliasingu wynosi $0,453 \cdot f_s$. Urządzenie posiada wbudowany generator o częstotliwości $f_M = 12,8$ MHz i może pracować przy szybkości próbkowania f_s z zakresu 1,613 kS/s do 50 kS/s ustalonej zgodnie z równaniem

$$(3) \quad f_s = \frac{f_M}{256 \cdot n} \quad)$$

gdzie n jest liczbą całkowitą z zakresu 1 do 31.

Opóźnienie sygnału wynosi $38,4/f_s + 2,6 \mu s$ (tj. $770,6 \mu s$ przy $f_s = 50$ kHz; $3,8426$ ms przy $f_s = 10$ kHz; $19,2026$ ms przy $f_s = 2$ kHz).



Rys. 2. Schemat blokowy karty pomiarowej

Urządzenie jest połączone z komputerem sterującym przy wykorzystaniu interfejsu USB 2.0 lub USB 1.1. Interfejs USB 2.0 zapewnia szybkość przepływu danych do 480 Mbps, a interfejs USB 1.1 - 12 Mbps [10]. Karta jest zasilana z komputera napięciem 5 V przez kabel USB.

Zakres pomiarowy obejmuje przedział napięć wejściowych od -60 V do 60 V. Dla każdego wejścia dopuszczalne jest napięcie do ± 100 V. Karta jest wyposażona w diodę LED sygnalizującą status urządzenia.

Urządzenie współpracuje z dedykowanym oprogramowaniem konfiguracyjnym producenta InstaCal oraz oprogramowaniem do wizualizacji i zapisu wyników TracerDAQ i DasyLab. Możliwa jest też praca w środowisku Lab View.

Niestety twórcy oprogramowania dostarczanego przez producenta karty pomiarowej przewidzieli jedynie możliwość wykonywania pomiarów ze stałym krokiem czasowym. W przypadku pomiarów przejściowej impedancji termicznej taki sposób rejestracji wyników pomiarów jest nieużyteczny, ponieważ wartości termicznych stałych czasowych przyrządów półprzewodnikowych mieszczą się w zakresie od ułamka milisekundy do kilku tysięcy sekund. Pomiaru wykonywane z bardzo krótkim krokiem czasowym powodują generowanie wielkiego pliku wynikowego. Z kolei, pomiary wykonywane z długim krokiem czasowym powodują utratę informacji o przebiegu $Z_{th}(t)$ dla małych wartości czasu. Dlatego autorzy opracowali i uruchomili program MCSscan sterujący procesem pomiarowym, który opisano w kolejnym rozdziale.

Program sterujący MCSscan

Program MCSscan służy do rejestracji, wizualizacji i zapisu danych pomiarowych pozyskiwanych przy wykorzystaniu kart pomiarowych firmy Measurement Computing. Program napisano w języku Python. Obsługuje on karty pomiarowe USB-2404-60 oraz USB-1608G. Typ karty jest identyfikowany automatycznie.

Interfejs graficzny programu został pokazany na rys. 3.

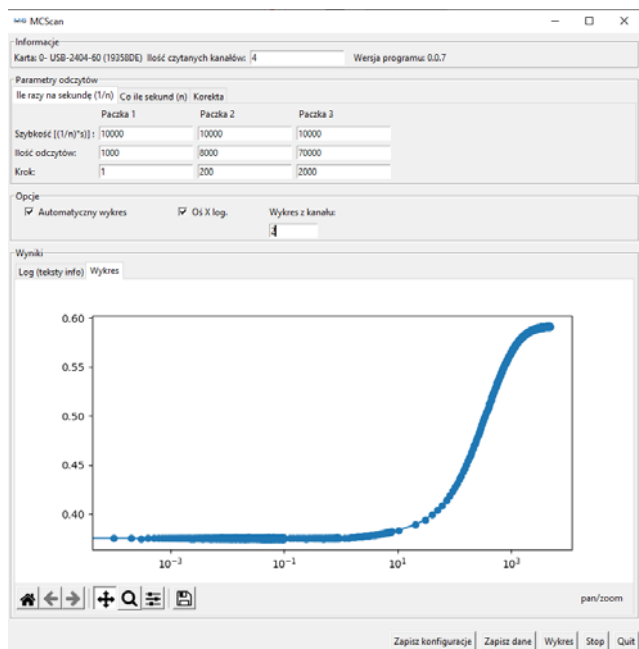
Jak widać, interfejs graficzny programu został podzielony na 4 pola: Informacje, Parametry odczytów, Opcje oraz Wyniki. Obsługa programu odbywa się za pomocą 5 przycisków: Zapisz konfigurację, Zapisz dane, Wykres, Start/Stop oraz Quit umieszczonych w prawym dolnym rogu okna programu.

Po uruchomieniu programu, w polu Informacje wyświetlany jest typ zidentyfikowanego urządzenia. Istnieje też możliwość wybrania liczby kanałów, z których dane będą odczytywane.

W polu Parametry odczytu znajdują się 3 zakładki: „Ile razy na sekundę”, „Co ile sekund” i „Korekta” pozwalające na konfigurowanie parametrów odczytu danych.

Program pozwala na zdefiniowanie łącznie 6 przedziałów czasu, w których pomiary będą wykonywane z ustaloną wartością kroku czasowego oraz na określenie parametrów odczytu danych w tych przedziałach.

Zakładki Ile razy na sekundę oraz Co ile sekund pozwalają na zdefiniowanie częstotliwości próbkowania, liczby próbek w każdym z przedziałów oraz kroku z jakim próbki zostaną zapisane do pliku wynikowego.



Rys. 3. Interfejs graficzny programu MCSan

Przycisk Zapisz konfigurację umożliwia wyeksportowanie ustawień programu do pliku tekstowego i ich zapamiętanie a przycisk Zapisz dane otwiera okno dialogowe zapisu pliku wynikowego w formacie csv.

Pole Opcje pozwala na wybranie kanału, z którego generowany jest wykres. Dodatkowo istnieje możliwość wybrania czy generowanie wykresu będzie się odbywać automatycznie, czy też na żądanie, po wciśnięciu przycisku Wykres. Oś czasu może być liniowa albo logarytmiczna.

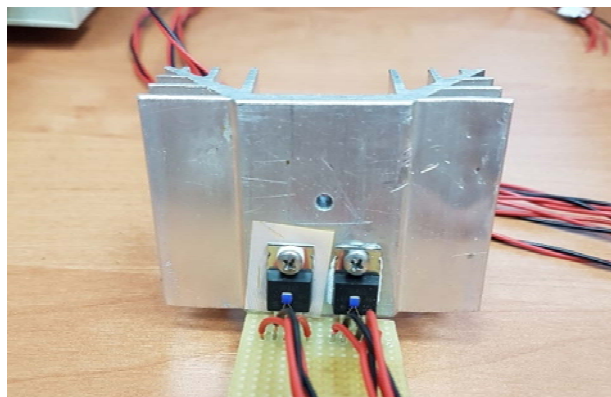
Pole Wyniki jest podzielone na dwie zakładki Log oraz Wykres. W zakładce Wykres prezentowany jest przebieg czasowy napięcia w wybranym kanale karty pomiarowej. Za pomocą narzędzi wykresu możliwe jest jego powiększanie i rozciąganie w obu płaszczyznach, a także zapisanie w postaci pliku graficznego.

Umieszczenie kursora myszy w obszarze wykresu powoduje wyświetlenie współrzędnych zaznaczonego punktu, co jest wygodnym narzędziem do szybkiej oceny uzyskanych wyników. Przycisk Start/Stop służy do uruchamiania i zatrzymywania rejestracji danych, a przycisk Quit zamyka okno programu.

Wyniki pomiarów testowych

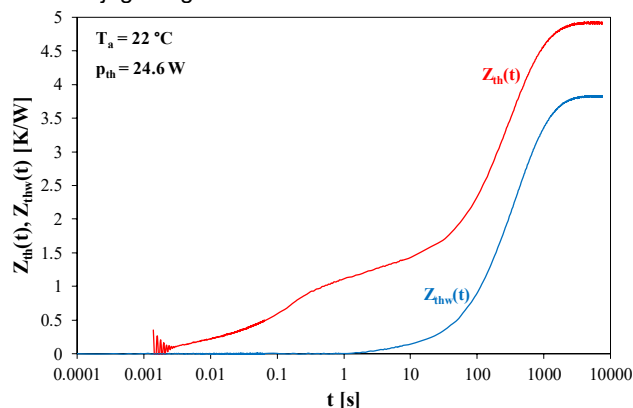
W celu wykazania praktycznej przydatności opracowanego układu pomiarowego wykonano pomiary parametrów cieplnych dwóch tranzystorów MOS mocy typu IRF840 [11] umieszczonych na wspólnym radiatorze. Radiator ten nie jest anodyzowany, ma wymiary 50×74×30 mm i waży 96,1 g [12]. Tranzystor M_2 został odizolowany elektrycznie od radiatora przy użyciu podkładki termoprzewodzącej [13].

Widok badanych przyrządów półprzewodnikowych pracujących w rozważanym systemie chłodzenia pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Widok badanych tranzystorów umieszczonych na wspólnym radiatorze

Na rys. 5 przedstawiono zmierzone przebiegi przejściowej impedancji termicznej $Z_{th}(t)$ tranzystora M_1 oraz wzajemnej przejściowej impedancji termicznej $Z_{thw}(t)$ między badanymi tranzystorami. Pomiary wykonano dla mocy o wartości $P_{th} = 24,6$ W wydzielanej w tranzystorze M_1 w czasie jego nagrzewania.



Rys. 5. Zmierzone przebiegi przejściowej impedancji termicznej tranzystora MOS mocy oraz wzajemnej przejściowej impedancji termicznej między tranzystorami pracującymi na wspólnym radiatorze

Na rys. 5 widać, że w stanie termicznie ustalonym, który jest obserwowany dla czasu $t > 2$ ks, wartość $Z_{th}(t)$ jest o ponad 20 % większa od wartości $Z_{thw}(t)$. Narastanie przebiegu $Z_{th}(t)$ rozpoczyna się już po upływie ok. 1 ms od chwili rozpoczęcia pomiaru, natomiast przebieg $Z_{thw}(t)$ przyjmuje zerowe wartości dla czasu $t < 1$ s. Oscylacje widoczne w początkowym fragmencie przebiegu $Z_{th}(t)$ są prawdopodobnie związane z działaniem filtra cyfrowego w module pomiarowym.

W oparciu o zmierzone wartości $Z_{th}(t)$ oraz $Z_{thw}(t)$ wyznaczono wartości temperatury wnętrza obu tranzystorów w stanie ustalonym. Uzyskano wartości równe odpowiednio 143 °C oraz 116 °C. Jednocześnie zmierzono temperatury obudowy obu tranzystorów przy wykorzystaniu termorezystorów [14]. Uzyskano wartości równe odpowiednio 107 oraz 99,8 °C, natomiast temperatura radiatora zmierzona pirometrem za płytką podłożową tranzystora M_1 oraz M_2 wynosi odpowiednio 118 i 115 °C. Pomiar pirometrem został wykonany przy wykorzystaniu taśmy HB250 o emisyjności równej 0,95 [15] przyklejonej do radiatora. Porównanie przedstawionych powyżej liczb wskazuje, że temperatura powierzchni obudowy tranzystorów jest znacznie niższa (nawet o 11 °C) od temperatury radiatora. Temperatura wnętrza tranzystora M_1 przekracza temperaturę radiatora o 25 °C, temperatura wnętrza tranzystora M_2 jest niższa od temperatury radiatora o 1 °C. Dane te potwierdzają przepływ ciepła od struktury

półprzewodnikowej tranzystora M_1 , która jest źródłem ciepła, przez radiator, do struktury półprzewodnikowej tranzystora M_2 . Wyniki te wskazują też na to, że stosowanie metody stykowej do oszacowania temperatury wnętrza tranzystora może powodować jej istotne zniżenie.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono autorski układ pomiarowy do wyznaczania parametrów cieplnych tranzystorów MOS mocy. W układzie tym zastosowano pośrednią metodę elektryczną do mierzenia przejściowej impedancji termicznej tranzystora MOS mocy oraz wzajemnej przejściowej impedancji termicznej między takimi tranzystorami umieszczonymi na wspólnym radiatorze. W charakterze parametru termoczułego wykorzystano rezystancję włączonego kanału oraz napięcie na spolaryzowanej w kierunku przewodzenia diodzie podłożowej.

Układ pomiarowy cechuje się wysoką rozdzielczością i szybkością rejestracji wartości parametrów termoczułych. Dzięki temu można wykonać pomiar parametrów cieplnych z wysoką dokładnością i przy uwzględnieniu krótkich interwałów czasu próbkowania. Autorski program zarządzający procesem pomiarowym umożliwia ograniczenie wielkości pliku wynikowego i uzyskanie szerokiego zakresu rejestracji przebiegów parametrów cieplnych, z uwzględnieniem przedziału czasu poniżej 10 ms.

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają, że wzajemne sprzężenia cieplne między elementami półprzewodnikowymi umieszczonymi na wspólnym radiatorze mogą w istotny sposób wpływać na wartość temperatury wnętrza tych elementów. Różnice między wartościami $Z_{th}(t)$ oraz $Z_{thw}(t)$ w stanie ustalonym odpowiadają wartości bliskiej rezystancji termicznej między wnętrzem a obudową badanego tranzystora MOS. Widoczne jest opóźnienie przebiegu $Z_{thw}(t)$ względem $Z_{th}(t)$. Przebieg $Z_{thw}(t)$ zaczyna narastać dopiero od 1 s.

Wykazano też, że temperatura na powierzchni obudowy badanych tranzystorów może być nawet o 15 °C niższa od temperatury radiatora, na którym są zamontowane badane tranzystory. Różnica ta jest mniejsza dla tranzystora, który jest źródłem ciepła w badanym układzie.

Przedstawione wyniki badań mogą być przydatne dla projektantów układów elektronicznych zawierających tranzystory MOS mocy. W dalszych pracach zostaną zaimplementowane w opisywanym układzie pomiarowym metody pomiarowe wykorzystujące inne parametry termoczułe tego przyrządu półprzewodnikowego.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Posobkiewicz, Aleksander Data, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: k.posobkiewicz@we.umg.edu.pl, k.gorecki@we.umg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] R. Perret, Power electronics semiconductor devices. John Wiley & Sons, Hoboken, 2009.
- [2] A. Castellazzi, Y.C. Gerstenmaier, R. Kraus and G.K.M. Wachutka, Reliability analysis and modeling of power MOSFETs in the 42-V-PowerNet, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, 2006, No. 3, pp. 603-612.
- [3] D. Schweitzer, F. Ender, G. Hantos, P.G. Szabo, Thermal transient characterization of semiconductor devices with multiple heat-sources – fundamentals for a new thermal standard, Microelectronics Journal, Vol. 46, 2015, pp. 174-182.
- [4] P. Górecki, K. Górecki: Measurements and computations of internal temperatures of the IGBT and the diode situated in the common case. Electronics, Vol. 10, No. 2, 2021, 210,
- [5] IRF840 HEXFET Power MOSFET, datasheet, International Rectifier, <https://datasheet.octopart.com/IRF840PBF-Vishay-datasheet-35178.pdf>
- [6] K. Posobkiewicz, K. Górecki: Influence of selected factors on thermal parameters of the components of forced cooling systems of electronic devices. Electronics, Vol. 10, No. 3, 2021, 340,
- [7] D.L. Blackburn, Temperature measurements of semiconductor devices – A review”, 20th IEEE Semicon. Thermal Measur. and Management Symp. SEMI-THERM, San Jose, 2004, pp. 70-80.
- [8] C.J.M. Lasance, A. Poppe: Thermal management for LED applications.; Springer Science+Business Media: New York, USA, 2014.
- [9] K. Górecki, P. Ptak, T. Torzewicz, M. Janicki: Influence of a thermal pad on selected parameters of power LEDs. Energies, Vol. 13, No. 14, 2020, 3732
- [10] USB 2404-60 USB-based Analog Input Device User's Guide, Measurement Computing Corporation; Rev. 2A, Nov 2009.
- [11] IRF840 HEXFET Power MOSFET, datasheet, International Rectifier, <https://datasheet.octopart.com/IRF840PBF-Vishay-datasheet-35178.pdf>
- [12] Extruded heat-sink Stonecold; https://www.tme.com/jp/en/details/rad-a4240_50/radiators/stonecold/
- [13] KAP 218 Fisher Elektronik; <https://www.tme.eu/pl/details/kap-218/radiatory-osprzet/fischer-elektronik/kap-218>.
- [14] Datasheet of Platinum Temperature Sensor PT1000-550, https://www.tme.eu/Document/67cf717905f835bc5efcdcd56ca3a8e2/Pt1000-550_EN.pdf;
- [15] <https://sklep.inrol.pl/produkty/Tasma-HB-250-0.95>