

doi:10.15199/48.2024.10.39

## Wpływ rozrzutu technologicznego parametrów tranzystorów MOS mocy na dokładność pomiaru ich rezystancji termicznej

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań ilustrujących wpływ rozrzutu technologicznego parametrów tranzystorów MOS mocy na błąd pomiaru ich rezystancji termicznej przy wykorzystaniu pośredniej metody elektrycznej. W charakterze parametru termoczułego wykorzystano napięcie bramka-źródło. Badania przeprowadzono na próbie 18 tranzystorów MOS mocy wybranych losowo z jednej partii produkcyjnej. Zmierzono charakterystyki termometryczne każdego z tranzystorów oraz wyznaczono współczynniki funkcji aproksymujących te charakterystyki. Wyznaczono wartości rezystancji termicznej z wykorzystaniem zarówno liniowej, jak i kwadratowej funkcji aproksymującej oraz parametrów tych funkcji uzyskanych dla różnych egzemplarzy badanych tranzystorów. Określono błąd pomiaru wartości napięcia bramka-źródło na uzyskaną wartość rezystancji termicznej związany z rozrzutem technologicznym.

**Abstract.** In the paper the results of investigation illustrating the influence of the technological spread the parameters of power MOS transistors on the measurement error of their thermal resistance using the indirect electrical method are presented. As a thermosensitive parameter the gate-source voltage was selected. The investigation was carried out on the sample of 18 power MOS transistors randomly chosen from the same production batch. The thermometric characteristics each of the transistors were measured and the coefficients of the functions approximating these characteristics were calculated for all transistors using linear and quadratic approximating function. The measurement error related with the technological spread of the value of the gate-source voltage on the value of the thermal resistance was calculated. (**Influence of technological spread of the parameters of power MOS transistors on the measurement error of their thermal resistance**).

**Słowa kluczowe:** tranzystory MOS mocy, parametry cieplne, pomiary, rezystancja termiczna, charakterystyki termometryczne, błąd pomiaru.

**Keywords:** power MOSFETs, thermal parameters, measurements, thermal resistance, thermometric characteristics, measurement error.

### Wprowadzenie

Jednym z podstawowych parametrów termicznych elementów elektronicznych jest rezystancja termiczna  $R_{th}$ . Jest to parametr, który określa zdolność do odprowadzania ciepła ze struktury półprzewodnikowej do otoczenia i jest definiowany wzorem [1, 2]

$$(1) \quad R_{th} = \frac{T_j - T_a}{p},$$

w którym  $T_j$  oznacza temperaturę wnętrza elementu,  $T_a$  – temperaturę otoczenia, a  $p$  – moc wydzielaną w elemencie.

Wartość  $R_{th}$  zależy od wielu czynników, m.in. budowy elementu oraz warunków jego zasilania i chłodzenia [3, 4]. Wartość  $R_{th}$  elementów współpracujących z układem chłodzenia lub wykorzystanych w warunkach odbiegających od katalogowych typowo określa się na drodze pomiarowej, np. przy wykorzystaniu pośredniej metody elektrycznej [2]. Metoda ta wykorzystuje zależność wybranego parametru elektrycznego od temperatury. W przypadku tranzystorów MOS mocy parametrami termoczułymi są m.in. napięcie bramka-źródło  $u_{GS}$ , spadek napięcia na diodzie antyrównoległej  $u_F$ , jak również rezystancja kanału  $R_{DS(on)}$ . W przypadku każdego z tych parametrów należy zastosować inny układ polaryzacji tranzystora. Ponadto parametry te charakteryzuje różna czułość na zmiany temperatury. Jak wynika z pracy [5] spośród wymienionych parametrów największą czułość zapewnia wykorzystanie napięcia  $u_{GS}$ .

Zastosowanie pośredniej metody elektrycznej do pomiaru rezystancji termicznej wymaga wykonania pomiaru zależności wybranego parametru termoczułego od temperatury wnętrza elementu, czyli charakterystyka termometryczna. Uzyskane wyniki aproksymuje się wybraną funkcją, którą następnie wykorzystuje się do wyznaczenia wartości  $R_{th}$ . Typowo stosuje się funkcję liniową [6], jednak jak wykazano w pracy [7], w przypadku tranzystorów MOS mocy i wykorzystania  $u_{GS}$  w charakterze parametru termoczułego, zastosowanie aproksymacji liniowej może prowadzić do znacznych błędów pomiaru  $R_{th}$ .

Alternatywnym podejściem jest wykorzystanie aproksymacji nieliniowej, np. funkcją kwadratową, co pozwala na zredukowanie błędu pomiaru.

W celu dokładnego wyznaczenia wartości  $R_{th}$  z wykorzystaniem pośredniej metody elektrycznej należy zmierzyć charakterystykę termometryczną każdego badanego tranzystora. W przypadku dużej liczby elementów podejście to może okazać się jednak zbyt czasochłonne i niepraktyczne. Przykładowo w pracy [8] zastosowano liniową aproksymację charakterystyk termometrycznych oraz współczynniki funkcji aproksymującej charakterystykę termometryczną pojedynczego tranzystora do wyznaczenia rezystancji termicznej wielu tranzystorów MOS mocy.

Jak wynika m.in. z prac [5, 9] napięcie progowe tranzystorów MOS mocy w ustalonej temperaturze może znacznie różnić się w przypadku różnych egzemplarzy tych tranzystorów, nawet jeśli pochodzą one z tej samej partii produkcyjnej. W przypadku wykorzystania napięcia  $u_{GS}$  w charakterze parametru termoczułego konieczne staje się uwzględnienie rozrzutu technologicznego.

Celem pracy jest dokonanie oceny wpływu rozrzutu technologicznego wartości napięcia bramka-źródło na wartość rezystancji termicznej populacji tranzystorów MOS mocy w przypadku wykorzystania charakterystyki termometrycznej losowo wybranego tranzystora do wyznaczenia wartości  $R_{th}$  pozostałych tranzystorów z populacji.

Praca obejmuje wymienione niżej zagadnienia. Opisano w niej wykorzystaną w badaniach metodę pomiaru rezystancji termicznej. Zaprezentowano wyniki pomiarów charakterystyk termometrycznych badanych tranzystorów. Przedstawiono wyniki obliczeń współczynników aproksymujących te charakterystyki z wykorzystaniem funkcji kwadratowej i liniowej. Zaprezentowano i przeanalizowano wyniki pomiarów rezystancji termicznej badanych tranzystorów uzyskane w różnych warunkach zasilania i chłodzenia.

## Metoda pomiarowa

Pomiar rezystancji termicznej tranzystora MOS mocy przy wykorzystaniu pośredniej metody elektrycznej realizuje się w kilkuetapowej procedurze pomiarowej za pomocą układu opisanego w pracy [3].

W pierwszym etapie dokonuje się pomiaru charakterystyki termometrycznej  $u_{GS}(T_j)$ . W tym celu wymusza się pracę tranzystora w zakresie nasycenia przy ustalonej wartości napięcia dren-źródło  $u_{DS} = U_{DS}$  oraz prądu drenu  $i_D = I_M$ . Badany tranzystor umieszcza się w komorze termostatycznej, a następnie mierzy się wartość  $u_{GS}$  odpowiadającą różnym wartościom temperatury  $T_k$  wewnątrz tej komory. Prawidłowa realizacja pomiaru wymaga spełnienia warunku  $T_j = T_k$ .

Drugi etap procedury pomiarowej realizuje się w dwóch krokach. Krok 1 obejmuje nagrzewanie, a krok 2 – chłodzenie badanego tranzystora. Podczas nagrzewania tranzystor pracuje w zakresie nasycenia, przy tej samej wartości napięcia  $u_{DS}$  jak podczas pomiaru zależności  $u_{GS}(T_j)$  i prądzie  $i_D \gg I_M$  zapewniającym wydzielenie w tranzystorze mocy o pożądanej wartości  $p = i_D \cdot u_{DS}$ . W czasie nagrzewania temperatura wnętrza tranzystora rośnie w wyniku samonagrzewania, aż do osiągnięcia stanu termicznie ustalonego. Po osiągnięciu tego stanu następuje zmiana polaryzacji tranzystora i przejście do chłodzenia. Wówczas przez tranzystor płynie prąd pomiarowy  $i_D = I_M$  i rejestrowana jest tzw. krzywa chłodzenia  $u_{GS}(t)$ . Pomiar kończy się po zrównaniu temperatury wnętrza tranzystora  $T_j$  z temperaturą otoczenia  $T_a$ . Na podstawie zmierzonej charakterystyki termometrycznej  $u_{GS}(T_j)$ , poprzez zamianę zmiennych, wyznacza się zależność  $T_j(u_{GS})$ , którą wykorzystuje się następnie do wyznaczenia wartości rezystancji termicznej  $R_{th}$ .

Wykorzystanie zależności  $T_j(u_{GS})$  do wyznaczenia  $R_{th}$  wymaga dokonania aproksymacji danych pomiarowych przy wykorzystaniu wybranej funkcji. W oparciu o definicję  $R_{th}$  daną wzorem (1), zmierzoną charakterystykę termometryczną  $u_{GS}(T_j)$  i krzywą chłodzenia  $u_{GS}(t)$ , rezystancję termiczną wyznaczono w pracy dwiema metodami, różniącymi się przyjętym modelem aproksymacji zależności  $T_j(u_{GS})$ . Przy zastosowaniu aproksymacji zależności  $T_j(u_{GS})$  funkcją liniową (metoda L) wartość  $R_{th}$  wyznaczana jest ze wzoru

$$(2) \quad R_{th} = \frac{a_1(u_{GS1} - u_{GS2})}{p}$$

Z kolei, przy aproksymacji zależności  $T_j(u_{GS})$  funkcją kwadratową (metoda N) wartość  $R_{th}$  wyznaczana jest ze wzoru

$$(3) \quad R_{th} = \frac{b_2(u_{GS1}^2 - u_{GS2}^2) + b_1(u_{GS1} - u_{GS2})}{p}$$

W równaniach (2) i (3)  $u_{GS1}$  jest wartością napięcia bramka-źródło badanego tranzystora w momencie rozpoczęcia jego chłodzenia, a  $u_{GS2}$  wartością napięcia bramka-źródło badanego tranzystora po zrównaniu temperatury wnętrza tranzystora z temperaturą otoczenia ( $T_j = T_a$ ). Współczynnik  $a_1$  występujący w równaniu (2) oznacza współczynnik kierunkowy liniowej funkcji aproksymującej zależność  $T_j(u_{GS})$  danej wzorem (4), natomiast współczynniki  $b_1$  i  $b_2$  – współczynniki funkcji kwadratowej opisanej wzorem (5)

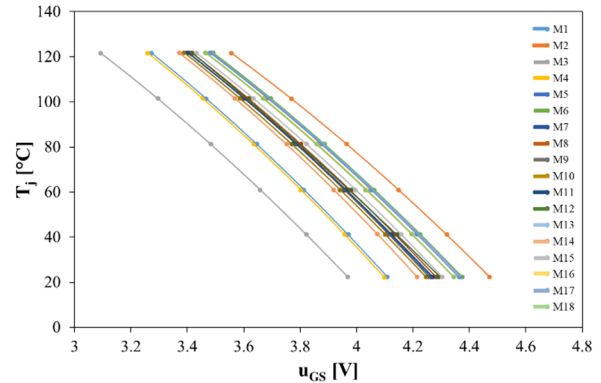
$$(4) \quad T_j = a_1 u_{GS} + a_0$$

$$(5) \quad T_j = b_2 u_{GS}^2 + b_1 u_{GS} + b_0$$

Ze wzorów (2) i (3) wynika, że wartości współczynników  $a_0$  i  $b_0$  nie mają znaczenia przy wyznaczaniu wartości  $R_{th}$  wybraną metodą, dlatego te współczynniki zostały pominięte w dalszej analizie.

## Wyniki badań

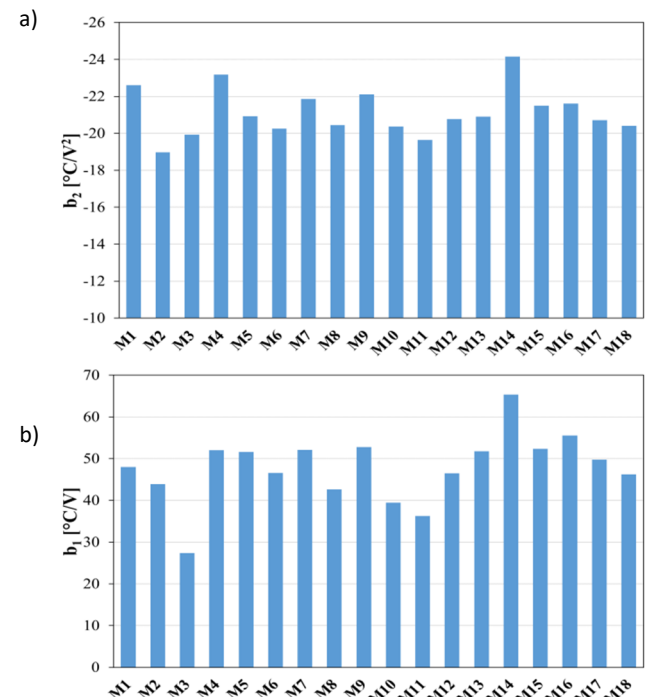
Przy wykorzystaniu metody opisanej w poprzednim rozdziale wykonano pomiary charakterystyk termometrycznych osiemnastu tranzystorów MOS mocy typu FDB52N20 wybranych losowo z tej samej partii produkcyjnej. Pomiary te wykonano przy prądzie pomiarowym  $I_M = 2$  mA oraz napięciu dren-źródło  $U_{DS} = 10$  V. Zależności  $T_j(u_{GS})$  wyznaczone na podstawie tych pomiarów przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zależności  $T_j(u_{GS})$  badanych tranzystorów

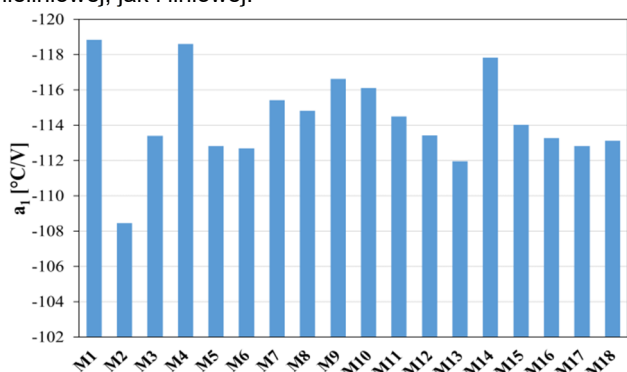
Wartości napięcia  $u_{GS}$  odpowiadające poszczególnym tranzystorom przy ustalonej temperaturze wnętrza istotnie różnią się między sobą. W skrajnym przypadku, tj. dla tranzystorów M2 i M3, wartość tej różnicy w temperaturze  $20$  °C przekracza aż  $12$  %. Różne jest także nachylenie charakterystyk dla różnych tranzystorów.

Przy wykorzystaniu wyników pomiarów pokazanych na rys. 1, metodą regresji wielomianowej [10, 11] wyznaczono współczynniki funkcji aproksymujących uzyskane zależności  $T_j(u_{GS})$ . Obliczenia przeprowadzono dla dwóch przypadków – funkcji kwadratowej oraz funkcji liniowej. Wyznaczone wartości współczynników kwadratowej aproksymującej przedstawiono na rys. 2, a funkcji liniowej – na rys. 3.



Rys. 2. Wartości współczynników  $b_2$  i  $b_1$  kwadratowej funkcji aproksymującej zależność  $T_j(u_{GS})$  badanych tranzystorów

Jak wynika z rys. 2 i 3, wartości współczynników odpowiadające poszczególnym tranzystorom istotnie różnią się od siebie zarówno w przypadku aproksymacji nieliniowej, jak i liniowej.

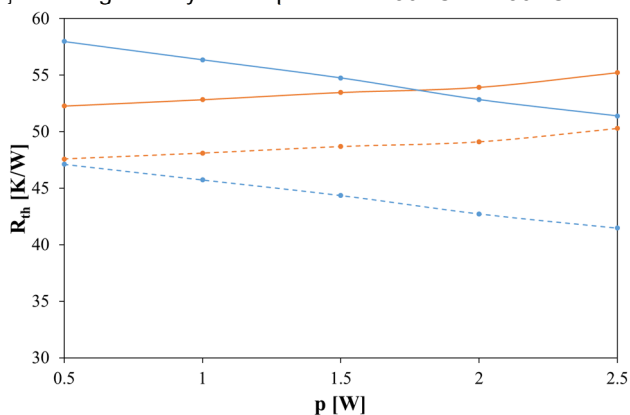


Rys. 3 Wartości współczynnika  $a_1$  liniowej funkcji aproksymującej zależność  $T_j(u_{GS})$  badanych tranzystorów

W przypadku aproksymacji nieliniowej różnice wartości współczynnika  $b_2$  sięgają 27 %, a współczynnika  $b_1$  nawet 39 %. Z kolei, w przypadku aproksymacji liniowej, różnice wartości współczynnika  $a_1$  dla poszczególnych tranzystorów są mniejsze od 10 %. Wartość  $a_1$  w tym przypadku wyraża nachylenie charakterystyki  $T_j(u_{GS})$ . Jest ono najmniejsze w przypadku tranzystora M2, zaś największe w przypadku tranzystora M1.

Przy wykorzystaniu badanych tranzystorów zamontowanych na płytkach testowych opisanych w pracy [3] wykonano szereg pomiarów ich rezystancji termicznej przy różnych warunkach zasilania i chłodzenia. Wartości  $R_{th}$  wyznaczono z zastosowaniem obu rozważanych w pracy funkcji aproksymujących oraz różnych zestawów współczynników tych funkcji, tzn. wartości wyznaczonych dla konkretnego tranzystora i wartości dla tranzystora M2, co odpowiada skrajnej charakterystyce termometrycznej z rys. 1. Zestawy współczynników ponumerowano zgodnie z numeracją tranzystorów, dla których zostały wyznaczone. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na rys. 4 – 6.

Na rys. 4 przedstawiono zależność rezystancji termicznej tranzystora M1 od mocy wydzielanej w tym tranzystorze. Kolorem niebieskim oznaczono krzywe wyznaczone metodą N, a kolorem pomarańczowym – metodą L. Linie ciągłe odpowiadają wartościom  $R_{th}$  wyznaczonym z wykorzystaniem współczynników funkcji aproksymujących wyznaczonych dla tranzystora M1 (zestaw M1), a linie przerywane - wartościom z zestawu M2. Wybrany zakres zmian mocy  $p$  odpowiada wartościom  $T_j$  badanego tranzystora z przedziału 50 °C do 150 °C.

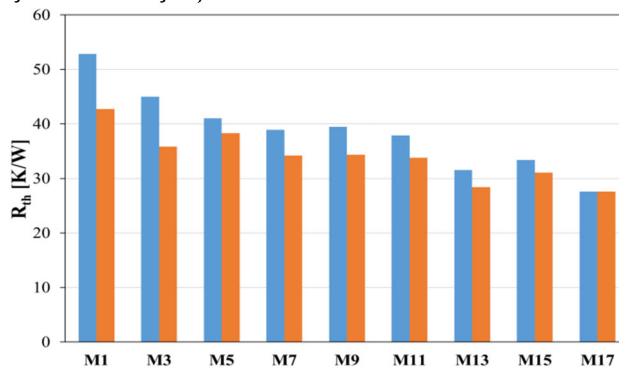


Rys. 4 Zależności  $R_{th}(p)$  tranzystora M1 zamontowanego na płytce testowej przy aproksymacji charakterystyki termometrycznej funkcją kwadratową i funkcją liniową

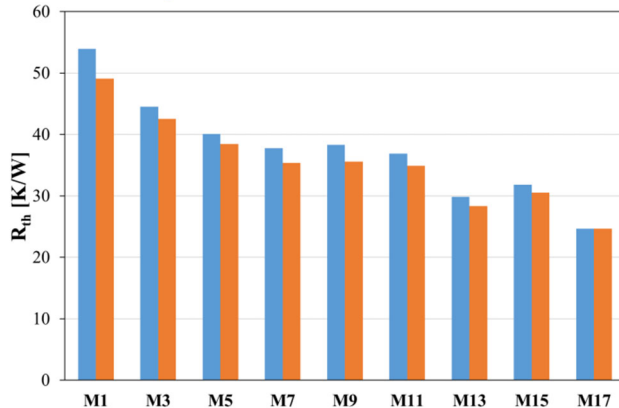
W zależności od rodzaju wybranej funkcji aproksymującej zależność  $T_j(u_{GS})$  oraz wyboru zestawu współczynników funkcji aproksymującej, uzyskane wartości  $R_{th}$  mogą znacznie się od siebie różnić. Ponadto, uzyskuje się zależność  $R_{th}(p)$  o charakterze malejącym albo rosnącym. W skrajnym przypadku, przy mocy  $p = 2,5$  W, wartości  $R_{th}$  dla tranzystora M1 uzyskane metodą L i współczynników z zestawu M1 oraz uzyskane metodą N i współczynników z zestawu M2 różnią się aż o 33 %. Z rys. 1 wynika, że wartość tej różnicy mogłaby być jeszcze większa, jeżeli współczynniki z zestawu M2 zostałyby wykorzystane do wyznaczenia wartości  $R_{th}$  tranzystora M3.

Zastosowanie współczynników z zestawu M2 do wyznaczenia rezystancji termicznej tranzystora M1 metodą N powoduje zaniżanie wartości  $R_{th}$  o ok. 19 %. W przypadku metody L różnica wartości  $R_{th}$  uzyskanych z wykorzystaniem współczynników z zestawu M1 i zestawu M2 wynosi 9 %. Wyniki te, oprócz błędu wynikającego z rozrzutu wartości  $u_{GS}$ , są jednak obciążone także błędem związanym z pominięciem nieliniowości zależności  $T_j(u_{GS})$ . Całkowity błąd wyznaczenia  $R_{th}$  w tym przypadku sięga 10 % gdy wykorzystuje się współczynniki z zestawu M1 oraz 18 % w przypadku wykorzystania współczynników z zestawu M2.

Z kolei na rys. 5 i 6 porównano wartości  $R_{th}$  tranzystorów o numerach nieparzystych z badanej populacji M1 – M18 wyznaczone z wykorzystaniem współczynników funkcji aproksymującej zależność  $T_j(u_{GS})$  każdego z tych tranzystorów (kolor niebieski) oraz z wykorzystaniem współczynników z zestawu M2 (kolor pomarańczowy). Pomiary wykonano przy tej samej wartości mocy wydzielanej w każdym z tranzystorów, równej 2 W, ale w różnych warunkach chłodzenia (montaż na różnych płytkach testowych).

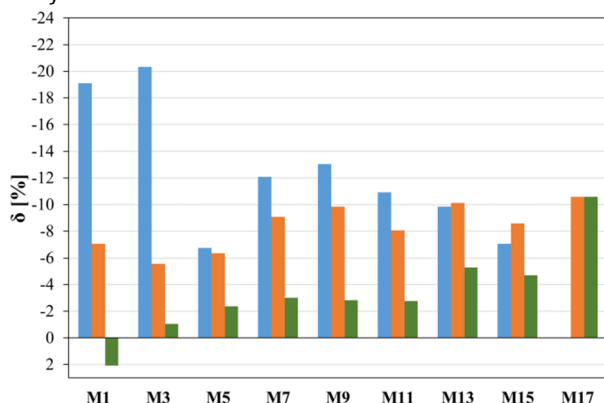


Rys. 5 Wartości  $R_{th}$  wybranych tranzystorów z badanej populacji M1 - M18, zamontowanych na różnych płytkach testowych zmierzone metodą N



Rys. 6 Porównanie wartości  $R_{th}$  wybranych tranzystorów z badanej populacji M1 - M18, zamontowanych na różnych płytkach testowych zmierzone metodą L

Jak widać na rys. 5 i 6 różnice wartości  $R_{th}$  uzyskanych dla różnych tranzystorów przy wykorzystaniu metody N sięgają 19 %, zaś w przypadku metody L – 9 %. Wyniki pokazane na rys. 6 nie uwzględniają błędów związanych z pominięciem nieliniowości zależności  $T_j(u_{GS})$ . Wartości całkowite względnego błędów pomiaru  $R_{th}$  badanych tranzystorów pokazano na rys. 7. Kolorem niebieskim oznaczono wyniki uzyskane metodą N z wykorzystaniem współczynników funkcji aproksymującej z zestawu M2, kolorem pomarańczowym – wyniki uzyskane metodą L i współczynnikami z zestawu M2, zaś kolorem zielonym wyniki uzyskane metodą L i współczynnikami każdego z tranzystorów. Jako poprawne przyjęto wartości  $R_{th}$  uzyskane metodą N i współczynnikami każdego z tranzystorów.



Rys. 7 Porównanie wartości błędów pomiaru  $R_{th}$  wybranych tranzystorów z badanej populacji M1 - M18

Błąd pomiaru  $R_{th}$  jest w badanych warunkach największy przy wykorzystaniu metody N i współczynników z zestawu M2. Wartość błędów pomiaru  $R_{th}$  tranzystora M3 przekracza w tym przypadku 20 %. Mniejsze rozbieżności uzyskano stosując metodę L. W takiej sytuacji wartość błędów nie przekraczała 11 %. Należy jednak zauważyć, że wyniki pokazane na rys. 6 i 7 uzyskano przy wartościach  $T_j$  badanych tranzystorów przekraczających 75 °C. W przypadku niższych wartości  $T_j$  błąd pomiaru  $R_{th}$  z wykorzystaniem aproksymacji liniowej byłby większy.

### Podsumowanie

W pracy opisano wyniki badań wpływu rozrzutu technologicznego parametrów tranzystorów MOS mocy na wartość rezystancji termicznej tych tranzystorów wyznaczoną przy wykorzystaniu pośredniej metody elektrycznej i napięcia bramka-źródło w charakterze parametru termoczułego. Badania przeprowadzono dla aproksymacji zależności  $T_j(u_{GS})$  badanych tranzystorów za pomocą funkcji liniowej (metoda L) oraz funkcji kwadratowej (metoda N).

Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie współczynników funkcji aproksymującej losowo wybranego tranzystora MOS do wyznaczenia rezystancji termicznej wielu elementów tego typu, nawet z tej samej serii produkcyjnej może prowadzić do znacznego błędów wyznaczenia wartości tego parametru. W zależności od tego, który z tranzystorów zostanie wybrany jako referencyjny oraz jaką stosuje się funkcję aproksymującą zależność  $T_j(u_{GS})$ , uzyskane wyniki mogą być zawyżane, bądź zaniżane. Różnice w uzyskanych w ten sposób wartościach  $R_{th}$  mogą sięgać nawet 33%. Wartość ta dotyczy sytuacji, w których temperatura wnętrza badanych tranzystorów  $T_j$  wynosi co najmniej 50 °C. W przypadku pomiarów  $R_{th}$  przy niższych wartościach  $T_j$  różnice te mogą być jeszcze większe.

Należy zauważyć, że wykorzystanie liniowej funkcji aproksymującej skutkuje mniejszym rozrzutem wartości  $R_{th}$ , jednak są one obciążone błędem związanym z pominięciem nieliniowości zależności  $T_j(u_{GS})$ . Pominięcie tej nieliniowości w analizowanym w pracy przypadku powoduje, że otrzymany charakter zmian  $R_{th}(p)$  jest niefizyczny. W skrajnym przypadku, błąd wyznaczenia wartości  $R_{th}$  badanych tranzystorów w zakresie  $T_j$  od 50 °C do 150 °C z wykorzystaniem współczynników losowo wybranego tranzystora i liniowej aproksymacji zależności  $T_j(u_{GS})$  może sięgać 10 %, natomiast z wykorzystaniem funkcji kwadratowej 20 %.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że należy z dużą ostrożnością traktować wyniki pomiarów parametrów termicznych tranzystorów MOS mocy, które uzyskano metodą inną niż z wykorzystaniem charakterystyki termometrycznej każdego z tranzystorów oraz nieliniowej aproksymacji tych charakterystyk. Przeprowadzone badania potwierdzają, że dokładne wyznaczenie wartości rezystancji termicznej każdego z tranzystorów z populacji wymaga wykonania pomiarów charakterystyk termometrycznych oraz wyznaczenia parametrów funkcji aproksymujących te charakterystyki osobno dla każdego z tych tranzystorów.

**Autorzy:** dr inż. Krzysztof Posobkiewicz, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 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] D.L. Blackburn: Temperature Measurements of Semiconductor Devices – A Review, 20th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium SEMI-THERM, San Jose, 2004, pp. 70-80.
- [3] K. Górecki, K. Posobkiewicz, Influence of a PCB Layout Design on the Efficiency of Heat Dissipation and Mutual Thermal Couplings between Transistors, Electronics, Vol. 12, No. 19, 2023, 4116, <https://doi.org/10.3390/electronics12194116>
- [4] P. Górecki, Compact Thermal Modeling of Power Semiconductor Devices with the Influence of Atmospheric Pressure. Energies, Vol. 15, 2022, 3565. <https://doi.org/10.3390/en15103565>
- [5] K. Górecki, K. Posobkiewicz, Selected Problems of Power MOSFETs Thermal Parameters Measurements Energies 2021, 14(24), 8353; DOI: 10.3390/en14248353
- [6] Y. Avenas, L. Dupont, Z. Khatir, Temperature measurement of power semiconductor devices by thermo-sensitive electrical parameters – a review, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, No. 6, pp. 3081-3092, 2012
- [7] K. Górecki, K. Posobkiewicz, Influence of the selection the approximating function of thermometric characteristics on the measurement results of thermal resistance of power MOSFETs, Metrology and Measurement Systems, Vol. 31, No. 2, 2024
- [8] A. Pietruszka, P. Górecki, S. Wroński, B. Illés, A. Skwarek, The Influence of Soldering Profile on the Thermal Parameters of Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs), Applied Sciences Vol.11, No. 12, 2021, 5583
- [9] Karta katalogowa tranzystora FDB52N20, Fairchild Semiconductor, 11.2013, <https://www.onsemi.com/download/data-sheet/pdf/fdb52n20-d.pdf>, dostęp 09.2023
- [10] Zaiontz C., (2020) Real Statistics Using Excel, www.real-statistics.com, dostęp 09.2023
- [11] Howell, D. C. (2010) Statistical methods for psychology (7th ed.), Wadsworth, Cengage Learning. <https://labs.la.utexas.edu/gilden/files/2016/05/Statistics-Text.pdf>, dostęp 09.2023