



POLITECHNIKA POZNAŃSKA  
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki  
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej  
Zakład Metrologii, Elektroniki i Techniki Świetlnej



## **Rozprawa doktorska**

### **Termowizyjne pomiary temperatury elementów półprzewodnikowych**

The thermographic measurements of the temperature  
of the semiconductors elements

**mgr inż. Krzysztof Dziarski**

Dziedzina nauk: inżynierijno-techniczne

Dyscyplina naukowa: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Wiczyński, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Arkadiusz Hulewicz

Poznań, 2024 r.

## Streszczenie

Układy elektroniczne zbudowane są z różnorodnych komponentów. Jednymi z nich są urządzenia półprzewodnikowe, które składają się z obudowy i elementu półprzewodnikowego, nazywanego również półprzewodnikiem. Wraz ze zmianą temperatury półprzewodnika zmieniają się właściwości urządzenia półprzewodnikowego, a w konsekwencji działanie układu elektronicznego zawierającego to urządzenie. Dlatego informacja o bieżącej temperaturze półprzewodnika jest ważna na etapie prototypowania i eksploatacji urządzeń półprzewodnikowych.

**W rozprawie zaproponowano metodę termowizyjnego pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych. Przedstawiona metoda pośredniego pomiaru temperatury umożliwi oszacowanie temperatury elementu półprzewodnikowego w działającym układzie elektronicznym. Zaproponowana metoda składa się z dwóch głównych etapów: termowizyjnego pomiaru temperatury odpowiednio wybranego miejsca na obudowie urządzenia półprzewodnikowego oraz oszacowania temperatury elementu półprzewodnikowego na podstawie wyniku uprzednio wykonanego pomiaru termowizyjnego. Do pomiaru temperatury obudowy zastosowano kamerę termowizyjną z matrycą niechłodzonych czujników mikrobolometrycznych działających w paśmie LWIR. Dla oszacowania temperatury elementu półprzewodnikowego wykonano symulacje numeryczne (MES) rozkładu temperatury w wybranych obudowach urządzeń półprzewodnikowych. Opracowano budżet niepewności pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego.**

Dla oceny metrologicznej zaproponowanej metody pomiaru przeprowadzono badania porównawcze. Wyniki pomiaru według zaproponowanej metody zestawiono z wynikami pomiarów temperatury elementów półprzewodnikowych metodą elektryczną oraz wynikami obliczeń symulacyjnych. Wyznaczone wartości niepewności pośredniego pomiaru metodą elektryczną porównano z niepewnością pomiaru określoną na podstawie opracowanego budżetu – uzyskano części wspólne przedziałów ufności. W przeprowadzonych badaniach wykonano pomiary temperatury elementów półprzewodnikowych wykonanych na bazie krzemu, węgliku krzemu oraz azotku galu w obudowach TO-220 oraz TO-247. Wyznaczono temperaturę urządzeń półprzewodnikowych bez radiatora oraz z dołączonymi radiatorami o różnej rezystancji termicznej dla konwekcji swobodnej. W celu przeprowadzenia badań zbudowano specjalistyczne stanowisko pomiarowe.

**Przedstawione w rozprawie wyniki badań eksperymentalnych i symulacyjnych dowodzą, że możliwe jest wykonanie pośredniego termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego z akceptowalną niepewnością.**

## Abstract

Electronic circuits are built from a variety of components. Among these are semiconductor devices, which consist of a housing and a semiconductor element, also known as a semiconductor. As the temperature of the semiconductor changes, the properties of the semiconductor device and consequently the performance of the electronic circuit containing the device change. Therefore, information on the current temperature of the semiconductor is important in the prototyping and operation of semiconductor devices. **This dissertation proposes a method for and the advantages of thermal imaging measurement of the temperature of semiconductor elements.**

**The presented method of indirect temperature measurement makes it possible to estimate the temperature of a semiconductor element in an operating electronic circuit. The proposed method consists of two main steps: thermal imaging measurement of the temperature of a suitably selected location on the semiconductor device housing and estimation of the semiconductor element temperature based on the result of the thermal imaging measurement performed previously. A thermal imaging camera with a matrix of uncooled microbolometer sensors operating in the LWIR band was used to measure the temperature of the housing. To estimate the temperature of the semiconductor element, numerical simulations (FEA) of the temperature distribution were performed for selected semiconductor device housings. An uncertainty budget for the semiconductor element temperature measurement was developed.**

For the metrological evaluation of the proposed method, comparative tests were carried out. The measurement results from the proposed method were compared with the results of temperature measurements of semiconductor elements using the electrical method and the results of simulation calculations. The uncertainty values determined for the indirect measurement using the electrical method were compared with the measurement uncertainty determined on the basis of the developed budget, and common parts of the confidence intervals were obtained. In this study, temperature measurements of silicon, silicon carbide and gallium nitride-based semiconductor elements in TO 220 and TO 247 housings were taken. The temperatures of semiconductor devices without heat sinks and with attached heat sinks of different thermal resistance for free convection were determined.

A specialised test bench was built to carry out the tests. The experimental and simulation results presented in the dissertation demonstrate that it is possible to perform **indirect thermal imaging measurements of the temperature of a semiconductor component with acceptable uncertainty.**

## Spis treści

	Terminy, definicje oraz wykaz skrótów i stałych	7
	Terminy i definicje	7
	Wykaz skrótów i stałych	8
1	Wstęp	11
2	Przegląd metod pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych	14
2.1	Budowa wybranych elementów półprzewodnikowych	14
2.2	Elektryczne metody pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego	16
2.2.1	Napięcie przewodzenia diody jako TSP	18
2.2.2	Napięcie progowe tranzystora polowego jako TSP	19
2.2.3	Wzmocnienie prądowe tranzystora bipolarnego jako TSP	20
2.2.4	Inne wykorzystywane TSP	21
2.3	Stykowe metody pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego	21
2.3.1	Termopara	22
2.3.2	Ciekłe kryształy	23
2.3.3	Fosfor termograficzny	24
2.4	Bezstykowe metody pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego	24
2.4.1	Pomiar termowizyjny	24
2.4.1.1	Termowizyjny pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego	24
2.4.1.2	Wpływ wybranych czynników na termowizyjny pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego	25
2.4.2	Termorefleksja	29

2.4.3	Luminescencja	29
2.5	Wyznaczenie rozkładu temperatury w obudowie elementów półprzewodnikowych	30
2.5.1	Metoda uwzględniająca rezystancje termiczną	30
2.5.2	Metoda elementów skończonych	30
2.6	Niepewność termowizyjnego pomiaru temperatury	32
2.6.1	Podstawy fizyczne termowizyjnego pomiaru temperatury	32
2.6.2	Wyznaczenie niepewności pomiaru	34
2.6.3	Wpływ nieostrości termogramu	36
3	Termowizyjny pomiar temperatury elementów półprzewodnikowych	39
3.1	Koncepcja pomiaru termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego	39
3.2	Czynniki wpływające na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury $T_C$ obudowy urządzenia półprzewodnikowego	41
3.2.1	Wpływ współczynnika emisyjności $\varepsilon$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$	42
3.2.2	Wpływ kąta obserwacji na wynik pomiaru temperatury $T_C$	42
3.2.3	Wpływ odległości $d$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$	43
3.2.4	Wpływ nieostrości termogramu na wynik pomiaru temperatury $T_C$	44
3.2.5	Wpływ temperatury odbitej $T_r$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$	46
3.2.6	Wpływ transmitancji soczewki $\tau_l$ dodatkowego obiektywu na wynik pomiaru temperatury $T_C$	47
3.2.7	Wpływ temperatury $T_l$ soczewki dodatkowego obiektywu, temperatury otoczenia $T_a$ oraz wilgotności $\omega$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$	48
3.3	Termowizyjny pomiar temperatury obudowy urządzeń półprzewodnikowych	49
3.3.1	Stanowisko pomiarowe oraz warunki panujące w trakcie pomiaru	49

3.3.2	Pomiar temperatury na powierzchni obudowy urządzenia półprzewodnikowego	54
3.4	Wyznaczenie temperatury elementu półprzewodnikowego	58
3.4.1	Wewnętrzna budowa urządzenia półprzewodnikowego	59
3.4.2	Rozkład temperatury w obudowach urządzeń półprzewodnikowych	67
3.5	Weryfikacja termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego oraz otrzymanych zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego i temperaturą obudowy urządzenia półprzewodnikowego	71
3.6	Budżet niepewności termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego	85
4.	Przykładowe wyniki pomiarów temperatury struktur półprzewodnikowych w obudowach znajdujących się w otwartej przestrzeni lub zabudowanych na radiatorze	96
5.	Podsumowanie	111
	Bibliografia	113

## **Terminy, definicje oraz wykaz skrótów i stałych**

### **Terminy i definicje**

W pracy użyto definicji i symboli pochodzących ze standardów JESD51 zaproponowanych przez JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) oraz z Międzynarodowego Słownika Metrologii. Definicje, których nie odnaleziono w JESD opracowano na podstawie tych wytycznych oraz materiałów prezentowanych w uznanych czasopismach.

**DUT** – (Device Under Test) – urządzenie poddawane testom.

**Element półprzewodnikowy** – część robocza, aktywny czip urządzenia półprzewodnikowego, który jest umieszczony we wnętrzu obudowy. Jest to fragment płytki półprzewodnikowej poddanej procesom dyfuzji i utleniania, implementacji jonów, fotolitografii, osadzania oraz wytrawiania. W literaturze anglojęzycznej element półprzewodnikowy jest nazywany die lub semiconductor chip.

**EMC** – (Epoxy Mold Compound) – czarne tworzywo pokrywające element półprzewodnikowy, które tworzy część jego obudowy. Uwaga: w literaturze akronim EMC zazwyczaj dotyczy hasła kompatybilności elektromagnetycznej – jednak w niniejszej rozprawie będzie on wskazywać na czarne tworzywo obudowy.

**MES** – Metoda Elementów Skończonych.

**Obudowa elementu półprzewodnikowego** – obudowa, we wnętrzu której umieszczono element półprzewodnikowy. W publikacjach anglojęzycznych obudowa jest nazywana case lub package.

**PCB** – (Printed Circuit Board) – płytka z obwodem drukowanym, na której umieszczono urządzenia półprzewodnikowe.

**SMD** – (Surface-Mount Devices) – obudowa elementu elektronicznego przeznaczona do montażu powierzchniowego.

**THT** – (Through-Hole Technology) – obudowa elementu elektronicznego przeznaczona do montażu przewlekanego.

**TSP** (Thermal Sensitive Parameter) – parametr elementu półprzewodnikowego, którego wartość jest zależna od jego temperatury.

**WD** (Work Distance) – odległość pomiędzy obserwowaną powierzchnią i obiektywem kamery termowizyjnej, którą należy zachować w celu uzyskania ostrego termogramu.

**Urządzenie półprzewodnikowe** – obudowa z elementem półprzewodnikowym.

**Złącze półprzewodnikowe** – część robocza aktywnej jednookładowej diody półprzewodnikowej. W źródłach anglojęzycznych złącze półprzewodnikowe jest nazywane junction.

## Wykaz skrótów i stałych

- $a, b$  – współczynniki wykorzystywane w liczeniu liczby Grashofa,  
 $a_1, b_1, a_2, b_2$  – współczynniki wykorzystywane w wyznaczaniu wartości  $T_{\Delta}$   
 $c$  – ciepło właściwe powietrza ( $1005 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  w  $T_a = 273,15 \text{ K}$ ),  
 $C_i$  – współczynnik czułości,  
 $C_{ox}$  – wewnętrzna pojemność tlenkowa obszaru bramki tranzystora unipolarnego,  
 $C_{TR}$  – współczynnik termoodbicia,  
 $d$  – odległość pomiędzy soczewką i obserwowanym obiektem,  
 $d_r$  – odległość zmierzona za pomocą MMR30,  
 $d_s$  – odległość zmierzona za pomocą FT50RLA-70-S1L8,  
 $D^2$  – wariancja (jako miara nieostrości termogramu),  
 $E_g$  – pasmo wzbronione (dla krzemu  $1,12 \text{ eV}$  w temperaturze  $T = 273,15 \text{ K}$ ),  
 $f$  – funkcja pomiarowa,  
 $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  – przyspieszenie grawitacyjne,  
 $Gr$  – liczba Grashofa,  
 $h$  – krok (w trakcie obliczeń nieostrości obrazu),  
 $H_i$  – liniowa funkcja kształtu (w trakcie wyznaczania rozkładu temperatur za pomocą MES),  
 $h_{FE}$  – wzmacnienie prądowe tranzystora bipolarnego,  
 $h_r$  – współczynnik radiacji,  
 $h_+$  – górna granica zakresu wielkości wejściowej,  
 $h_-$  – dolna granica zakresu wielkości wejściowej,  
 $i = 1, \dots, 4, a_i, b_i, c_i$  i  $d_i$  – współczynniki (używane w trakcie modelowania za pomocą MES),  
 $I_B$  – prąd bazy tranzystora bipolarnego,  
 $I_C$  – prąd kolektora tranzystora bipolarnego,  
 $I_D$  – prąd diody półprzewodnikowej,  
 $I_F$  – prąd przewodzenia,  
 $I_M$  – prąd przepływający przez element półprzewodnikowy w chwili pomiaru jego temperatury  $T_j$  za pomocą metody elektrycznej,  
 $I_{PT}$  – prąd przepływający przez czujnik Pt1000,  
 $I_{se}$  – prąd nasycenia,  
 $k$  – przewodność cieplna,  
 $K_a = 1,9$  – współczynnik tłumienia atmosfery,  
 $k_i$  – współczynnik kalibracji będący ilorazem TSP oraz temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$ ,  
 $M$  i  $N$  – wymiary macierzy zawierającej informacje z pikseli termogramu,  
 $N_A$  – gęstość domieszkowania,  
 $Nu$  – liczba Nusselta [-],  
 $L$  – charakterystyczna długość w metrach (dla ściany pionowej jest to jej wysokość),  
 $P_j$  – moc wydzielona w elemencie półprzewodnikowym,  
 $Pr$  – liczba Prandtla,  
 $P_M$  – moc wydzielona w elemencie półprzewodnikowym w chwili przepływu  $I_M$ ,  
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  – ładunek elektronu,  
 $r$  – współczynnik rozszerzenia,  
 $R_{DS}$  – rezystancja kanału dren-źródło tranzystora unipolarnego,  
 $R_{Pt1000}$  – rezystancja czujnika Pt1000,  
 $R_{thj-a}$  – rezystancja termiczna element półprzewodnikowy – otoczenie,



$R_{thj-c}$  – rezystancja termiczna element półprzewodnikowy – obudowa,  
 $R_w$  – rezystancja wyprowadzeń,  
 $s$  – współczynnik wrażliwości,  
 $T$  – temperatura w skali Kelvina,  
 $T_a$  – temperatura otoczenia (powietrza wokół analizowanego elementu półprzewodnikowego, urządzenia półprzewodnikowego lub radiatora, do którego przymocowano urządzenie półprzewodnikowe),  
 $T_C$  – temperatura obudowy urządzenia półprzewodnikowego,  
 $T_{CC}$  – wartości temperatury obudowy zmierzona za pomocą kamery termowizyjnej,  
 $T_{Ci}$ ,  $T_{Ci-1}$  – wartości temperatur otrzymywane w poszczególnych iteracjach obliczeń numerycznych,  
 $T_{CP}$  – wartości temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego zmierzona za pomocą czujnika Pt1000,  
 $T_{CS}$  – wartości temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego wyznaczona na podstawie prac symulacyjnych,  
 $T_d$  – wartość progu dyskryminacji,  
 $T_i(t)$  – temperatura w węźle  $i$  (w trakcie wyznaczania rozkładu temperatur za pomocą MES),  
 $T_j$  – temperatura elementu półprzewodnikowego,  
 $T_{jc}$  – temperatura elementu półprzewodnikowego wyznaczona na podstawie pomiaru termowizyjnego,  
 $T_{je}$  – wartości temperatury elementu półprzewodnikowego zmierzone za pomocą metody elektrycznej,  
 $T_{js}$  – wartości temperatury elementu półprzewodnikowego wyznaczone na podstawie prac symulacyjnych,  
 $T_k$  – wynik pomiaru temperatury wykonany kamera termowizyjną,  
 $T_{kz}$  – temperatura żebra radiatora mierzona za pomocą kamery termowizyjnej,  
 $T_{ks}$  – temperatura na środku radiatora (nad urządzeniem półprzewodnikowym) mierzona za pomocą kamery termowizyjnej,  
 $T_L$  – temperatura wyprowadzeń,  
 $T_l$  – temperatura soczewki zewnętrznego systemu optycznego,  
 $t_m$  – czas trwania pomiaru,  
 $T_r$  – temperatura odbita,  
 $T_{Pts}$  – temperatura na środku radiatora (nad urządzeniem półprzewodnikowym) mierzona za pomocą Pt1000,  
 $T_{Ptz}$  – temperatura żebra radiatora mierzona za pomocą Pt1000,  
 $T_{Pt1000}$  – temperatura czujnika Pt1000,  
 $T_S$  – temperatura powierzchni,  
 $T_{us}$  – ostrość termogramu (reprezentowana temperaturą),  
 $W_{tot}$  – całkowita energia, która dociera do obiektywu kamery termowizyjnej,  
 $U$  – rozszerzona niepewność pomiaru,  
 $u(T_{Pt1000t})$  – wielkość związana z błędem własnym czujnika Pt1000,  
 $u^2(x_i)$  – wariancja wielkości wejściowej,  
 $u(x_i)$  – niepewność standardowa wielkości wejściowej,  
 $u(y)$  – niepewność standardowa wielkości wyjściowej,  
 $U_a$  – napięcie Early'ego,  
 $U_{be}$  – spadek napięcia na złączu baza-emiter,  
 $U_{ce}$  – spadek napięcia na złączu kolektor-emiter,

$U_F$  – napięcie przewodzenia – dodatnie napięcie pomiędzy anodą i katodą złącza półprzewodnikowego,  
 $U_{th}$  – napięcie progowe,  
 $U_G$  – napięcie bramki tranzystora unipolarnego,  
 $U_H$  – napięcie grzewcze (w trakcie przepływu  $I_H$ ),  
 $U_M$  – napięcie pomiarowe,  
 $U_{PT}$  – napięcie pomiędzy zaciskami czujnika Pt1000 włączonego w obwód pomiarowy,  
 $y$  – wartość wyjściowa,  
 $x_i$  – estymaty wielkości wejściowej,  
 $X_i$  – analizowana wielkość wejściowa,  
 $y$  – estymata wielkości wyjściowej,  
 $\epsilon_c$  – współczynnik emisyjności wybranej powierzchni obudowy,  
 $\epsilon_z$  – znana wartość współczynnika emisyjności,  
 $\epsilon_{Si}$  – stała dielektryczna krzemu Si,  
 $\Delta d$  – przyrost wartości  $d$ ,  
 $\Delta \gamma$  – przyrost wartości  $\gamma$ ,  
 $\Delta TSP$  – zmiana wartości TSP,  
 $\nabla S(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  – wartość gradientu Sobela,  
 $\lambda_{max}$  – maksymalna długość fali emitowanego promieniowania,  
 $T_\beta$  – czynnik związany ze zmianą kąta obserwacji,  
 $T_A$  – różnica pomiędzy wartością  $T_j$  i  $T_C$ ,  
 $T_{\Delta j_c}$  – różnica pomiędzy wartością  $T_{j_s}$  i  $T_{C_s}$ ,  
 $\alpha = 0,0034 \text{ K}^{-1}$  – współczynnik rozszerzenia,  
 $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  – współczynniki tłumienia atmosfery (nieuwzględniające pary wodnej),  
 $\alpha_k$  – współczynnik konwekcji płaskich powierzchni,  
 $\beta_1$  i  $\beta_2$  – współczynniki tłumienia atmosfery (uwzględniające obecność pary wodnej),  
 $\beta$  – kąt obserwacji,  
 $\gamma$  – położenie katowe pierścienia regulacji ostrości, który znajduje się na obiektywie kamery termowizyjnej,  
 $\gamma_s = 3$  – stała,  
 $\Delta \rho$  – względną zmianą refleksyjności obserwowanej powierzchni,  
 $\delta_{us}$  – nieostrość rejestrowanego termogramu,  
 $\epsilon$  – emisyjność obserwowanej powierzchni,  
 $\eta$  – lepkość dynamiczna powietrza ( $1,75 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  w  $T_a = 273,15 \text{ K}$ ),  
 $\lambda$  – długość fali,  
 $\nu$  – liczba falowa,  
 $\rho_0$  – refleksyjność obserwowanej powierzchni,  
 $\rho_p = 1,21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  przy  $273,15 \text{ K}$  – gęstość powietrza,  
 $\sigma = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  – stała Boltzmanna,  
 $\tau_a$  – transmitancja atmosfery,  
 $\tau_l$  – transmitancja soczewki zewnętrznego systemu optycznego,  
 $\varphi$  – średnica,  
 $\psi_B$  – odległość poziomu Fermiego od środkowej przerwy energetycznej,  
 $\omega$  – wilgotność.

## 1. Wstęp

Układy elektroniczne obecne w wielu dziedzinach życia zawierają różnorodne komponenty aktywne i bierne. Do takich komponentów należą urządzenia półprzewodnikowe składające się z obudowy i elementu półprzewodnikowego (nazywanego również półprzewodnikiem). Wraz ze zmianą temperatury półprzewodnika zmieniają się właściwości urządzenia półprzewodnikowego. Na podstawie wiadomości o jego temperaturze można pozyskać informacje o stanie elementu półprzewodnikowego. Zbyt wysoka temperatura elementu półprzewodnikowego lub jego fragmentu może świadczyć o wydzieleniu w nim zbyt dużej mocy. Może również oznaczać, że ten element nie działa prawidłowo. Ponadto, istnieją inne zagrożenia związane z pracą elementu półprzewodnikowego przy zbyt wysokiej temperaturze, wśród których należy wymienić krótszy czas eksploatacji, a nawet uszkodzenie urządzenia zawierającego ten element. Informacja o niskiej temperaturze elementu półprzewodnikowego może natomiast świadczyć o małej wartości mocy, która została w nim wydzielona oraz, że być może element został przewymiarowany i może zostać poddany większym obciążeniom. Może również świadczyć o przewymiarowaniu układu chłodzącego element półprzewodnikowy, a w konsekwencji o poniesieniu nadmiernych kosztów.

Mechanizm powstawania ciepła w elemencie półprzewodnikowym, wpływ temperatury na jego wybrane parametry oraz tendencje rozwoju metod pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego zostały szeroko przedstawione w literaturze. Opisano również powstawanie ciepła w tym elemencie na skutek wydzielania mocy, przekazywania ciepła we wnętrzu obudowy poprzez przewodnictwo oraz przekazywania ciepła z obudowy tego elementu na drodze konwekcji i radiacji. W literaturze zaprezentowano także wpływ wydzielanej temperatury na działanie elementów półprzewodnikowych i ich wybrane właściwości, a także metody pomiaru tej temperatury. Przedstawione w literaturze metody pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego można przydzielić na trzy grupy:

- metody elektryczne,
- metody stykowe,
- metody bezstykowe.

Zasady wyznaczenia temperatury elementu półprzewodnikowego za pomocą metody elektrycznej opisano w standardach JESD, wydanych przez Stowarzyszenie Technologii Półprzewodnikowych JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council). Zawierają one opis zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego, temperaturą obudowy elementu półprzewodnikowego oraz temperaturą otoczenia. W standardach JESD opisano również wskazówki dotyczące pomiaru rezystancji termicznej na drodze element półprzewodnikowy – obudowa elementu półprzewodnikowego oraz wykorzystanie wybranych fragmentów elementu półprzewodnikowego (połączenie, pojedyncze złącze półprzewodnikowe) do wyznaczenia jego temperatury. Dodatkowo JESD zawierają zbiór symboli, które autorzy standardów proponują stosować w opisie poszczególnych wielkości fizycznych związanych z pomiarem temperatury elementu półprzewodnikowego.

Zgodnie z treściami zawartymi w JESD metody elektryczne polegają na wykorzystaniu charakterystyki wiążącej wartość wybranego parametru elektrycznego elementu półprzewodnikowego z wartością jego temperatury. Dla różnych urządzeń półprzewodnikowych wykorzystywane są różne parametry. Dokładność, z którą można

wyznaczyć temperaturę elementu półprzewodnikowego za pomocą metod elektrycznych jest zależna od rozdzielczości przetwornika użytego do pomiaru wartości wybranego parametru elektrycznego.

Estymacja temperatury elementu półprzewodnikowego za pomocą metod elektrycznych nie jest zaliczana do łatwych czynności. W metodzie tej charakterystyka wiążąca wartość parametru elektrycznego z temperaturą elementu półprzewodnikowego jest wyznaczana dla konkretnego układu półprzewodnikowego. Wyznaczanie takiej charakterystyki jest kłopotliwe z uwagi na konieczność umieszczenia badanego elementu w komorze z regulowaną wartością temperatury oraz długi czas potrzebny do ustalenia temperatury wewnątrz półprzewodnika. W związku z tym utrudnione jest monitorowanie temperatury elementu półprzewodnikowego w czasie rzeczywistym i jest to metoda nieprzydatna do wyznaczenia jego temperatury dla urządzenia umieszczonego w PCB (Printed Circuit Board).

Tych niedogodności można uniknąć stosując metody stykowe. Polegają one na przyłożeniu czujnika temperatury do elementu półprzewodnikowego (stykowy pomiar bezpośredni) lub do jego obudowy (stykowy pomiar pośredni). Wykonanie stykowego pomiaru bezpośredniego wymaga dostępu do elementu półprzewodnikowego. W tym celu konieczne jest zniszczenie jego obudowy, którą następnie trudno naprawić. Z tego powodu element ze zniszczoną obudową nie nadaje się do ponownego użycia. Ponadto, przyłożenie czujnika temperatury bezpośrednio do elementu półprzewodnikowego grozi jego uszkodzeniem oraz zmienia jego termiczne warunki pracy.

Pomiar stykowy pośredni nie wymaga bezpośredniego dostępu do elementu półprzewodnikowego w związku z czym można uniknąć niedogodności związanych z otworzeniem obudowy. Wadą tej metody jest fakt określania temperatury obudowy i związana z tym konieczność odniesienia uzyskanego wyniku pomiaru do temperatury elementu półprzewodnikowego. Kolejną niedogodnością jest możliwość zaburzenia rozptyłu temperatury na obudowie elementu półprzewodnikowego pod wpływem przyłożonego czujnika temperatury. Do utrudnień tej metody można również zaliczyć nieznaną wartość przewodności cieplnej pomiędzy obudowa elementu półprzewodnikowego i obudową czujnika oraz ryzyko porażenia prądem elektrycznym.

To ryzyko nie zachodzi przy zastosowaniu metod bazujących na pomiarze bezstykowym. W metodach tych pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego jest realizowany poprzez absorpcję promieniowania optycznego emitowanego przez obserwowaną powierzchnię i analizy uzyskanych wyników pomiaru. W metodzie tej może być wykorzystany pirometr, który umożliwia pomiar temperatury w jednym punkcie. W praktycznych zastosowaniach więcej informacji można uzyskać analizując mapę rozkładu temperatury na wybranej powierzchni elementu półprzewodnikowego, co jest możliwe przy zastosowaniu kamery termowizyjnej. W tej grupie metod można wykonać termowizyjny pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego (pomiar bezpośredni) oraz wyznaczyć temperaturę elementu półprzewodnikowego na podstawie termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy elementu półprzewodnikowego (pomiar pośredni). Ze względu na brak konieczności demontażu obudowy, w praktycznych zastosowaniach łatwiejszy i częściej realizowany jest bezstykowy termowizyjny pomiar pośredni.

Wykonanie poprawnego termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy elementu półprzewodnikowego jest obarczone trudnościami. Jedną z nich jest dopasowanie spektralnego

zakresu czujników zastosowanych w kamerze termowizyjnej do zakresu spektralnego promieniowania emitowanego z obudowy elementu półprzewodnikowego. Inną trudnością jest dobór właściwej wartości współczynnika emisyjności tej obudowy. Należy również skompensować wpływ warunków środowiskowych na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury i określić na obudowie najlepsze miejsce do wykonania pomiaru.

Poprawne wykonanie termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy elementu półprzewodnikowego nie pozwala uzyskać informacji o temperaturze samego elementu półprzewodnikowego. W celu uzyskania tej informacji potrzebne jest odniesienie termowizyjnego wyniku pomiaru temperatury obudowy do temperatury elementu półprzewodnikowego. Jest to możliwe przy zastosowaniu modeli wiążących obie wartości temperatur z rezystancją termiczną obudowy i mocą wydzieloną w elemencie półprzewodnikowym oraz równań opisujących przewodzenie ciepła. Szczegółowe informacje wiążące te wielkości można uzyskać w wyniku analizy trójwymiarowego modelu rozkładu temperatur w obudowie elementu półprzewodnikowego.

Uwzględniając powyższe aspekty postanowiono podjąć się prac badawczych, których celem było opracowanie metodyki przeprowadzenia poprawnego termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy elementu półprzewodnikowego, w tym wskazanie miejsca na obudowie punktu pomiarowego oraz wyznaczenie różnicy pomiędzy temperaturą wskazanego punktu pomiarowego a temperaturą elementu półprzewodnikowego. Sformułowano następującą tezę badawczą:

**Na podstawie odpowiednio wykonanego termogramu obudowy urządzenia półprzewodnikowego, przy znajomości niezbędnych wartości parametrów katalogowych obudowy, możliwe jest wystarczająco dokładne określenie temperatury elementu półprzewodnikowego tego urządzenia.**

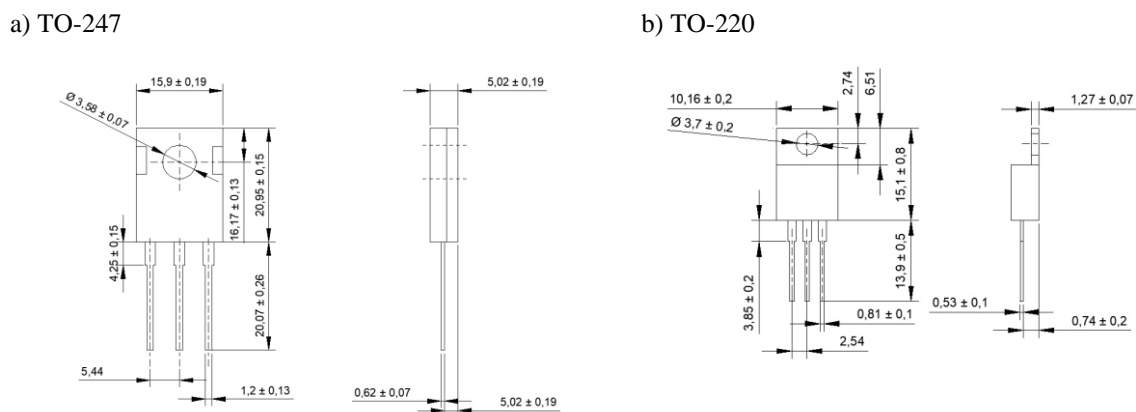
Pierwszy rozdział zawiera wprowadzenie. W drugim rozdziale dokonano przeglądu literatury i analizy aktualnego stanu wiedzy dotyczącego metod pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych. W opisie tym szczególną uwagę zwrócono na termowizyjny pomiar temperatury obudowy elementów półprzewodnikowych. Zaprezentowano również budowę elementów półprzewodnikowych, metody modelowania rozkładu temperatury wewnątrz obudowy oraz szacowanie niepewności termowizyjnego pomiaru temperatury. W trzecim rozdziale przedstawiono wyniki pomiarów uzyskane w efekcie przeprowadzonych prac badawczych. W rozdziale czwartym zaprezentowano przykłady wykorzystania zaproponowanej metody do oceny temperatury elementu półprzewodnikowego na podstawie pomiaru temperatury jego obudowy, a w rozdziale piątym zawarto podsumowanie.

## 2. Przegląd metod pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych

### 2.1 Budowa wybranych elementów półprzewodnikowych

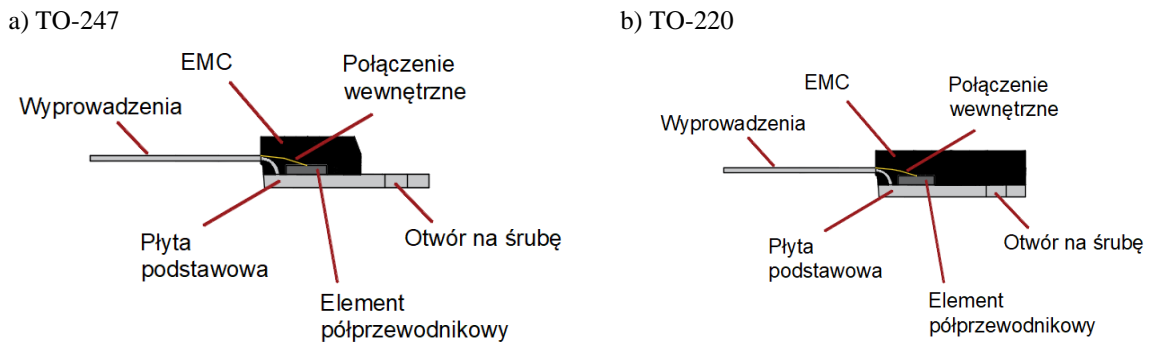
W celu wykonania wiarygodnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego (umieszczonego w zamkniętej obudowie) niezbędne jest zrozumienie procesu propagacji ciepła w urządzeniu półprzewodnikowym. Wymaga to poznania struktury wewnętrznej urządzeń półprzewodnikowych.

Obudowy elementów półprzewodnikowych można podzielić na obudowy przeznaczone do montażu powierzchniowego SMD (Surface-Mount Devices) [1] oraz przeznaczone do montażu przewlekanego THT (Through-Hole Technology) [2]. Spośród obudów THT na uwagę zasługują obudowy o nazwie TO [3,4], ze względu na fakt, że duża część stosowanych w praktyce elementów półprzewodnikowych (diod prostowniczych [5], diod Schottky'ego [6] i tranzystorów [7, 8]) jest umieszczonych w obudowach TO-220 [9] i TO-247 [10]. Obudowy TO-220 i TO-247 różnią się względem siebie wymiarami zewnętrznymi oraz wewnętrznymi, co zostało zaprezentowane na rysunku 1.



**Rysunek 1:** Wymiary zewnętrzne obudów badanych elementów.

W przypadku obu obudów można wyróżnić trzy zasadnicze części ich konstrukcji. Pierwszą z nich jest czarny fragment obudowy, wykonany z EMC (Epoxy Mould Compoud) [13, 14], który stanowi jej powierzchnię zewnętrzną i obejmuje największy obszar. W przypadku obudowy TO-247 tylna strona oraz niewielkie fragmenty przedniej strony obudowy nie są pokryte EMC. Drugą z części jest płyta podstawowa z otworem na śrubę umożliwiającą przymocowanie do zewnętrznego radiatora. Ta część wykonana jest z cynowanej miedzi [15]. Ostatnią z części, którą można wyróżnić są wyprowadzenia umożliwiające umieszczenie elementu na płytce PCB (Printed Circuit Board) [16] i są wykonane z cynowanej miedzi. Widok obu obudów pokazano na rysunku 2.



**Rysunek 2:** Widok przekroju obudowy badanych elementów.

Bezpośrednio pod częścią wykonaną z EMC znajduje się element półprzewodnikowy. Jest on połączony z wyprowadzeniami za pomocą cienkich drucików, które w literaturze anglojęzycznej nazywane są bonding wire [17]. W przypadku obu obudów tylko środkowe wyprowadzenie jest połączone z płytą podstawową, pozostałe dwa wyprowadzenia są zatopione w EMC. Rozmieszczenie tych połączeń oraz wymiary wewnętrzne obudów TO-220 i TO-247 są istotne w dalszych badaniach. Ze względu na brak niezbędnych informacji, konieczne było przeprowadzenie prac, w efekcie których określono rozkład połączeń i wymiary wewnętrzne obu obudów. Metodyka badań, uzyskane wyniki pomiarów oraz ich zastosowanie w pracach badawczych zostało opisane w dalszej części rozprawy (Rozdział 3).

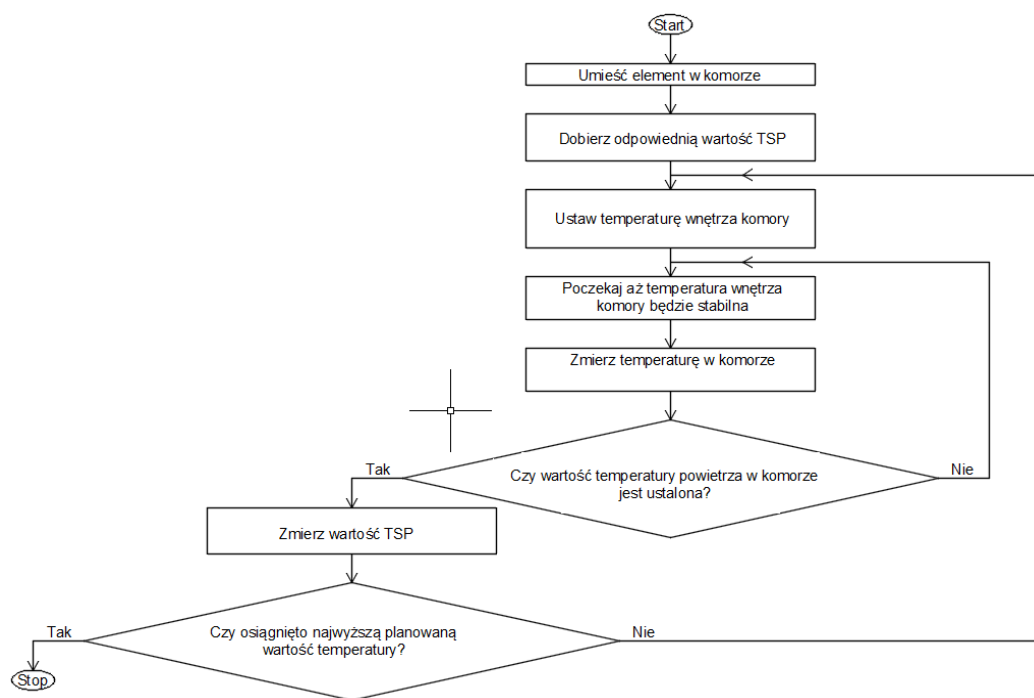
Wykorzystane w przeprowadzonych badaniach urządzenia półprzewodnikowe umieszczone w obudowach TO-220 oraz TO-247 poza standardowym rozwiązaniem konstrukcyjnych mogą również zawierać kilka elementów półprzewodnikowych. Rozwiązanie takie nazywane jest kaskadą i współcześnie stosowane jest coraz powszechniej, głównie w celu poprawy wybranych parametrów urządzenia półprzewodnikowego [18]. Uzyskuje się to poprzez współdziałanie elementów półprzewodnikowych wytworzonych z różnych związków, które połączone są ze sobą cienkimi drucikami. Przykładem takiego połączenia jest umieszczenie we wnętrzu jednej obudowy tranzystora MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) wykonanego z krzemu oraz współdziałającego z nim tranzystora JFET (Junction Field-Effect Transistor), który wykonany jest z azotku galu. Podobnie, jak w przypadku standardowych rozwiązań, informacja o wymiarach wewnętrznych współcześnie wykorzystywanych kaskad nie została odnaleziona w literaturze [19, 20]. W związku z tym również w tym przypadku koniecznym było wykonanie prac badawczych z tego zakresu, których rezultaty przedstawiono w rozdziałach 3 i 4.

## 2.2 Elektryczne metody pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego

Wartość temperatury elementu półprzewodnikowego można wyznaczyć metodą elektryczną. Polega ona na pomiarze wartości parametru TSP (Thermal Sensitive Parameter), zależnego od temperatury elementu półprzewodnikowego. Ta metoda została opisana w publikacjach JEDEC [21] (Joint Electron Device Engineering Council), organu normalizacyjnego i niezależnej organizacji handlowej zajmującej się inżynierią elementów półprzewodnikowych. Polega ona na wyznaczeniu funkcji, która wiąże wartość temperatury  $T_j$  elementu półprzewodnikowego z wartością TSP. Zależność ta jest charakterystyczna dla danego urządzenia półprzewodnikowego i opisuje ją współczynnik  $k_i$  (1) [22]

$$k_i = \frac{TSP}{T_j} \quad (1)$$

Współczynnik  $k_i$  można wyznaczyć po przeprowadzeniu procesu skalowania, w ramach którego urządzenie półprzewodnikowe umieszczane jest w komorze z regulowaną temperaturą wnętrza (temperaturą otoczenia skalowanego urządzenia półprzewodnikowego)  $T_a$ . Zakładając, że po odpowiednio długim czasie zachodzi zrównanie temperatur  $T_j = T_a$  proces skalowania polega na określeniu zależności pomiędzy TSP i  $T_j = T_a$  dla zadanych wartości  $T_a$ . Schemat blokowy wyznaczania zależności  $TSP = f(T_j)$  pokazano na rysunku 3.



Rysunek 3: Algorytm wyznaczania zależności  $TSP = f(T_j)$ .

Do pomiaru wartości TSP (np. natężenia prądu) stosuje się przyrząd pomiarowy wyposażony w przetwornik analogowo – cyfrowy A/C, w związku z czym dokładność, z jaką została wyznaczona zależność  $TSP = f(T_j)$  zależy między innymi od rozdzielczości zastosowanego przetwornika A/C.

Poza wymienionym przetwornikiem, źródłem błędu wyznaczonej wartości współczynnika  $k_i$  może być występujące podczas pomiaru zjawisko samonagrzewania. To



zjawisko wynika z przepływu prądu przez badane urządzenie półprzewodnikowe (DUT) w trakcie procesu skalowania i dlatego podczas prac badawczych należało je zminimalizować. W literaturze opisano dwie metody, które umożliwiają zminimalizowanie wpływu samonagrzewania na wyznaczoną wartość współczynnika  $k_i$ , są nimi metody:

- wykorzystujące tryb impulsowy,
- wykorzystujące tryb ciągły.

W metodach impulsowych (nazywanych w literaturze anglojęzycznej pulsed mode lub switching methods) prąd przewodzenia  $I_F = I_M$  przepływa przez urządzenie półprzewodnikowe tylko w trakcie wykonywania pomiaru. Metoda ta bazuje więc na założeniu, zgodnie z którym czas trwania pomiaru  $t_M$  jest tak krótki, że wartość temperatury  $T_j$  w trakcie pomiaru wartości TSP ulega niezauważalnej zmianie. Wadą tej metody są zakłócenia, które powstają w układzie pomiarowym w trakcie wykonywanych przełączeń.

W metodzie wykorzystującej tryb ciągły (nazywanej w literaturze anglojęzycznej continuous mode lub non-switching mode) nie występują zakłócenia komutacyjne. W metodzie tej prąd  $I_F = I_M$  jest ciągły i o takiej wartości, że skutki samonagrzewania są pomijalne. Jest to spełnione, gdy wartość prądu  $I_F$  jest na tyle mała, że moc  $P_j$  wydzielana w elemencie półprzewodnikowym podczas pomiaru jest mniejsza niż 1% maksymalnej (katalogowej) wartości mocy  $P_{jmax.}$ , możliwej do wydzielenia w elemencie półprzewodnikowym bez jego uszkodzenia. Jednak, gdy wartość prądu jest zbyt mała, to zależność pomiędzy TSP i  $T_j$  staje się nieliniowa.

Wadą zaprezentowanych metod elektrycznych jest brak możliwości uzyskania informacji o rozkładzie temperatury na powierzchni elementu półprzewodnikowego oraz na powierzchni jego obudowy. Nie jest możliwe uzyskanie informacji o największej oraz najmniejszej wartości temperatury na tych powierzchniach. Możliwe jest tylko wyznaczenie średniej temperatury elementu półprzewodnikowego oraz (gdy częstotliwość próbkowania jest wystarczająca) wartości chwilowe. Niemożliwe jest powiązanie temperatury zarejestrowanej na powierzchni obudowy elementu półprzewodnikowego z mocą wydzieloną w tym elemencie. Wykorzystanie metod elektrycznych wymaga znajomości relacji pomiędzy  $T_j$  i TSP dla całego zakresu zmian temperatury  $T_j$ . Pozyskanie tej relacji jest zazwyczaj kłopotliwe, ponieważ wyznaczenie zależności  $TSP = f(T_j)$  wymaga przeprowadzenia specjalistycznych prac badawczych [23]. W metodach elektrycznych do pomiaru wartości temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$  wykorzystuje się są następujące wielkości TSP:

- napięcie przewodzenia  $U_F$
- napięcie progowe  $U_{th}$ ,
- rezystancja kanału dren-źródło tranzystora  $R_{DS}$ ,
- wzmocnienie prądowe tranzystora  $\beta$ .

### 2.2.1 Napięcie przewodzenia diody jako TSP

Jako TSP najczęściej wykorzystywana jest wartość napięcia przewodzenia  $U_F$ , zależna od prądu  $I_F$  przepływającego przez to złącze oraz jego temperatury  $T_j$ . Związek ten opisują (2) i (3) [24]:

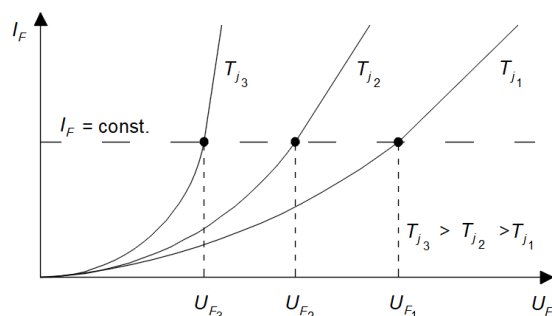
$$I_F = I_S \left[ \exp \frac{qU_F}{\sigma T_j} \right] - 1 \quad (2)$$

gdzie:

$$I_S = I_0 T_j^{\gamma_s} \exp \left( \frac{-E_g}{\sigma T_j} \right) - 1 \quad (3)$$

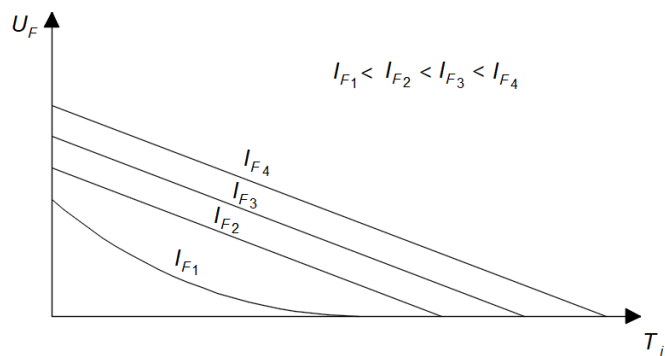
$\gamma_s$  jest stałą równą 3.

Na rysunku 4 graficznie zobrazowano (3) dla trzech wartości  $T_j$  [25].



**Rysunek 4:** Zależność wartości prądu przewodzenia  $I_F$  od napięcia przewodzenia  $U_F$  dla trzech wartości temperatury  $T_j$ .

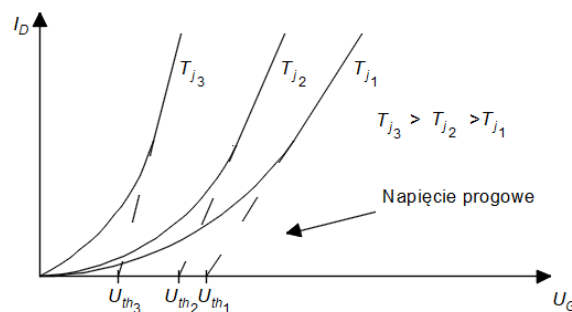
Do pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego stosowana jest zależność  $U_F = f(T_j, I_F = \text{const})$ . Ta zależność jest wystarczająco liniowa tylko dla odpowiednich wartości prądu  $I_F$ . Gdy wartość tego prądu jest zbyt mała, zależność ta staje się nieliniowa, co prezentuje wykres zależności  $U_F = f(T_j, I_F = \text{const})$  na rysunku 5 [26].



**Rysunek 5:** Zależność  $U_F = f(T_j, I_F = \text{const})$  dla czterech wartości prądu  $I_F$ .

## 2.2.2 Napięcie progowe tranzystora polowego jako TSP

Drugim parametrem wykorzystywanym jako TSP jest napięcie progowe  $U_{th}$  tranzystora polowego (field effect transistor). Wartość tego napięcia jest zależna od temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$ . Gdy temperatura ta wzrasta, zmienia się kształt zależności pomiędzy prądem drenu  $I_D$  a napięciem bramki  $U_G$ . Wartość  $U_{th}$  można wyznaczyć prowadząc styczną do charakterystyki  $I_D = f(U_G)$  w jej liniowo narastającej części. Miejsce przecięcia stycznej z osią OX określa wartość  $U_{th}$ . Sposób wyznaczania wartości  $U_{th}$  na przykładowej charakterystyce  $I_D = f(U_G)$  dla trzech wartości temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$  pokazano na rysunku 6 [27].



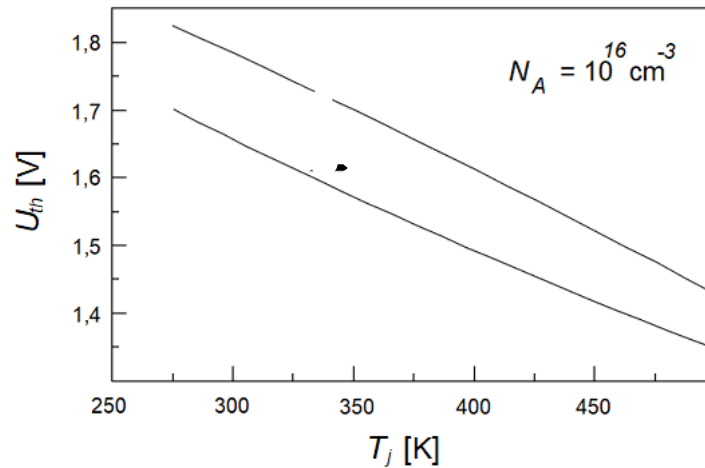
**Rysunek 6:** Zależność  $I_D = f(U_G)$  z naniesionymi stycznymi oraz wartościami  $U_{th}$  dla trzech wartości  $T_j$ .

Zmianę wartości napięcia progowego można określić za pomocą (4) oraz (5).

$$\frac{dU_{th}}{dT} = \frac{d\psi_B}{dT} \cdot \left( 2 + \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} q N_A}{\psi_B}} \right) \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_B}{dT} \approx \frac{1}{T} \cdot \left[ \frac{E_g(0)}{2q} - |\psi_B| \right] \quad (5)$$

gdzie:  $\psi_B$  to odległość poziomu Fermiego od środkowej przerwy energetycznej,  $\epsilon_{Si}$  to stała dielektryczna Si,  $N_A$  to gęstość domieszkowania,  $E_g$  to pasmo wzbronione w  $T = 0$ , a  $C_{ox}$  to wewnętrzna pojemność tlenkowa obszaru bramki. Zależność pomiędzy  $U_{th}$  i  $T_j$  przedstawiono na rysunku 7 [28, 29].



Rysunek 7: Zależność  $U_{th} = f(T_j)$  dla tranzystora MOSFET.

### 2.2.3 Wzmocnienie prądowe tranzystora bipolarnego jako TSP

Jako parametr TSP również wykorzystywane jest wzmocnienie prądowe tranzystorów bipolarnych  $h_{FE}$ , które określane jest za pomocą (6)

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad (6)$$

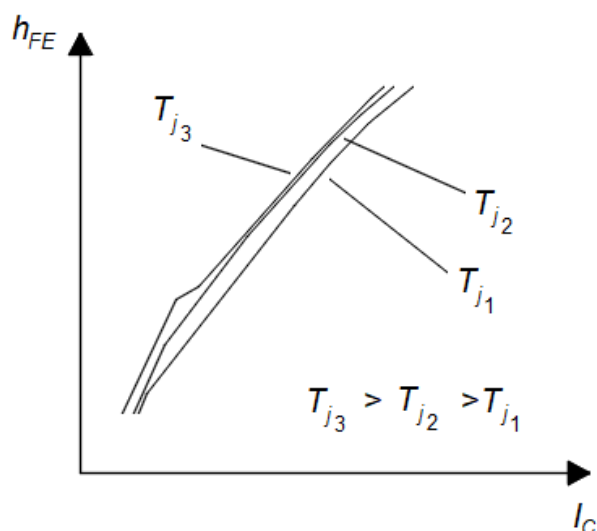
gdzie:  $I_C$  i  $I_B$  są odpowiednio prądem kolektora i prądem bazy.

Zależność pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego  $T_j$  i  $h_{FE}$  jest złożona, a na jej przebieg ma wpływ domieszkowanie elementu półprzewodnikowego tranzystora. Jest to podyktowane poprawą stabilności oraz wydajności urządzenia, w którym umieszczono tranzystor bipolarny. Chcąc wykorzystać wartość  $h_{FE}$  do oceny wartości  $T_j$  analizie można poddać zależność pomiędzy wzmocnieniem prądowym  $h_{FE}$  a prądem kolektora  $I_C$ , którą przedstawiono na rysunku 8 [29]. Zależność pomiędzy  $h_{FE}$  i temperaturą elementu półprzewodnikowego tranzystora wynika ze zwiększenia liczby nośników prądu w obszarze bazy. Prowadzi to do zmniejszenia jej oporu i zwiększenia przepływu prądu. To z kolei powoduje wzrost przepływu prądu kolektora i emitera. To zjawisko można opisać za pomocą (7) [30].

$$I_C = I_{se} \left( \frac{U_{be}}{T} \right) \cdot \left( 1 + \frac{U_{ce}}{U_a} \right) \quad (7)$$

gdzie:  $I_C$  to prąd kolektora tranzystora,  $I_{se}$  to prąd nasycenia,  $U_{be}$  to spadek napięcia na złączu baza-emiter,  $T$  to temperatura w skali Kelvina,  $U_{ce}$  to spadek napięcia na złączu kolektor-emiter,  $U_a$  to napięcie Early'ego.

Wpływ temperatury jest widoczny na charakterystyce obrazującej zależność wzmocnienia prądowego  $h_{FE}$  od prądu kolektora  $I_C$  tranzystora bipolarnego, którą pokazano na rysunku 8.



**Rysunek 8:** Zależność wartości wzmacnienia prądowego  $h_{FE}$  od prądu kolektora  $I_C$  tranzystora bipolarnego, dla trzech wartości temperatury  $T_j$ .

## 2.2.4 Inne wykorzystywane TSP

W literaturze zostały opisane inne parametry, które są wykorzystywane jako TSP. Znana jest metoda, która pozwala wyznaczyć temperaturę elementu półprzewodnikowego  $T_j$  tranzystora unipolarnego na podstawie mocy strat [31]. Temperaturę elementu półprzewodnikowego tego tranzystora można również wyznaczyć na podstawie zależności pomiędzy  $T_j$  i rezystancją kanału dren-źródło  $R_{DS}$  [32]. Na podstawie wartości TSP diody podłożowej (np.  $U_F$ ,  $U_{th}$ ), nazywanej również diodą zwrotną, umieszczonej we wnętrzu obudowy tranzystora unipolarnego [33] można wyznaczyć wartość  $T_j$  elementu półprzewodnikowego tego tranzystora [34]. W literaturze można odnaleźć opis metody, która polega na odnalezieniu zależności pomiędzy rezystancją pojedynczej ścieżki znajdującej się w elemencie półprzewodnikowym a wartością  $T_j$ . Większość z opisanych metod jest możliwa do zrealizowania w laboratorium. Za to kłopotliwe jest wykonanie pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$  poza laboratorium. Jest to zasadnicza wada uprzednio wymienionych metod pomiaru temperatury  $T_j$ .

## 2.3 Stykowe metody pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego

Stykowe metody pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego wymagają uzyskania połączenia termicznego pomiędzy elementem półprzewodnikowym a czujnikiem temperatury lub ciekłym kryształem LC (Liquid Crystals) [35]. Z tego powodu niezbędne jest otworzenie obudowy urządzenia półprzewodnikowego w taki sposób, aby nie uszkodzić elementu półprzewodnikowego oraz wewnętrznych połączeń (drucików) i przyłożenie czujnika temperatury (alternatywnie nałożenie LC) bezpośrednio na element półprzewodnikowy [36]. Otwieranie obudowy i montaż czujnika jest procesem trudnym, obciążonym wysokim ryzykiem uszkodzenia elementu półprzewodnikowego, a zamknięcie otworzonej obudowy w celu przywrócenia normalnych warunków pracy jest nadzwyczaj trudnym procesem. Z tego powodu po wykonaniu pomiarów element z otwartą obudową zazwyczaj nie nadaje się do ponownego użycia. Ponadto, element półprzewodnikowy w otwartej obudowie jest narażony

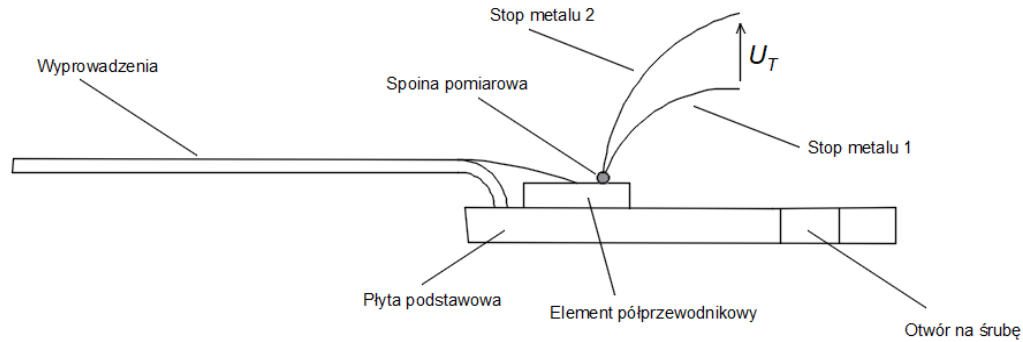
na oddziaływanie warunków środowiskowych, które mogą wpływać na niego destrukcyjnie. W związku z tym taki sposób pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego jest wykonywany tylko w warunkach laboratoryjnych [37].

W zastosowaniach praktycznych (poza laboratoryjnych) czujnik temperatury przykładany jest do obudowy urządzenia półprzewodnikowego, bez jej otwierania (alternatywnie na obudowę urządzenia półprzewodnikowego nakładane jest LC). Jednak wykonanie takiego pomiaru umożliwia uzyskanie informacji o temperaturze obudowy, a nie elementu półprzewodnikowego. W związku z tym, w celu wyznaczenia temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$  na podstawie znanej temperatury jego obudowy należy skorzystać z metod przedstawionych w podrozdziale 2.2 (wyznaczenie temperatury elementu półprzewodnikowego na podstawie znanej wartości TSP - na przykład napięcia przewodzenia  $U_F$ ). Dodatkowo w metodzie tej, dla obu przypadków połączenie termiczne pomiędzy zastosowanym czujnikiem temperatury a obudową urządzenia półprzewodnikowego lub elementem półprzewodnikowym może zaburzać rozkład temperatur na badanej powierzchni, zniekształcając wynik pomiaru temperatury. Na uwagę zasługuje również fakt, że w układach wysokonapięciowych wykonanie pomiaru stykowego jest obarczone ryzykiem porażenia oraz uszkodzenia aparatury diagnostycznej [38]. Niezależnie od rodzaju powierzchni, której temperatura jest mierzona, stykowe metody pomiaru mogą być realizowane z użyciem:

- termopary,
- ciekłych kryształów,
- fosforu termograficznego.

### **2.3.1 Termopara**

Pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego lub temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego można zrealizować poprzez zastosowanie czujnika temperatury, który w przypadku pomiaru bezpośredniego przykładany jest do elementu półprzewodnikowego. Czujnikiem tym najczęściej jest termopara, termistor lub termorezystor. Termopara składa się z dwóch różnych stopów metali, które jednostronnie połączone są ze sobą spoiną pomiarową (drugie strony stopów są wolne). Spoinę pomiarową należy przyłożyć do powierzchni badanego elementu półprzewodnikowego. Zmiana temperatury powoduje zmianę temperatury spoiny pomiarowej [39], co z kolei powoduje zmianę wartości napięcia  $U_T$  pomiędzy wolnymi końcami termopary. Związek między  $U_T$  i  $T_j$  jest zależny od rodzaju zastosowanych stopów metali [40]. Układ umożliwiający wykonanie pomiaru za pomocą termopary przedstawiono na rysunku 9.

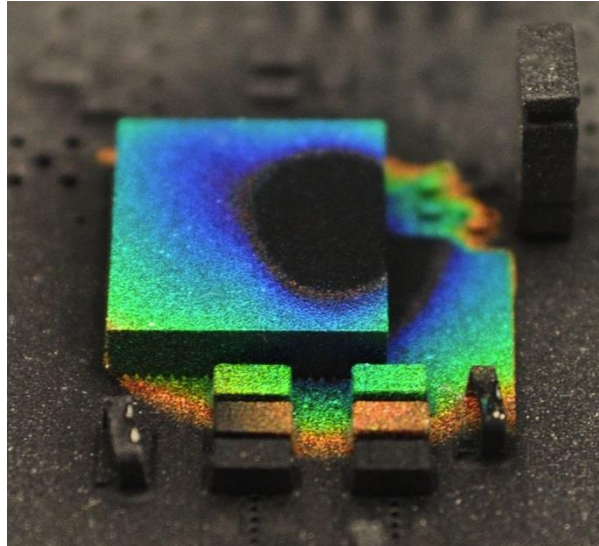


**Rysunek 9:** Umieszczenie czujnika podczas pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego termoparą.

### 2.3.2 Ciekłe kryształy

Do pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego można również wykorzystać ciekły kryształ LC (Liquid Cristal). Metoda ta wykorzystuje zmianę fazy LC, która zależy od temperatury powierzchni, na którą ją nałożono. Faza LC jest jednym ze stanów pośrednich pomiędzy ciekłym i krystalicznym stanem skupienia. Obrazowanie zmian temperatury elementu półprzewodnikowego jest możliwe po nadaniu różnych barw różnej fazie LC. W metodzie tej LC nakładane jest na powierzchnię obudowy urządzenia półprzewodnikowego lub elementu półprzewodnikowego. LC może być składnikiem farby, która jest nakładana za pomocą pędzla, a zmiana fazy LC jest oceniana poprzez obserwację, na podstawie wrażeń wzrokowych.

Do zobrazowania rozkładu temperatury na badanej powierzchni elementu półprzewodnikowego [41] można wykorzystać wszystkie typy LC. Należą do nich Cholesteric LC (CLC), Hysteresis CLC (HCLC), Smectic LC (SLC) i Nematic LC (NLC) [42]. Należy zauważyć, że użycie LC jest uzasadnione [43], gdy wartości temperatur przejść fazowych nie przekraczają dopuszczalnej maksymalnej  $T_j$  [44]. Możliwe jest również wykorzystanie LC do zobrazowania rozkładu temperatur na badanej powierzchni. W związku z tym możliwe jest zobrazowanie tak zwanych hot-spotów, czyli punktów na badanej powierzchni, których temperatura jest zdecydowanie wyższa od temperatury innych punktów na tej powierzchni. W przypadku wykorzystania LC [45] do mapowania rozkładu temperatur na elemencie półprzewodnikowym każdej z faz LC nadaje się oddzielną barwę [46]. W przypadku poszukiwania hot-spotów [47] LC są dobierane w taki sposób, by temperatura przejścia fazowego była możliwie najbliższa temperaturze hot-spotu. Przykładowy obraz, na którym można zaobserwować zależność fazy LC rozpylonego na obudowie elementu półprzewodnikowego od jej temperatury przedstawiono na rysunku 10.



**Rysunek 10:** Przykładowy rozkład temperatury na powierzchni obudowy elementu półprzewodnikowego, wykorzystujący zmianę fazy LC [48].

### **2.3.3 Fosfor termograficzny**

Trzecia metoda stykowego wyznaczenia temperatury elementu półprzewodnikowego lub obudowy urządzenia półprzewodnikowego wykorzystuje fosfor termograficzny. Zastosowanie tej metody jest podobne do wykorzystującej LC, a rozdzielczość przestrzenna obu metod jest zbliżona. Metoda wykorzystująca termograficzny fosfor polega na nałożeniu na badanej powierzchni proszku ceramicznego, który jest domieszkowany pierwiastkami ziem rzadkich. Po napromieniowaniu ultrafioletem powierzchni z naniesionym proszkiem zachodzi zjawisko fluorescencji. Intensywność tego zjawiska jest zależna od temperatury i jest ona oceniana na podstawie wrażeń wzrokowych. Intensywność obserwowanego zjawiska fluorescencji zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury powierzchni [49, 50]. W literaturze odnaleziono jedynie szczątkowe wzmianki na temat wykorzystania tej metody.

## **2.4. Bezstykowe metody pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego**

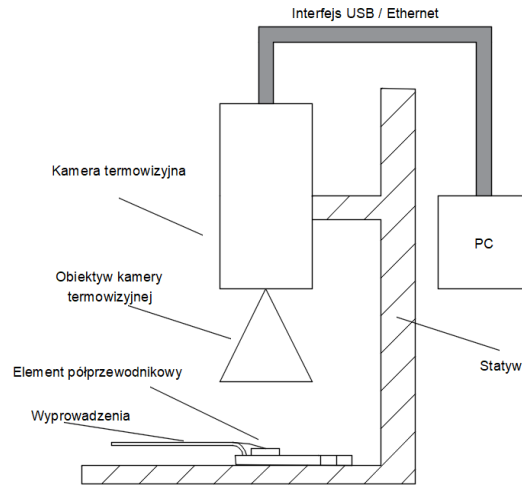
### **2.4.1 Pomiar termowizyjny**

#### **2.4.1.1 Termowizyjny pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego**

Alternatywą do uprzednio przedstawionych metod pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego jest pomiar bezstykowy. Metodą tą, przy wykorzystaniu pirometru lub kamery termowizyjnej można wyznaczyć temperaturę elementu półprzewodnikowego lub powierzchni jego obudowy. Termowizyjny pomiar temperatury jest procesem złożonym, a wynik pomiaru zależy od różnych czynników. Temperatura na powierzchni obudowy  $T_c$  zależy od temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$ , właściwości termicznych obudowy oraz warunków chłodzenia. Podczas pomiaru kamera termowizyjna jest utrzymywana w ręce lub umieszczona na statywie. Użycie statywu eliminuje drgania pochodzące z ręki, jednak nie zawsze jest to możliwe w realizacji (przykładowo, podczas obserwacji urządzeń umieszczonych w zwartej obudowie). Do pomiaru temperatury elementów elektronicznych, zwłaszcza małych wskazane jest umieszczenie kamery termowizyjnej na statywie. Umożliwia



to uzyskanie stabilnego termogramu i stałej odległości pomiędzy obserwowaną powierzchnią elementu półprzewodnikowego i obiektywem kamery termowizyjnej. Schemat blokowy stanowiska do pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego, składającego się z kamery termowizyjnej, statywu i komputera przedstawiono na rysunku 11.

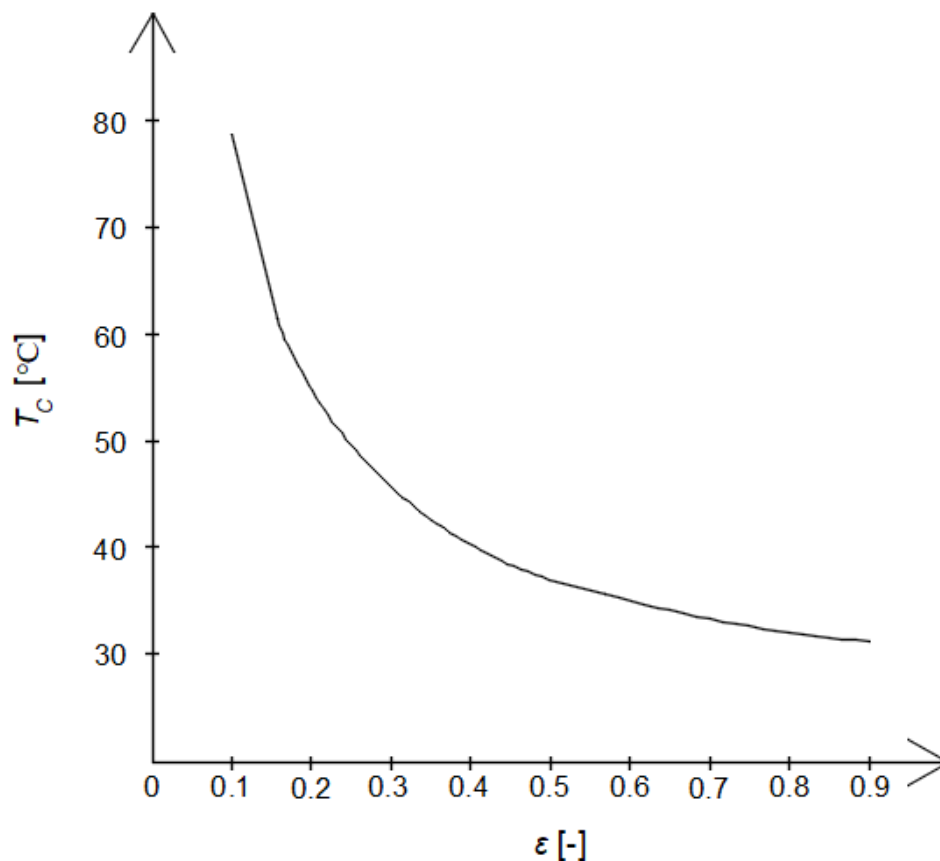


**Rysunek 11:** Schemat blokowy stanowiska do pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego.

#### 2.4.1.2 Wpływ wybranych czynników na termowizyjny pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego

W metodzie bezstykowej, wykorzystującej kamerę termowizyjną wartość temperatury odczytanej z termogramu jest zależna od warunków panujących w chwili pomiaru. Na wartość termowizyjnego pomiaru temperatury wpływa m.in.: emisyjność  $\varepsilon$  obserwowanej powierzchni [51], temperatura odbita  $T_r$  [52], odległość  $d$  pomiędzy soczewką i obserwowanym obiektem [53], temperatura otoczenia  $T_a$  [54], transmitancja atmosfery  $\tau_a$ , temperatura soczewki zewnętrznego systemu optycznego  $T_l$  [55], transmitancja soczewki zewnętrznego systemu optycznego  $\tau_l$  [56] oraz wilgotność  $\omega$  [57], kąt obserwacji  $\beta$  [58] i ostrość termogramu (reprezentowana temperaturą  $T_{us}$ ) [59].

Wpływ współczynnika emisyjności można zaobserwować w trakcie zmiany tej wartości w oprogramowaniu kamery termowizyjnej. Gdy wartość  $\varepsilon$  obserwowanej powierzchni jest duża, to dobór niepoprawnej wartości  $\varepsilon$  powoduje, że różnica pomiędzy rzeczywistą wartością temperatury i wynikiem pomiaru jest mała. Natomiast, gdy wartość  $\varepsilon$  obserwowanej powierzchni jest mała, to błędna nastawa  $\varepsilon$  powoduje, że ta różnica jest duża. Zależność rejestrowanej termowizyjnie temperatury obudowy  $T_C$  [°C] od współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  przedstawiono na rysunku 12 [60].



**Rysunek 12:** Zależność  $T_c = f(\varepsilon)$  [60].

Wpływ temperatury odbitej  $T_r$  (nazywanej również w literaturze promieniowaniem odbitym) ma charakter losowy. Jest zależny od temperatury i położenia obiektów, które znajdują się w pobliżu. Prawidłowe skompensowanie temperatury odbitej wymaga wykonania pomiaru. W tym celu należy wyłączyć kompensacje wpływu pozostałych czynników. W miejscu obserwowanej powierzchni należy umieścić (na czas pomiaru) odbijającą powierzchnię. Zmierzona wartość temperatury jest temperatura odbita.

Transmitancja atmosfery  $\tau_a$  jest kolejnym czynnikiem wpływającym na termowizyjny pomiar temperatury. Na wartość tą wpływa odległość  $d$  pomiędzy obiektywem kamery termowizyjnej a obudową elementu elektronicznego oraz wilgotność  $\omega$  zgodnie z (8) [61].

$$\tau_a(d, \omega) = K_a \cdot \exp[-\sqrt{d} \cdot (\alpha_1 + \beta_1 \sqrt{\omega})] + (1 - K_a) \cdot \exp[-\sqrt{d} \cdot (\alpha_2 + \beta_2 \sqrt{\omega})] \quad (8)$$

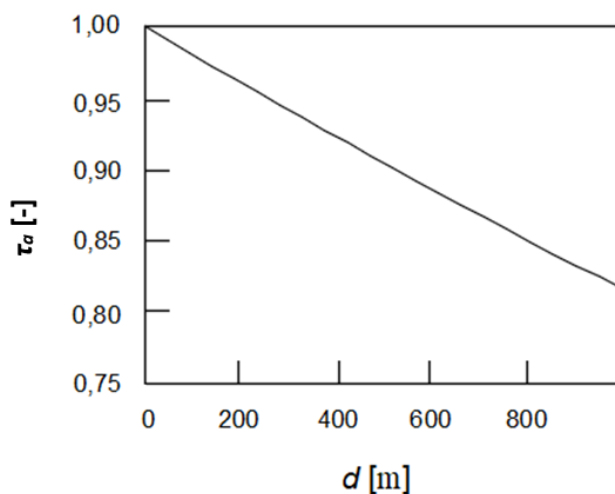
gdzie:  $K_a = 1,9$  – współczynnik tłumienia atmosfery,  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  – współczynniki tłumienia (nie uwzględniające pary wodnej),  $\beta_1$  i  $\beta_2$  – współczynniki tłumienia (uwzględniające obecność pary wodnej).

Z kolei wartość  $\tau_a$  wpływa na wartość termowizyjnego pomiaru temperatury  $T_k$  obudowy elementu półprzewodnikowego zgodnie z (9).

$$T_k = \sqrt[4]{\frac{W_{tot} - (1 - \varepsilon) \cdot \tau_a \cdot \sigma \cdot T_r^4 \cdot \tau_l - (1 - \tau_a) \cdot \sigma \cdot T_a^4 \cdot \tau_l - (1 - \tau_l) \cdot \sigma \cdot T_l^4}{\varepsilon \cdot \sigma \cdot \tau_a \cdot \tau_l}} \quad (9)$$

gdzie:  $W_{tot}$  – całkowita energia, która dociera do obiektywu kamery termowizyjnej.

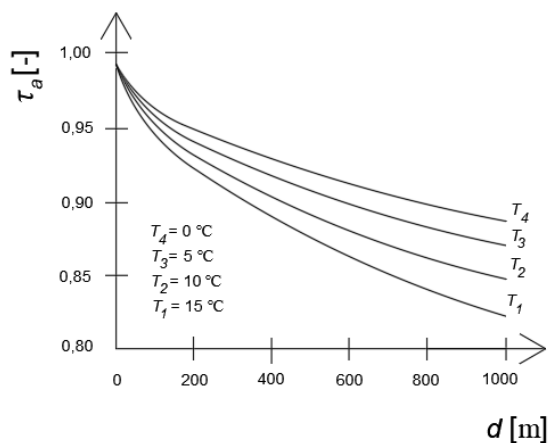
Zależność  $\tau_a = f(d)$  została opisana w literaturze [62, 63, 64] oraz przedstawiona na rysunku 13.



**Rysunek 13:** Zależność  $\tau_a = f(d)$  [62].

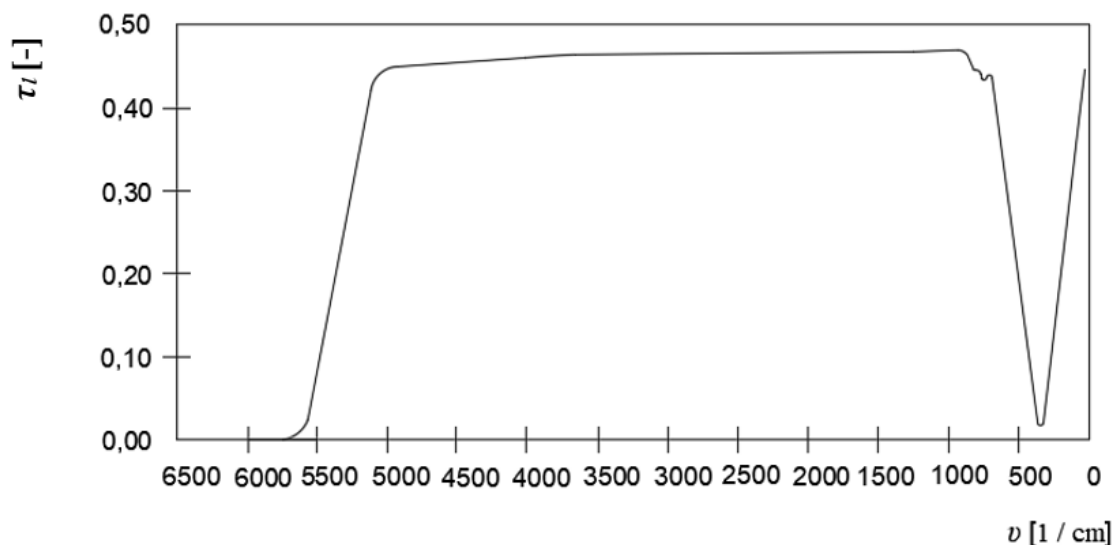
Analizując zależność przedstawioną na rysunku 13 można zauważyć, że dla odległości  $d$ , które dzielą obiektyw kamery termowizyjnej od obudowy elementu półprzewodnikowego (33 mm) wpływ wartości  $d$  na wartość  $\tau_a$  (oraz na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury) jest niewielki [65, 66].

Wartość  $\tau_a$  wpływa na wartość  $T_a$ , a ta z kolei wpływa na wartość  $T_k$  (9). Zależność pomiędzy tymi wartościami w zależności od odległości  $d$  pokazano na rysunku 14.



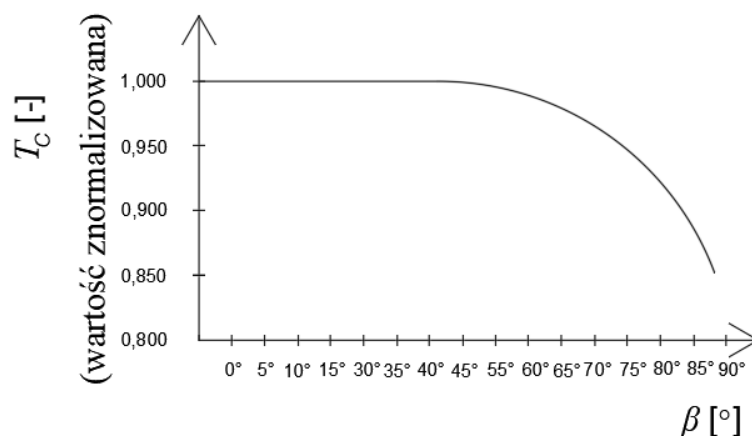
**Rysunek 14:** Zależność transmitancji atmosfery  $\tau_a$  od odległości  $d$  obiektyw – obserwowana powierzchnia dla różnych wartości temperatury otoczenia  $T_a$  (na przedstawionym rysunku  $T_1 - T_4$ ) [62].

Analizując wzór 9 można zauważyć, że na wartość  $T_k$  wpływa również transmitancja  $\tau_l$  obiektywu kamery termowizyjnej. Wartość  $\tau_l$  jest zależna od długości fali  $\lambda$  transmitowanego promieniowania podczerwonego i powiązanej z nią liczbą falową  $\nu$ . Związek pomiędzy  $\tau_l$  i  $\nu$  pokazano na rysunku 15. W literaturze można również odnaleźć informacje o zależności  $\tau_l$  od temperaturą  $T_l$  soczewki obiektywu kamery termowizyjnej [67].



**Rysunek 15:** Zależność transmitancji  $\tau_l$  soczewki obiektywu kamery termowizyjnej od liczby falowej  $\nu$  [67].

Kolejnym czynnikiem, który wpływa na wskazanie kamery termowizyjnej jest kąt obserwacji  $\beta$ . Wpływ tego czynnika został opisany w literaturze [68]. Zależność znormalizowanej wartości temperatury obudowy  $T_C$  (odniesionej do wartości poprawnej) od kąta  $\beta$  przedstawiono na rysunku 16.

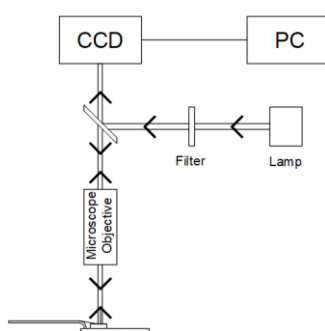


**Rysunek 16:** Zależność znormalizowanej wartości temperatury obudowy  $T_C$  (odniesionej do wartości poprawnej) od kąta  $\beta$  [69].

Ostatnim czynnikiem, który wpływa na wskazanie kamery termowizyjnej jest nieostrość rejestrowanego termogramu. Nieostrość rejestrowanego termogramu również została opisana w literaturze [69]. Jest zagadnieniem złożonym i z tego powodu temu zagadnieniu poświęcono oddzienny podrozdział 2.6.2.

## 2.4.2 Termorefleksja

Kolejną metodą bezstykową wyznaczania temperatury elementu półprzewodnikowego jest metoda wykorzystująca zmianę wartości współczynnika załamania promieniowania optycznego wywołaną zmianą temperatury [70]. Ta metoda polega na pomiarze względnej zmiany współczynnika odbicia materiału w funkcji temperatury tego materiału. Zmiana współczynnika odbicia zależy od długości fali padającego promieniowania, właściwości materiału odbijającego promieniowanie i stanu jego powierzchni oraz od temperatury otoczenia. Dla temperatur zgodnych z zakresem temperatur  $T_j$  wartość współczynnika odbicia (współczynnika termoodbicia) można uznać za stałą [71] i znajduje się ona w przedziale od  $10^{-5}$  do  $10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Schemat blokowy układu do pomiaru temperatury powierzchni uwzględniający zależność współczynnika odbicia od temperatury przedstawiono na rysunku 17.



**Rysunek 17:** Schemat blokowy układu do pomiaru temperatury powierzchni uwzględniający zależność współczynnika odbicia od temperatury [70].

Zależność zmiany współczynnika odbicia od temperatury powierzchni można opisać za pomocą (10).

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = C_{TR}\Delta T \quad (10)$$

gdzie:  $\Delta\rho$  - względna zmiana refleksyjności (change in reflectivity) obserwowanej powierzchni,  $\rho_0$  - refleksyjność obserwowanej powierzchni (reflectivity),  $C_{TR}$  - współczynnik termoodbicia (thermoreflectance coefficient).

## 2.4.3 Luminescencja

Bezstykowe mapowanie temperatury na powierzchni elementu półprzewodnikowego jest również możliwe przy wykorzystaniu zjawiska luminescencji. Zjawisko to zachodzi, gdy na skutek działania czynników zewnętrznych (np. występowanie pola elektrycznego lub pobudzenie promieniowaniem elektromagnetycznym o wybranych długościach fal) emitowane jest promieniowanie widzialne VIS. Promieniowanie to jest wynikiem rekombinacji dziur i elektronów z wystąpieniem energii szczytowej w materiałach z bezpośrednią przerwą energetyczną przy energii pasma wzbronionego. Dla każdego materiału można określić zmiany przerwy energetycznej w zależności od temperatury, które są charakterystyczne dla określonego materiału. Źródłem elektronów i dziur może być wstrzyknięcie przez złącze p-n (Elektroluminescencja). Innym źródłem jest zewnętrzne wzbudzenie optyczne

(Fotoluminescencja). W literaturze odnaleziono opis elektroluminescencji oraz fotoluminescencji do pomiaru temperatury złożonych urządzeń półprzewodnikowych, zgodnie z którym rozdzielczość tej metody wynosi od 0,5  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$  i 1  $^{\circ}\text{C}$  [72]. Jednak opis ten zawiera jedynie szczerpkowe informacje na temat wykorzystania tej metody.

## **2.5 Wyznaczanie rozkładu temperatury w obudowie elementów półprzewodnikowych**

### **2.5.1. Metoda uwzględniająca rezystancję termiczną**

Opisane w poprzednich rozdziałach metody umożliwiają przeprowadzenie bezpośredniego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego lub pośredniego na podstawie pomiaru temperatury jego obudowy. Jak już napisano pomiar pośredni jest łatwiejszy w realizacji i bezpieczniejszy, wymaga jednak określenia zależności wiążącej zmierzoną temperaturę obudowy  $T_C$  z temperaturą elementu półprzewodnikowego  $T_j$ . Najprostszą z metod, które umożliwiają wyznaczenie wartości  $T_j$  na podstawie zmierzonej wartości  $T_C$ , jest metoda oparta na wykorzystaniu analogii obwodu cieplnego do obwodu elektrycznego. W odniesieniu tym potencjał elektryczny  $U$  odpowiada temperaturze  $T$ , prąd elektryczny odpowiada strumieniowi cieplnemu, natomiast rezystancja elektryczna  $R$  odpowiada rezystancji termicznej  $\theta$ . Związek pomiędzy wartościami  $T_j$ ,  $T_C$  oraz  $\theta$  opisuje (11) [73].

$$T_j = \theta_{jc} P_j + T_C \quad (11)$$

gdzie:  $\theta_{jc}$  – rezystancja termiczna element półprzewodnikowy – obudowa,  $P_j = U \cdot I$  – moc rozproszona w elemencie półprzewodnikowym.

Informację o wartości rezystancji termicznej  $\theta_{jc}$  można odnaleźć w nocie katalogowej określonego urządzenia półprzewodnikowego. Znając wartość prądu przepływającego przez element półprzewodnikowy i wartość spadku napięcia na tym elemencie można wyznaczyć moc  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym. W konsekwencji w równaniu 11 znajdują się jedna nieznaną wartość. Zastosowanie tej metody umożliwia wyznaczenie rozkładu temperatury elementu półprzewodnikowego na podstawie temperatury obudowy tylko wzdłuż jednej linii (model 1-D).

### **2.5.2 Metoda elementów skończonych**

Alternatywą do opisanej w poprzednim podrozdziale metody są metody numeryczne, z których podczas prac badawczych wybrano Metodę Elementów Skończonych MES. W metodzie tej możliwy jest do uzyskania rozkład temperatury w bryle (np. w obudowie elementu półprzewodnikowego – model 3-D). Bryła, w której poszukiwany jest rozkład temperatury, dzielona jest na czworościenne elementy, w którym pole temperatury interpolowane jest na podstawie temperatury w węzłach (wierzchołkach) tego elementu oraz liniowych funkcji kształtu (12) [74]:

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^4 H_i \cdot T_i(t) \quad (12)$$

gdzie:  $T_i(t)$  – temperatura w węźle  $i$ ,  $H_i$  – liniowa funkcja kształtu.  
W układzie kartezjańskim funkcję liniową z (12) dla węzła  $i$  (element czworosieczny) można wyrazić za pomocą (13) [75]:

$$N_i(x, y, z) = a_i + b_i x + c_i y + d_i z \quad (13)$$

gdzie:  $i = 1, \dots, 4$ ,  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  i  $d_i$  – współczynniki.

W rezultacie można otrzymać układ równań, za pomocą którego możliwe jest wyznaczenie nieznanymi wartościami współczynników. Opisaną procedurę należy powtórzyć dla wszystkich węzłów siatki.

Omówione modele pozwalają wyznaczyć rozkład temperatury pomiędzy wskazanymi punktami. W konsekwencji możliwe jest wyznaczenie różnicy temperatury pomiędzy elementem półprzewodnikowym i jego obudową, pomiędzy obudową elementu półprzewodnikowego i radiatora oraz pomiędzy elementem półprzewodnikowym i radiatora. Wyznaczenie tych różnic umożliwia estymację temperatury elementu półprzewodnikowego na podstawie zmierzonej temperatury jego obudowy. Niedokładność tej estymacji zależy od niedokładności wyznaczenia poszukiwanego rozkładu temperatury. Metodę Elementów skończonych można wykorzystać do weryfikacji poprawności wykonanych pomiarów temperatury [76].

Prawidłowe odwzorowanie rozkładu temperatury na powierzchni elementu półprzewodnikowego prezentowaną metodą wymaga znajomości ilości ciepła przekazywanego przez konwekcję oraz przez promieniowanie. Ilość ciepła oddanego przez promieniowanie w jednostce czasu i z jednostki powierzchni określa współczynnik radiacji  $h_r$ , który można wyznaczyć za pomocą (14) [77]:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma_c \cdot (T_s + T_a) \cdot (T_s^2 + T_a^2) \quad (14)$$

gdzie:  $\sigma_c$  – stała Stefana-Boltzmana,  $T_s$  – temperatura powierzchni [K],  $T_a$  – temperatura otoczenia [K].

Ilość ciepła oddanego przez konwekcję w jednostce czasu i z jednostki powierzchni określa współczynnik konwekcji  $h_c$ . Przybliżoną wartość tego współczynnika można otrzymać stosując teorię podobieństwa do zjawisk fizycznych, wykorzystując kryteria Nusselta, Grashoffa i Prandtla. W przypadku wyznaczania wartości  $h_c$  dla płaskiej powierzchni stosuje się (15) [78]:

$$\alpha_k = \varepsilon \cdot \sigma_c \cdot (T_s + T_a) \cdot (T_s^2 + T_a^2) \quad (15)$$

gdzie:  $h_c$  – współczynnik konwekcji płaskich powierzchni,  $Nu$  – liczba Nusselta [-], a  $L$  – charakterystyczna długość w metrach (dla ściany pionowej jest to jej wysokość).

Liczbę Nusselta określa (16) [79]:

$$Nu = a(Gr \cdot Pr)^b \quad (16)$$

gdzie:  $a$  i  $b$  – bezwymiarowe współczynniki, których wartość jest zależna od kształtu i położenia analizowanej powierzchni oraz iloczynu  $Pr \cdot Gr$ . ( $Pr$  – liczba Prandtla,  $Gr$  – liczba Grashofa).

Liczbę Prandtla można otrzymać za pomocą (17) [80]:

$$Pr = \frac{c \cdot \eta}{k} \quad (17)$$

gdzie:  $c$  – ciepło właściwe powietrza,  $\eta$  – lepkość dynamiczna powietrza.

Natomiast liczbę Grashofa otrzymuje się z (18) [80]:

$$Gr = \frac{\alpha \cdot g \cdot (T_s - T_a) \cdot \rho_p^2 \cdot L^3}{\eta^2} \quad (18)$$

gdzie:  $\alpha$  – współczynnik rozszerzenia równy  $0,0034 \text{ [K}^{-1}\text{]}$ ,  $g$  – przyspieszenie grawitacyjne równe  $9,8 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-2}\text{]}$ ,  $\rho$  – gęstość powietrza równa  $1,21 \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}$  przy  $273,15 \text{ [K]}$ .

## 2.6 Niepewność termowizyjnego pomiaru temperatury

### 2.6.1 Podstawy fizyczne termowizyjnego pomiaru temperatury

Termowizyjny pomiar temperatury polega na detekcji promieniowania podczerwonego IR emitowanego z obserwowanej powierzchni. Na skutek zjawisk fizycznych zachodzących w detektorze pod wpływem padającego na jego powierzchnię promieniowania IR oraz na podstawie wartości jego natężenia można wyznaczyć temperaturę obserwowanego obiektu.

Wzrost wartości temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$  powoduje, że wzrasta również wartość temperatury mierzonej powierzchni  $T_c$ . W efekcie wzrasta wartość emitancji widmowej  $W$  promieniowania IR emitowanego z tej powierzchni. Wzrost wartości  $T_j$  powoduje również przesunięcie maksimum fali emitowanego promieniowania  $\lambda_{max}$  w kierunku fal krótszych zgodnie z prawem Wiena (19) [81]:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T_j} \quad (19)$$

Bezpośredni związek pomiędzy wartością  $W$  oraz wartością  $T_j$  opisuje prawo Stefana-Boltzmann, zgodnie z którym wartość  $W$  jest zależna od emisyjności  $\varepsilon$  obserwowanej powierzchni (20) [82].

$$W = \varepsilon \sigma T_j^4 \quad (20)$$

Ostatecznie można stwierdzić, że emisyjność elementu półprzewodnikowego jest opisana za pomocą wartości współczynnika  $\varepsilon$ . W ogólnym ujęciu, współczynnik ten jest stosunkiem promieniowania wyemitowanego przez ciało doskonale czarne do promieniowania wyemitowanego przez obserwowaną powierzchnię w tych samych warunkach (w tej samej



temperaturze i przy tym samym kącie). Dodatkowo, wartość współczynnika  $\varepsilon$  jest bardzo istotna w bezstykowym pomiarze temperatury elementu półprzewodnikowego, gdyż wpływa ona na dokładność tego pomiaru, a zależy od:

- materiału, z którego wykonano obserwowaną powierzchnię,
- stanu powierzchni elementu półprzewodnikowego (np. czysta, zabrudzona, porysowana),
- kąta obserwacji,
- temperatury obserwowanej powierzchni [83].

Spośród wymienionych urządzeń umożliwiających bezstykowy pomiar temperatury pirometr umożliwia wykonanie tego pomiaru tylko dla pojedynczego punktu. Niemożliwe jest uzyskanie rozkładu temperatury na całej badanej powierzchni elementu półprzewodnikowego. Z tego powodu do pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego stosuje się kamery termowizyjne, które są wyposażone w matryce detektorów podczerwieni. Użyte matryce mogą się różnić typem zastosowanych detektorów oraz rozdzielczością przestrzenną. Zastosowanie określonego detektora decyduje o konkretnym przeznaczeniu kamery. Spośród dostępnych można wyróżnić następujące typy detektorów promieniowania IR:

- mikrobolometr,
- detektor fotonowy,
- detektor działający w oparciu o supersieci SLS (Strained Layer Superlattice).

Mikrobolometr (jeden piksel z matrycy niechłodzonych czujników mikrobolometrycznych) jest czujnikiem promieniowania IR, którego rezystancja wzrasta wraz ze wzrostem natężenia promieniowania IR padającego na powierzchnię detektora. W dużym przybliżeniu jest on kwadratem o boku  $17 \mu\text{m}$  [84]. Czujnik mikrobolometryczny nie wymaga chłodzenia, co zwiększa obszar zastosowania kamery termowizyjnej z tym czujnikiem [84], która zazwyczaj pracuje w paśmie LWIR (Long Wave Infrared). Stała czasowa mikrobolometru wynosi ok. 20 ms [85], w związku z czym uzyskanie wysokiej częstotliwości pomiaru (powyżej 50 Hz) za pomocą kamerą z matrycą mikrobolometryczną jest niemożliwe. W praktyce dostępne są kamery z matrycami czujników mikrobolometrycznych, które umożliwiają wykonanie pomiarów z częstotliwością 80 Hz. Zwiększenie wartości tego parametru jest możliwe poprzez wykonywanie pomiaru w momencie, gdy detektor jest nieustabilizowany. Jednak szczegóły na temat sposobu uzyskania takiej częstotliwości pomiaru za pomocą czujnika mikrobolometrycznego jest tajemnicą handlową i nie są opisywane przez producentów [86].

Drugie z wymienionych detektory fotonowe umożliwiają uzyskanie wyższej częstotliwości pomiaru, większej od 50 Hz [87]. Najczęściej wykonane są one na bazie MCT (Mercurium Cadmium Telluroide) [88], lub bardziej trwałego InSb (Indium antimonide) [89] i działają w oparciu o zachodzące w nich zjawiska kwantowe. Intensywność tych zjawisk w temperaturze pokojowej powoduje, że uzyskanie termogramu jest niemożliwe i z tego powodu zachodzi konieczność chłodzenia detektorów do temperatury rzędu kilkudziesięciu Kelvinów [90]. W praktyce stosowane są detektory hot pracujące w temperaturze wyższej 100 K [91]. Do chłodzenia detektorów fotonowych można użyć ogniwi Peltiera lub chłodziarki Stirlinga, przy czym należy pamiętać, że użycie chłodziarki powoduje drgania kamery termowizyjnej.

Detektor fotonowy (jeden pixel z matrycy chłodzonych detektorów fotonowych) jest mniejszy od detektora mikrobolometrycznego, w przybliżeniu jest on kwadratem o boku 14-16  $\mu\text{m}$ . Z tego powodu matryce detektorów fotonowych cechują się większą rozdzielczością przestrzenną w porównaniu do detektorów mikrobolometrycznych. Najczęściej pracują one w paśmie MWIR (Medium Wave Infrared) [92].

Trzecie z wymienionych detektory SLS (Strained Layer Superlattice) działają w oparciu o supersieci. Są detektorami pracującymi w paśmie LWIR oraz MWIR [93]. Ich największą zaletą jest czas integracji wynoszący (w zależności od wybranego zakresu temperatur) od 0,028 ms do 0,16 ms. W konsekwencji możliwe jest uzyskanie wysokiej częstotliwości pomiaru, rzędu tysięcy fps (frames per second). Matryce zbudowane w oparciu o te detektory cechują się wysoką rozdzielczością przestrzenną rzędu megapixeli. Najwięcej zalet detektorów SLS można dostrzec, gdy ich działanie jest ograniczone do pasma LWIR (poprzez zastosowane filtry). W porównaniu z innymi detektorami pracującymi w tym paśmie możliwa jest poprawa częstotliwości pomiaru, jednorodności i stabilności [94].

Niezależnie od zastosowanego detektora, rejestrowane za pomocą kamery termowizyjnej termogramy można przesyłać za pomocą interfejsu USB (lub Ethernet) do komputera, w którym zainstalowano odpowiednie oprogramowanie. Umożliwia to dalsze przetwarzanie i magazynowanie termogramów.

## **2.6.2 Wyznaczanie niepewności pomiaru**

Z każdym pomiarem, w tym również termowizyjnym związana jest niepewność pomiaru. Wyróżnia się niepewność typu A i typu B. Niepewność typu A jest oceną niepewności pomiaru, która opiera się na analizie statystycznej serii wyników pomiarów. Tą niepewność należy uwzględniać, gdy seria pomiarów została wykonana w tych samych warunkach (czyli czynniki wpływające na pomiar pozostawały bez zmian).

Gdy liczba pomiarów jest ograniczona do pojedynczego, lub gdy czynniki które mogą wpływać na wskazanie przyrządu pomiarowego zmieniają się w trakcie pomiaru należy zastosować metodę oceny niepewności typu B. Jest to metoda, w której ocena niepewności standardowej nie opiera się na analizie statystycznej serii obserwacji, lecz wykorzystywana jest analiza wpływu wybranych czynników na wskazanie przyrządu pomiarowego. Wpływ danego czynnika na wskazanie urządzenia pomiarowego można ocenić na podstawie danych z wcześniej przeprowadzonych pomiarów, posiadanego doświadczenia, danych ze świadectw wzorcowania oraz ze źródeł literaturowych.

Użycie w pracach badawczych metody szacowania niepewności typu B wymaga określenia zakresu czynników, które wpływają na wskazanie kamery termowizyjnej. Czynniki, które wpływają na wskazanie kamery termowizyjnej są nazywane wartościami wejściowymi  $X_i$ , a zakres ich wartości można wyznaczyć na podstawie przeprowadzonych prac doświadczalnych, obserwacji oraz odnalezionych w literaturze modeli, określających wpływ wartości wejściowych na wskazanie kamery termowizyjnej. Natomiast wpływ wybranych wielkości wejściowych w niepewności można wyznaczyć za pomocą prac symulacyjnych w środowisku Matlab.

W ocenie niepewności pomiaru istotny jest rozkład prawdopodobieństwa, który można założyć na podstawie wyników przeprowadzonych prac doświadczalnych. W przypadku  $X_i$ , dla

których możliwe jest jedynie określenie wartości maksymalnej i minimalnej można przyjąć stały (prostokątny) rozkład prawdopodobieństwa. W konsekwencji możliwe jest wyznaczenie estymaty wielkości wejściowej  $x_i$ . Dla przebiegu prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa wartość estymaty wielkości wejściowej można wyznaczyć za pomocą (21)

$$x_i = \frac{1}{2}(h_+ + h_-) \quad (21)$$

gdzie:  $h_+$  – górna granica zakresu wielkości wejściowej,  $h_-$  – dolna granica zakresu wielkości wejściowej.

Możliwe jest również wyznaczenie wariancji wielkości wejściowej  $u^2(x_i)$ . W celu wyznaczenia tej wielkości należy skorzystać z (22).

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12}(h_+ + h_-)^2 \quad (22)$$

W przypadku, gdy różnica pomiędzy wartościami granicznymi wynosi 2 lub więcej, w celu wyznaczenia wartości  $u^2(x_i)$  należy skorzystać z (23).

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3}(h)^2 \quad (23)$$

Przyjęcie prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa wartości  $X_i$  jest uzasadnione tylko w przypadku, gdy znana jest jedynie górna i dolna granica przebiegu wartości. W przypadku, gdy znane są wartości  $X_i$  znajdujące się w środku przedziału należy przyjąć normalny lub trójkątny rozkład prawdopodobieństwa. W przypadku, gdy bardziej prawdopodobne są wartości  $X_i$  znajdujące się na końcu przedziału należy przyjąć u-kształtny rozkład prawdopodobieństwa.

W dalszych krokach udział w niepewności standardowej  $u_i(y)$  związanej z analizowaną wielkością wejściową  $X_i$  można wyznaczyć poprzez pomnożenie dodatniego pierwiastka wariancji  $u(x_i)$  przez współczynnik wrażliwości  $s_i$  (24).

$$u_i(y) = s_i u(x_i) \quad (24)$$

Współczynnik wrażliwości opisuje, w jaki sposób zmiana estymaty  $x_i$  wielkości wejściowej  $X_i$  wpływa na estymatę wielkości wyjściowej  $y$ . Jest pochodną cząstkową funkcji  $f$  pomiaru względem analizowanej wielkości wejściowej  $X_i$  (25)

$$s_i(y) = \frac{\partial f}{\partial X_i} \quad (25)$$

Wyznaczenie wartości niepewności standardowej  $u^2(y)$  jest możliwe po zsumowaniu kwadratów wartości składników niepewności standardowej związanych z estymatą  $y$  wielkości wyjściowej (26)

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (26)$$

Wartość współczynnika  $s_i$  można otrzymać za pomocą metod numerycznych. W tym celu należy obliczyć zmianę estymaty wielkości wyjściowej  $y$ , która jest spowodowana zmianą estymaty wielkości wejściowej  $X_i$  o  $+u(x_i)$  i  $-u(x_i)$ . Następnie otrzymaną wartość różnicy  $y$  należy podzielić przez  $2u(x_i)$ .

Rozszerzona niepewność pomiaru  $U$  jest iloczynem niepewności standardowej  $u(y)$  i współczynnika rozszerzenia  $r$ . Współczynnik  $r$  jest liczbą większą od jedności, przez którą mnoży się standardową niepewność pomiaru w celu uzyskania niepewności rozszerzonej  $U$ . Dobrana wartość współczynnika  $r$  jest zależna od rozkładu prawdopodobieństwa, który charakteryzuje wartości mierzonej wielkości oraz od wiarygodności niepewności standardowej związanej z estymatą wielkości wyjściowej  $u(y)$ . Gdy rozkład wielkości mierzonej można scharakteryzować rozkładem normalnym, należy stosować współczynnik rozszerzenia  $r = 2$ . Gdy kilka (powyżej 3) składowych niepewności, które otrzymano przy złożeniu określonych rozkładów prawdopodobieństwa ma porównywalny udział w wyznaczonej niepewności standardowej związanej z estymatą wielkości wyjściowej, to spełnione są warunki centralnego twierdzenia granicznego. W takim przypadku można przyjąć, że rozkład wielkości wyjściowej jest rozkładem normalnym [94].

### **2.6.3 Wpływ nieostrości termogramu na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury**

Jednym z często pomijanych czynników wpływających na termowizyjny wynik pomiaru, jest nieostrość rejestrowanego termogramu. Należy to uwzględnić w trakcie pomiarów termowizyjnych oraz przy wyznaczaniu niepewności pomiaru. Ze względu na charakter jej zmian w wyznaczaniu niepewności należy zastosować metodę typu B.

Nieostrość termogramu może być spowodowana niewłaściwym ustawieniem pierścienia obiektywu oraz dla złożonej sceny termograficznej, niewystarczającą głębią ostrości. Głębina ostrości określa zakres odległości pomiędzy obserwowanym obiektem i obiektywem kamery zapewniający uzyskanie ostrego obrazu. Nowoczesne obserwacyjne kamery termowizyjne są wyposażone w systemy automatycznego doboru ostrości. Należy jednak zauważyć, że automatyzacja nie eliminuje problemu związanego z ograniczoną głębią ostrości. Kamery wykorzystywane w termografii mikroskopowej nie posiadają systemów automatycznego doboru ostrości, a ze względu na właściwości układów optycznych cechują się niewielką głębią ostrości. Oznacza to, że zmiana odległości  $d$  nawet o jeden milimetr skutkuje nieostrym termogramem, a wynik pomiaru temperatury obarczony jest dodatkowym błędem.

Wynik pomiaru temperatury na termogramie odwzorowywany jest paletą barw lub stopniem szarości – poszczególne piksele termogramu otrzymują kolor powiązany z wartością wyniku pomiaru temperatury. Zazwyczaj stosowane jest 8-bitowe kodowanie koloru/szarości. Określanie temperatury na podstawie takiego kodowania obarczone jest dodatkowym błędem rozdzielczości. Uzyskany kolorowy lub monochromatyczny termogram podlega ocenie

miarami nieostrości wykorzystywanymi w fotografii. W literaturze proponowane są różne miary nieostrości:

- wariancja  $D^2$ ,
- energia gradientu EOG,
- EOL,
- SML,
- częstotliwość przestrzenna SF,
- Tenengrad.

Wariancja  $D^2$ : określają (27) i (28) [96]:

$$D^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x, y) - \mu)^2 \quad (27)$$

gdzie:

$$\mu = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x, y))^2 \quad (28)$$

gdzie: M i N wymiary macierzy zawierającej informacje z pikseli termogramu.

EOG (Energy of Gradient) używa pierwszych pochodnych obrazu w obu kierunkach – pionowym i poziomym. Wartość EOG można otrzymać za pomocą (29) [96]:

$$EOG = \sum_x^M \sum_y^N (f_x^2 + f_y^2)^2 \quad (29)$$

gdzie: M i N wymiary macierzy zawierającej informacje z pikseli termogramu.

EOL (Energy of Laplacian). Jest to miara wykorzystująca drugie pochodne w obu kierunkach – pionowym i poziomym. Wartość EOL można otrzymać na podstawie (30) [96]:

$$EOL = \sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} (f_{xx}^2 + f_{yy}^2)^2 \quad (30)$$

gdzie: M i N wymiary macierzy zawierającej informacje z pikseli termogramu.

SML (Sum Modified Laplacian) jest inną miarą ostrości, która została zaproponowana w literaturze. Nayar zauważył, że w przypadku operatora Laplace, drugie pochodne w obu kierunkach pionowym i poziomym mogą mieć różne znaki. Zasugerował zmodyfikowany Laplasjan ML (Modified Laplacian) jako wyrażenie dyskretne. ML można opisać za pomocą (31) [97]:

$$\begin{aligned} \nabla_{ML}^2 f(x, y) = & |2f(x, y) - f(x - h, y) - f(x + h, y)| + \\ & + |2f(x, y) - f(x, y - h) - f(x, y + h)| \end{aligned} \quad (31)$$

W równaniu (27), jako “ $h$ ” oznaczono krok, który można przyjąć jako równy 1. SML można opisać za pomocą wyrażenia przedstawionego w (32) [97]:

$$\begin{aligned} \text{SML} = & \sum_{i=x-N}^{x+N} \sum_{j=y-N}^{y+N} \nabla_{ML}^2 f(i, j)^2 \\ & \nabla_{ML}^2 f(i, j)^2 \geq T \end{aligned} \quad (32)$$

gdzie:  $N$  określa wielkość okna, które służy do pomiaru ostrości termogramu.

Częstotliwość przestrzenna SF (Spatial Frequency): zmodyfikowana wersja miary energii gradientu (EOG) określona za pomocą (33) - (35) [96]:

$$SF = \sqrt{(RF)^2 + (CF)^2} \quad (33)$$

gdzie: RF (Row Frequency) jest częstotliwością rzędu:

$$RF = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=2}^N [f(x, y) - f(x, y - 1)]^2} \quad (34)$$

CF (Column Frequency) jest odpowiednio częstotliwością kolumny:

$$CF = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{x=2}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - f(x - 1, y)]^2} \quad (35)$$

Natomiast  $M$  i  $N$  są to wymiary macierzy zawierającej informacje z pikseli termogramu.

Tenengrad: miara ostrości wykorzystująca operator Sobela do wyznaczenia amplitudy gradientu. Aby użyć tej miary ostrości, można posłużyć się (36) [96]:

$$\text{Tenengrad} = \sum_{x=2}^{x=M-1} \sum_{y=2}^{y=N-1} \left( \nabla S(x, y) \right)^2, \nabla S(x, y) > T_d \quad (36)$$

gdzie:  $T_d$  jest wartością progu dyskryminacji, a  $\nabla S(x, y)$  jest wartością gradientu Sobela,  $M$  i  $N$  wymiary macierzy zawierającej informacje z pikseli termogramu.

### 3. Termowizyjny pomiar temperatury elementów półprzewodnikowych

#### 3.1 Koncepcja termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego

Bezpośredni termowizyjny pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego jest trudny w realizacji, a w praktyce zazwyczaj niemożliwy. Dlatego zaproponowano pomiar pośredni składający się z dwóch etapów:

- 1) termowizyjnego pomiaru temperatury  $T_C$  obudowy urządzenia półprzewodnikowego,
- 2) wyznaczenia temperatury  $T_j$  elementu półprzewodnikowego na podstawie wartości  $T_C$  oraz  $T_A = T_j - T_C$  zgodnie z (37).

$$T_j = T_C + T_A \quad (37)$$

Uwzględniając właściwości elementów półprzewodnikowych i warunki pracy urządzeń elektronicznych najszerszy zakres ich eksploatacji wynosi  $-55^\circ\text{C} < T_j < 170^\circ\text{C}$ . Uznano, że do wykonania termowizyjnego pomiaru wartości  $T_C$  wystarczająca będzie kamera długofalowa wyposażona w matrycę niechłodzonych czujników mikrobolometrycznych. Stałe czasowe mikrobolometru umożliwiają rejestrowanie obrazu z wystarczającą częstotliwością. Czułość termiczna (NEDT) mikrobolometru jest wystarczająca do rejestrowania temperatury obudowy elementu półprzewodnikowego z zadowalającą rozdzielczością wyniku pomiaru temperatury. Dodatkową zaletą zastosowania takiej kamery jest jej mniejszy koszt w porównaniu do kamer wyposażonych w czujniki fotonowe lub w czujniki działające w oparciu o SLS.

Dokładność zaproponowanego termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego zależy od rozdzielczości przestrzennej matrycy detektorów oraz pozornej wielkości urządzenia półprzewodnikowego na termogramie. Zalecane jest, żeby obraz obudowy zajmował jak największą część termogramu (co bywa kłopotliwe zwłaszcza przy diagnostyce urządzeń półprzewodnikowych w obudowach SMD). Dla spełnienia tego zalecenia do pomiarów należy zastosować kamerę z odpowiednim układem optycznym. Fragment obudowy, dla którego wyznaczana jest temperatura, powinien być odwzorowywany na termogramie obszarem o powierzchni co najmniej  $2 \times 2$  piksele (pole powierzchni punktu pomiarowego kamer termowizyjnych zwykle zawiera od  $2 \times 2$  piksele do  $5 \times 5$  piksele).

Układy optyczne kamer termowizyjnych cechują się niewielką głębią ostrości rozumianą jako zakres wartości  $d$ , która umożliwia zarejestrowanie ostrego termogramu. Uzyskanie ostrego termogramu z obudową o wymaganej wielkości jest możliwe dla odpowiedniej odległości pomiędzy urządzeniem półprzewodnikowym a obiektywem. Innym problemem jest zależność wyniku pomiaru temperatury kamerą termowizyjną od szeregu czynników, wśród których najważniejszymi są: współczynnik emisyjności  $\varepsilon$ , kąt obserwacji  $\beta$ , promieniowanie odbite  $T_r$ , transmitancja soczewki układu optycznego  $\tau_l$ , temperatura otoczenia  $T_a$  i temperatura soczewki układu optycznego  $T_l$ .

Drugim etapem pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego jest określenie zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego i temperaturą obudowy urządzenia półprzewodnikowego. Do wyznaczenia tej zależności można wykorzystać narzędzia do symulacji procesów termicznych metodą MES (np. pakiet Solidworks).

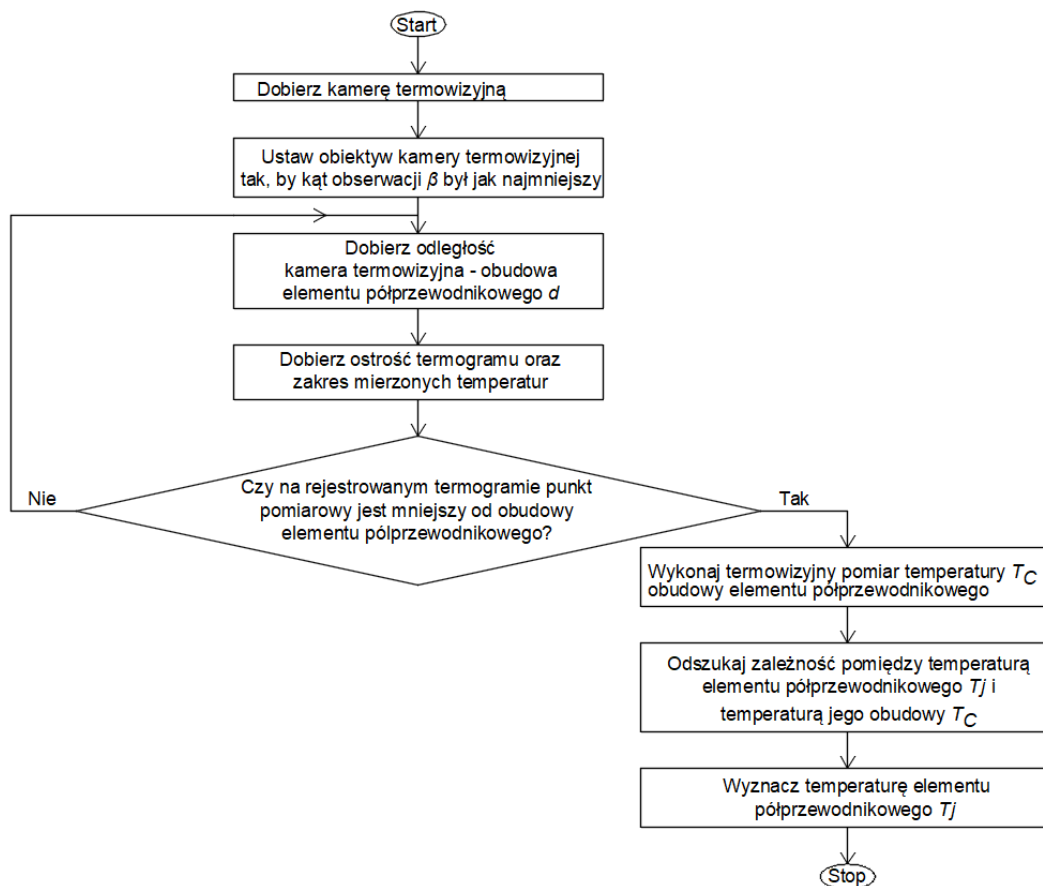
Wykonanie prac symulacyjnych wymaga zdefiniowania trójwymiarowego modelu badanych urządzeń półprzewodnikowych. Utrudnieniem w ich uzyskaniu i przeprowadzeniu symulacji jest brak niezbędnych danych w dostępnej literaturze. Dlatego konieczne jest samodzielne poznanie ich budowy, wymiarów wewnętrznych, określenie właściwości poszczególnych fragmentów modelowanego urządzenia półprzewodnikowego oraz wyznaczenie parametrów propagacji ciepła.

Zaproponowany pośredni pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego wykorzystujący termogram obudowy urządzenia półprzewodnikowego uwzględnia występowanie czynników wpływających na termowizyjny pomiar temperatury oraz zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego i temperaturą obudowy. W celu uzyskania wiarygodnej estymacji temperatury elementu półprzewodnikowego dla zaproponowanego pomiaru pośredniego niezbędne jest przeprowadzenie następujących badań:

- wpływu wybranych czynników na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury (rozdz. 3.2),
- termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzeń półprzewodnikowych (rozdz. 3.3),
- określenie zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego i temperaturą na powierzchni zewnętrznej obudowy urządzenia półprzewodnikowego (rozdz. 3.4),
- weryfikacji termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego oraz otrzymanych zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego i temperaturą obudowy urządzenia półprzewodnikowego (rozdz. 3.5)
- niedokładności pomiaru za pomocą budżetu niepewności termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego (rozdz. 3.6).

Algorytm przedstawiający zaproponowany pomiar przedstawiono na rysunku 18.





Rysunek 18: Algorytm termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego.

### 3.2 Czynniki wpływające na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury $T_C$ obudowy urządzenia półprzewodnikowego

Wynik termowizyjnego pomiaru temperatury  $T_C$  obudowy urządzenia półprzewodnikowego otrzymany zgodnie z algorytmem przedstawionym w pkt 3.1 jest obarczony błędem. Na wartość błędu granicznego wpływają warunki panujące w trakcie pomiaru. Zależy on od natężenia czynników występujących w trakcie pomiaru oraz od tego jak bardzo ich wpływ został skompensowany. Na podstawie przedstawionej koncepcji termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego (3.1) można stwierdzić, że im większa jest wartość granicznego błędu termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego to z tym większym błędem granicznym jest wyznaczona temperatura elementu półprzewodnikowego. Wpływ poszczególnych czynników na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego przedstawiono w rozdz. 2.6.

Na podstawie wykonanej analizy literatury oraz przeprowadzonych badań zauważono, że na wartość termowizyjnego wyniku pomiaru temperatury  $T_J$  elementu półprzewodnikowego wpływają:

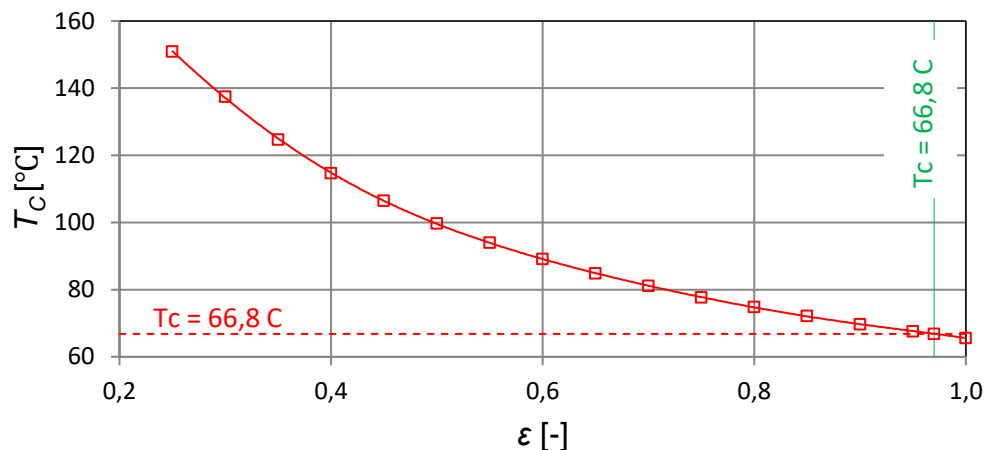
- współczynnik emisyjności  $\varepsilon$ ,
- kąt obserwacji  $\beta$ ,
- odległość  $d$  pomiędzy kamerą termowizyjną a obiektem,
- nieostrość i głębia ostrości termogramu,
- promieniowanie odbite  $T_r$ ,

- transmitancja soczewki układu optycznego  $\tau_l$ ,
- temperatura otoczenia  $T_a$ ,
- temperatura soczewki układu optycznego  $T_l$ .

W celu określenia ilościowego wpływu tych czynników na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego zbudowano stanowisko pomiarowe przedstawione w rozdz. 3.3.1 oraz wykorzystano oprogramowanie Flir Tools+ [98]. Wyjątek stanowiła ocena wpływu kąta obserwacji  $\beta$ , którego ilościowy udział wyznaczono doświadczalnie w trakcie wcześniejszych prac badawczych [99].

### 3.2.1 Wpływ współczynnika emisyjności $\varepsilon$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$

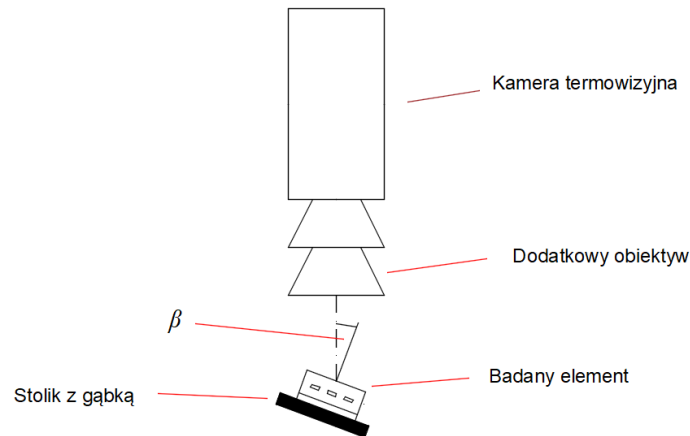
Pierwszym z wymienionych czynników, na który należy zwrócić uwagę w trakcie termowizyjnych pomiarów temperatury  $T_C$  jest wartość współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  powierzchni obudowy urządzenia półprzewodnikowego. Ilościowy wpływ nastawy  $\varepsilon$  (w kamerze termowizyjnej) na wynik pomiaru  $T_C$  wyznaczono z wykorzystaniem pozyskanego termogramu poprzez zmianę nastawy tej wielkości w oprogramowaniu Flir Tools +. Otrzymaną zależność wyniku pomiaru temperatury  $T_C$  od współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  przedstawiono na rysunku 19.



**Rysunek 19:** Zależność  $T_C = f(\varepsilon)$ . Poprawna wartość  $T_C$  wynosiła 66,8 °C, natomiast poprawna wartość  $\varepsilon$  obserwowanej powierzchni wynosiła 0,97.

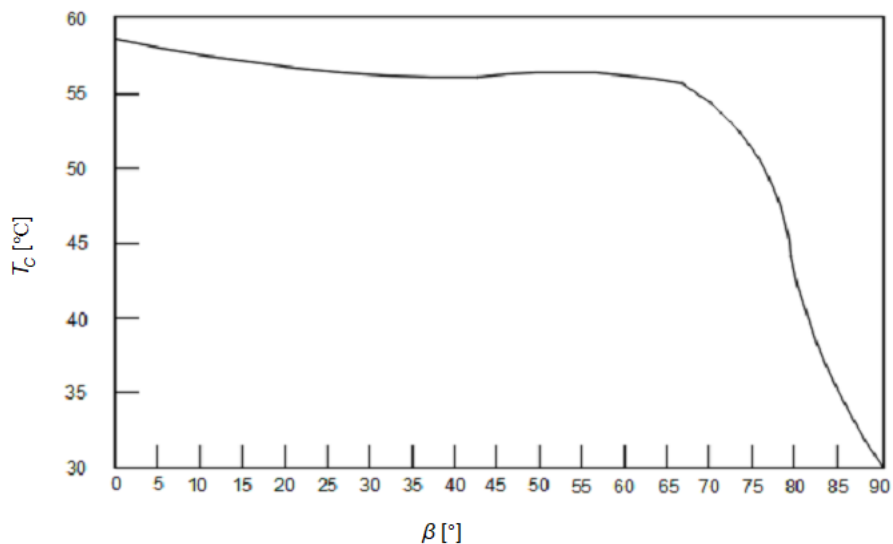
### 3.2.2 Wpływ kąta obserwacji $\beta$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$

Drugim czynnikiem, który ma wpływ na wskazanie kamery termowizyjnej jest kąt obserwacji  $\beta$ . Ilościowy wpływ tego czynnika otrzymano poprzez zmianę położenia obserwowanej obudowy urządzenia półprzewodnikowego począwszy od równoległego położenia względem obiektywu kamery termowizyjnej ( $\beta = 0^\circ$ ) do momentu, gdy powierzchnia ta była położona prostopadle do obiektywu kamery termowizyjnej ( $\beta = 90^\circ$ ). Schemat blokowy przedstawiający układ do zmian kąta  $\beta$  pokazano na rysunku 20.



**Rysunek 20:** Schemat blokowy układu do zmian kąta  $\beta$  wykorzystywany w trakcie prowadzonych prac.

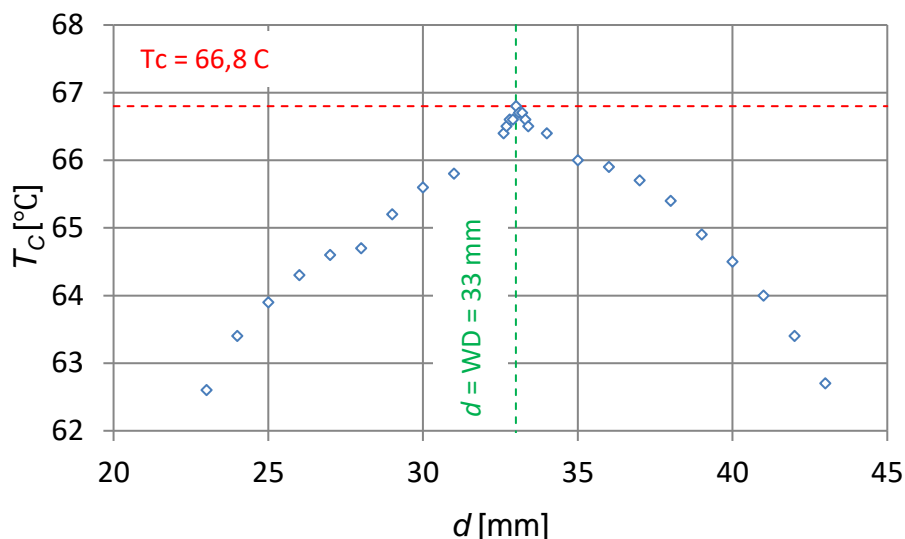
Otrzymaną zależność  $T_C = f(\beta)$  przedstawiono na rysunku 21 [99].



**Rysunek 21:** Zależność termowizyjnego wyniku pomiaru temperatury obudowy  $T_C$  od kąta obserwacji  $\beta$  [99].

### 3.2.3 Wpływ odległości $d$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$

Na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego wpływa również odległość  $d$  pomiędzy obiektywem kamery termowizyjnej a tą obudową. W celu wykonania prawidłowego pomiaru wartość  $d$  należy dobrać w taki sposób, by była większa od minimalnej odległości ostrzenia, to znaczy od wartości  $d$ , powyżej której możliwe jest uzyskanie ostrego termogramu. W przypadku zastosowania dodatkowego obiektywu uzyskanie ostrego termogramu jest możliwe dla odległości  $d$  wskazanej przez producenta. Zależność wartości temperatury obudowy  $T_C$  zmierzonej kamerą z zastosowanym dodatkowym obiektywem od odległością  $d$  pokazano na rysunku 22.



Rysunek 22: Zależność  $T_c = f(d)$ . Poprawna wartość temperatury  $T_c = 66,8$  °C.

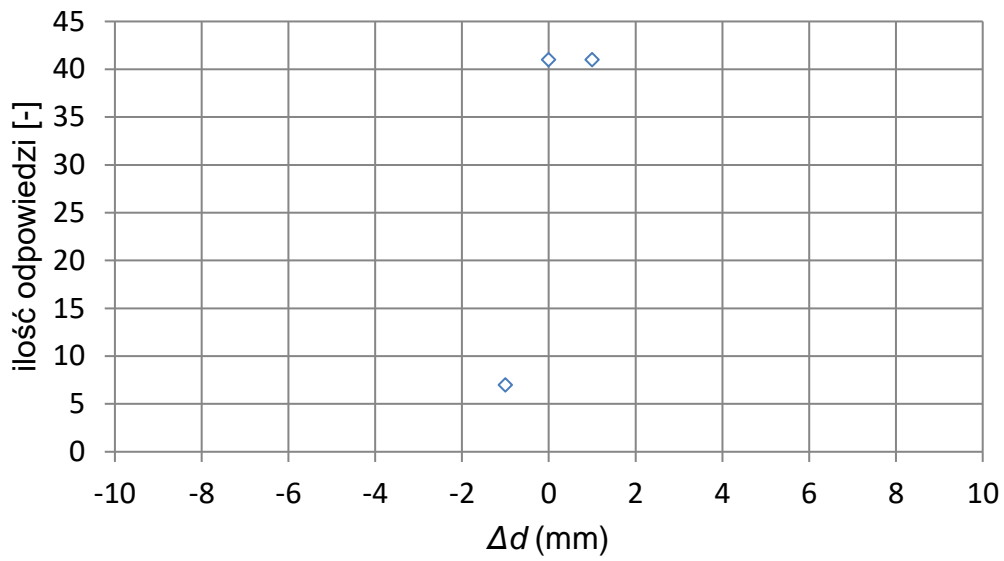
### 3.2.4 Wpływ nieostrości termogramu na wynik pomiaru temperatury $T_c$

Zmiana odległości (zwłaszcza dla ich małych wartości), ma silny wpływ na zmianę ostrości rejektrowanego termogramu. Z kolei wraz ze zmianą ostrości zmienia się wynik termowizyjnego pomiaru temperatury obserwowanej powierzchni. Poza zmianą odległości  $d$  na ostrość obrazu wpływa również położenie kątowne  $\gamma$  pierścienia regulacji ostrości.

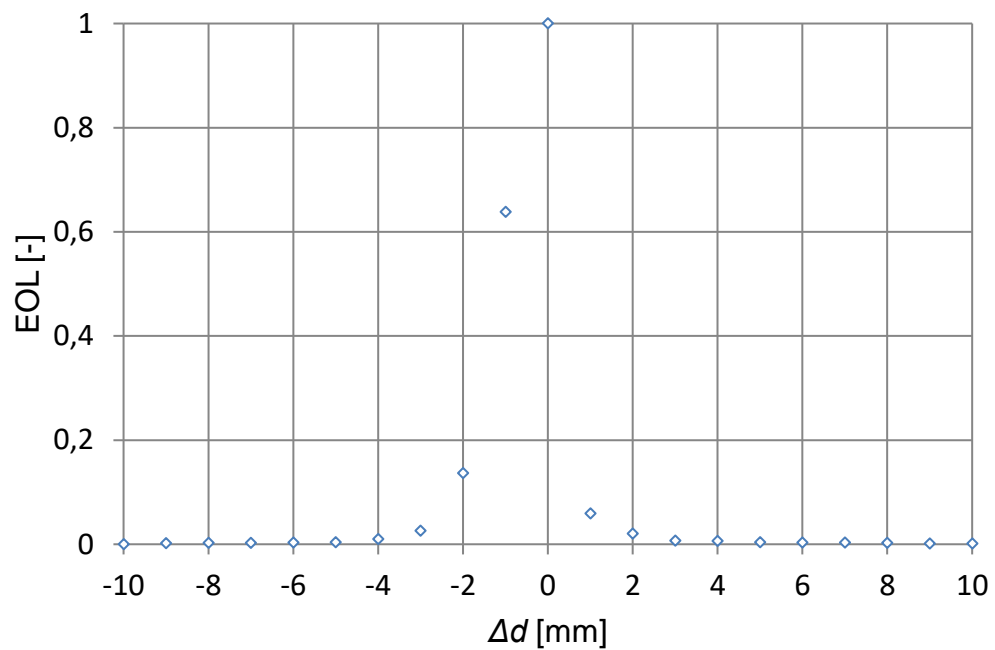
Do oceny wpływu nieostrości na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury urządzenia półprzewodnikowego skorzystano z wyników badań opisanych w [99]. W tym celu przeprowadzono badania określające zależności pomiędzy nieostrością rejestrowanego termogramu a wynikiem pomiaru kamerą Flir E50 temperatury obudowy urządzenia. Przeanalizowano wyniki ankiet przeprowadzonych w grupie 89 osób obojga płci w wieku od 19 do 25 lat. Zadaniem ankietowanych była ocena ostrości zarejestrowanych termogramów pozyskanych dla dwóch serii pomiarowych, przeprowadzonych dla określonych nastaw odległości  $d$  oraz dla zadanego położenia kątownego  $\gamma$  pierścienia regulacji ostrości. Podczas badań należało wskazać najbardziej ostry termogram dla obu serii termogramów. W pierwszej serii nieostrość termogramu zmieniano poprzez zmianę nastawy  $d$  z rozdzielczością  $\Delta d = 1$  mm. W drugiej serii zmieniano położenie kątowne  $\gamma$  pierścienia regulacji ostrości z krokiem  $\Delta \gamma = 1.5^\circ$ . Wskazania ankietowanych porównano z nieostrością wyznaczoną za pomocą miar przedstawionych w rozdziale 2.6.2. Zauważono, że wskazania ankietowanych są najbardziej zbliżone z wynikami otrzymanymi za pomocą EOL. Zauważono również, że w przypadku wskazań ankietowanych oraz wyników otrzymanych za pomocą EOL jako najbardziej ostre wskazano te same termogramy. Możliwe było stwierdzenie, że najlepszą miarą, która pozwala ocenić nieostrość rejestrowanego termogramu jest EOL (Energy of Laplacian).

Na rysunku 23 pokazano zależność liczby termogramów wskazywanych przez ankietowanych jako ostrych od zmiany odległości  $\Delta d$  oraz zależność wyznaczonej znormalizowanej miary EOL od zmiany odległości  $\Delta d$ . Natomiast na rysunku 24 pokazano zależność liczby termogramów wskazywanych przez ankietowanych jako ostrych od kąta  $\gamma$  oraz zależność znormalizowanej miary EOL od kąta  $\gamma$ .

a)

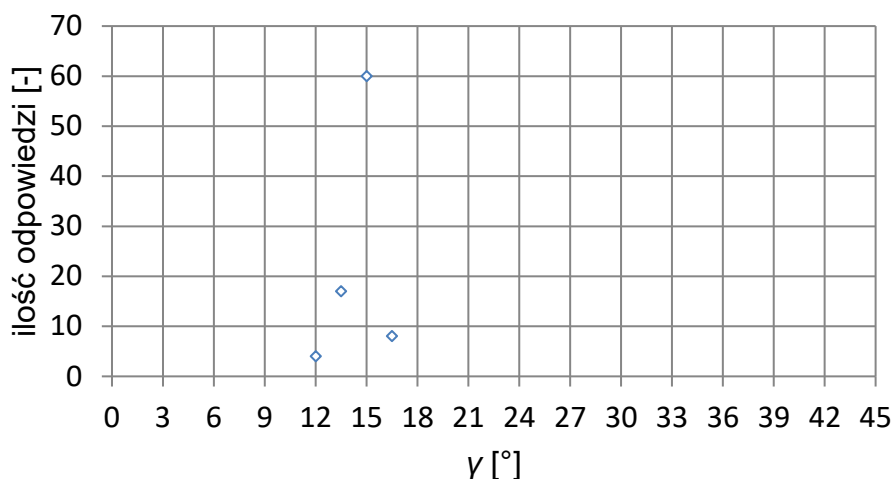


b)

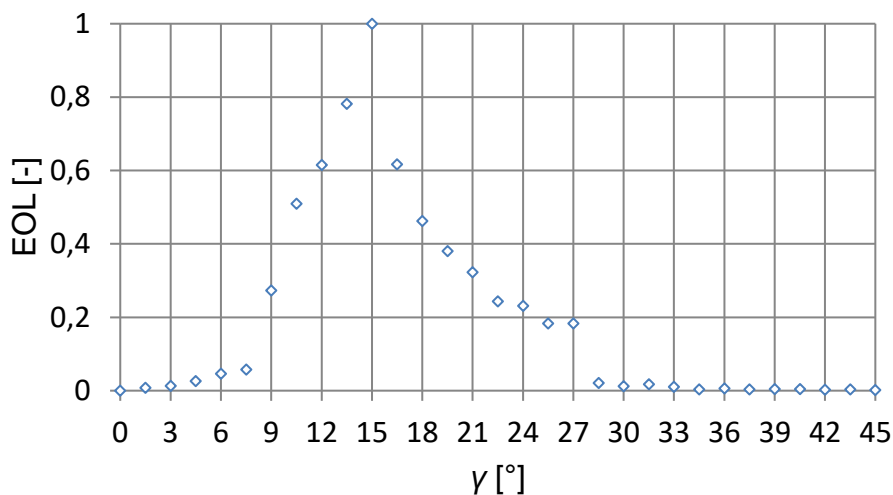


**Rysunek 23:** a) Zależność ilości odpowiedzi termogramów (termogramy wskazanych przez ankietowanych jako ostre od zmiany odległości  $\Delta d$ ), b) zależność znormalizowanej miary EOL od zmiany odległości  $\Delta d$ .

a)



b)

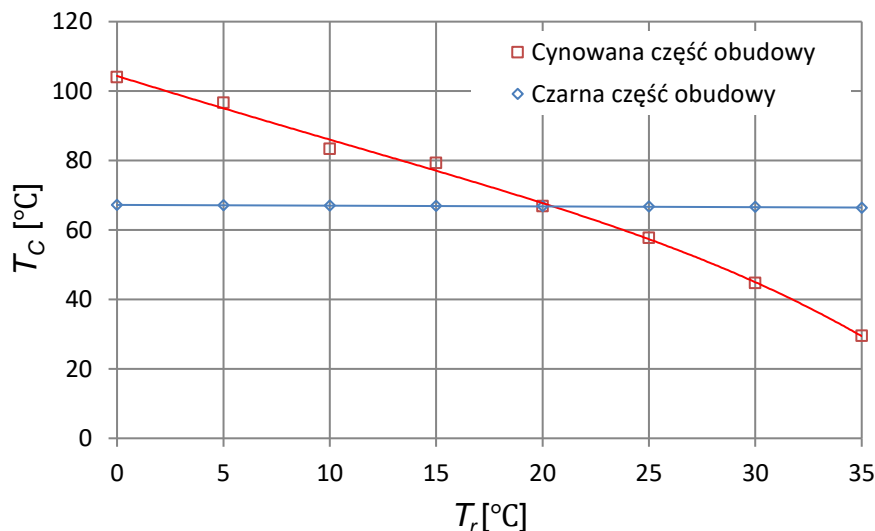


**Rysunek 24:** Zależność ilości termogramów wskazanych przez ankietowanych jako ostre od kąta  $\gamma$  b) Zależność znormalizowanej miary EOL od kąta  $\gamma$ .

### 3.2.5 Wpływ temperatury odbitej $T_r$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$

Wpływ temperatury odbitej  $T_r$  na wynik pomiaru temperatury  $T_C$  ma zazwyczaj charakter losowy. Jest on zależny od temperatury obiektów znajdujących się w pobliżu i ich położenia względem obserwowanej powierzchni. Jest zależny również od wartości  $\varepsilon$  obserwowanej powierzchni. Gdy wykonywany jest termowizyjny pomiar temperatury czarnej części obudowy, która została wykonana z EMC (Epoxy Mold Compoud) wpływ promieniowania odbitego można pominąć. W przypadku, gdy termowizyjny pomiar temperatury został wykonany na miedzianej i pokrytej cyną części obudowy wpływu promieniowania odbitego nie można pominąć. Ilościowy wpływ promieniowania odbitego  $T_r$  na wynik pomiaru  $T_C$  wyznaczono z wykorzystaniem pozyskanego termogramu poprzez zmianę nastawy tej wielkości w oprogramowaniu Flir Tools +. Termogram wykonano, gdy odległość pomiędzy obiektywem kamery termowizyjnej i obserwowaną powierzchnią wynosiła 33 mm. Zależność  $T_C = f(T_r)$  dla

czarnej i cynowanej części obudowy części obudowy elementu półprzewodnikowego przedstawiono na rysunku 25.

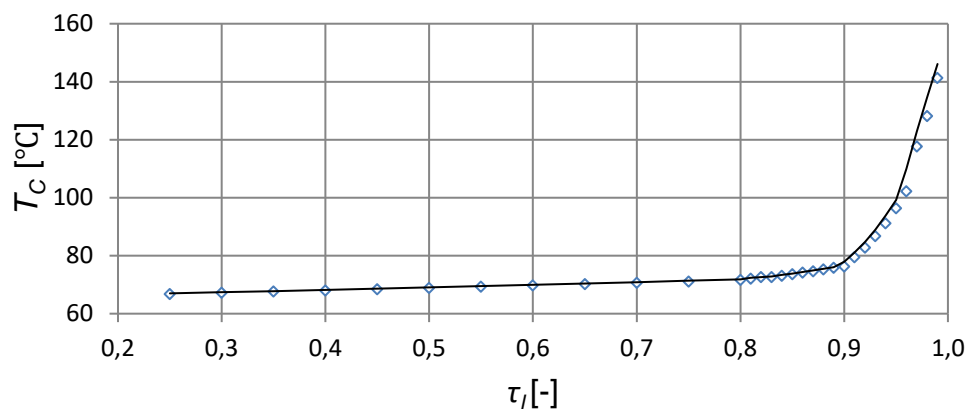


**Rysunek 25:** Zależność  $T_C = f(T_r)$  dla czarnej i bielonej części obudowy. Poprawna wartość temperatury  $T_C = 67^\circ\text{C}$ .

Z zależności przedstawionej na rysunku 25 wynika, że wykonanie termowizyjnego pomiaru temperatury cynowanej części obudowy jest kłopotliwe ze względu na silny wpływ temperatury odbitej na wynik temperatury  $T_C$ .

### 3.2.6 Wpływ transmitancji $\tau_l$ soczewki dodatkowego obiektywu na wynik pomiaru temperatury $T_C$

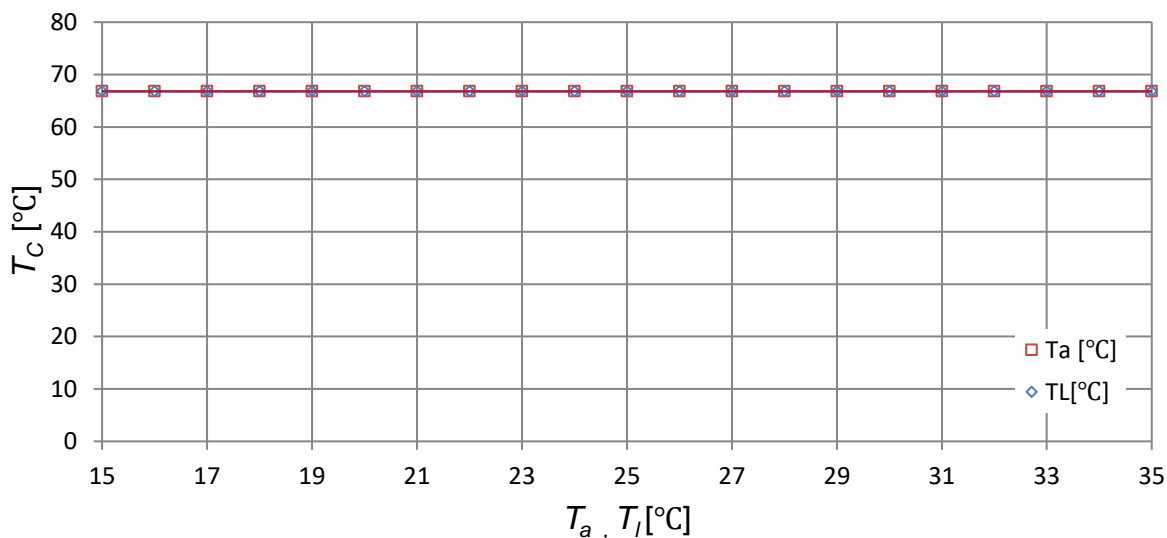
W przypadku pomiarów termowizyjnych z użyciem dodatkowego obiektywu występuje wpływ jego transmitancji  $\tau_l$  na wynik pomiaru termowizyjnego. Charakterystykę obrazującą ten wpływ przedstawiono na rysunku 26.



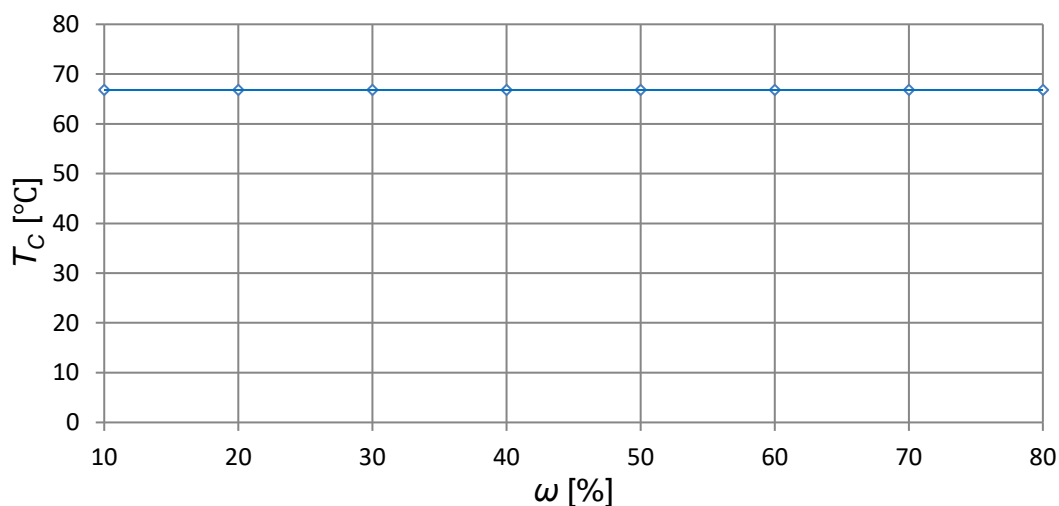
**Rysunek 26:** Zależność  $T_C = f(\tau_l)$ ; poprawna wartość temperatury powierzchni wynosiła  $67^\circ\text{C}$ .

### 3.2.7 Wpływ temperatury $T_l$ soczewki dodatkowego obiektywu, temperatury otoczenia $T_a$ oraz wilgotności $\omega$ na wynik pomiaru temperatury $T_C$

Pozostałe czynniki, czyli temperatura dodatkowego obiektywu  $T_l$ , temperatura otoczenia  $T_a$  oraz wilgotność  $\omega$  charakteryzują się niewielkim wpływem na wynik pomiaru kamerą termowizyjną, gdy odległość pomiędzy obiektywem kamery termowizyjnej i obserwowaną powierzchnią jest mała ( $d < 1$  m). Wpływ temperatury dodatkowego obiektywu  $T_l$  i temperatury otoczenia  $T_a$  na wynik temperatury  $T_C$  pokazano na rysunku 27. Wpływ wilgotności  $\omega$  na wynik temperatury  $T_C$  pokazano na rysunku 28.



Rysunek 27: Zależności  $T_C = f(T_a)$  oraz  $T_C = f(T_l)$ . Poprawna wartość temperatury powierzchni wynosiła 67 °C.



Rysunek 28: Zależność  $T_C = f(\omega)$ . Poprawna wartość temperatury powierzchni wynosiła 67 °C.

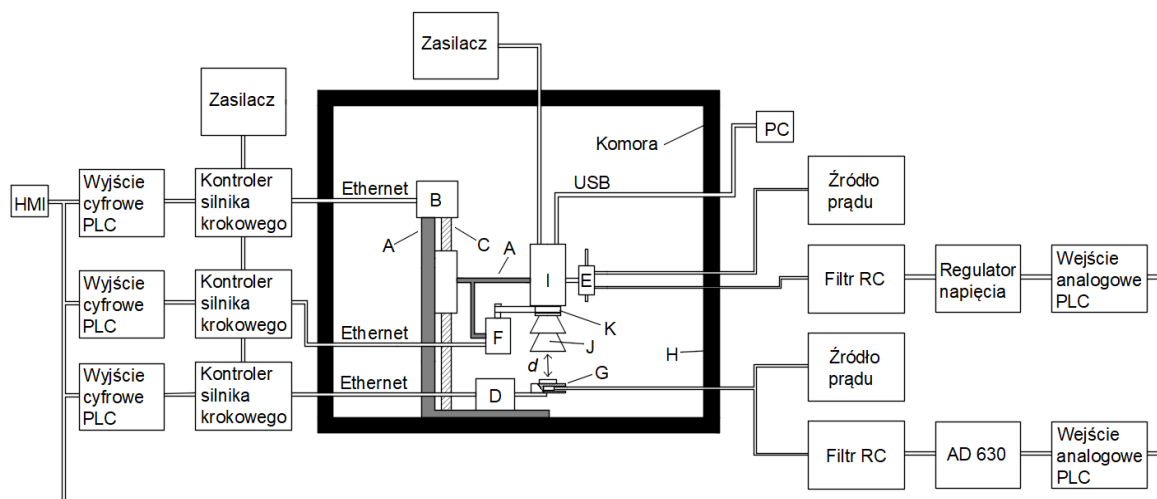


### 3.3 Termowizyjny pomiar temperatury obudowy urządzeń półprzewodnikowych

#### 3.3.1 Stanowisko pomiarowe oraz warunki panujące w trakcie pomiaru

Uwzględniając oddziaływanie wymienionych w pkt 3.2 czynników postanowiono w dalszych pracach badawczych zminimalizować ich wpływ na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego. W efekcie zmniejszono wartość błędu wynikającego w ich występowania i zwiększono dokładność wyznaczonych zależności między zmierzoną temperaturą obudowy a szukaną temperaturą elementu półprzewodnikowego. W tym celu zbudowano stanowisko, w którym ograniczenie oddziaływania promieniowania odbitego osiągnięto poprzez umieszczenie kamery i badanego obiektu w komorze o wymiarach 40 cm x 30 cm x 30 cm. Wewnętrzne strony ścian komory, wykonane z plexi, wyłożono warstwą czarnej, porowatej pianki poliuretanowej. Wybór tego materiału podyktowany był faktem, że pojedynczy por pianki przypomina wnękowy model ciała doskonale czarnego oraz, że zastosowana pianka cechuje się wysoką wartością współczynnika emisyjności  $\varepsilon = 0,95$ .

Zastosowana komora jest obiektem zamkniętym, w której utrudnione są ręczne nastawy odległości  $d$  pomiędzy obiektywem kamery i obserwowaną powierzchnią, położenia kąтового pierścienia regulacji ostrości  $\gamma$  oraz kąta obserwacji  $\beta$ . Ponadto, otwarcie komory w trakcie prowadzonych badań może wpłynąć na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury. Z tego powodu nastawy  $d$ ,  $\beta$  oraz  $\gamma$  realizowane były w sposób automatyczny, za pomocą silników krokowych, a ich wartości zadawano na panelu dotykowym HMI połączonym z sterownikiem PLC. Ponadto, na panelu tym wyświetlano aktualnie ustawione wartości  $\gamma$ ,  $\beta$  oraz zmierzoną odległość  $d$ . Schemat blokowy zastosowanego stanowiska przedstawiono na rysunku 29, natomiast widok skonstruowanego stanowiska oraz panelu HMI umożliwiającego sterowanie nastawami  $\gamma$ ,  $\beta$  oraz  $d$  (i odczyt tych wielkości) przedstawiono na rysunku 30.

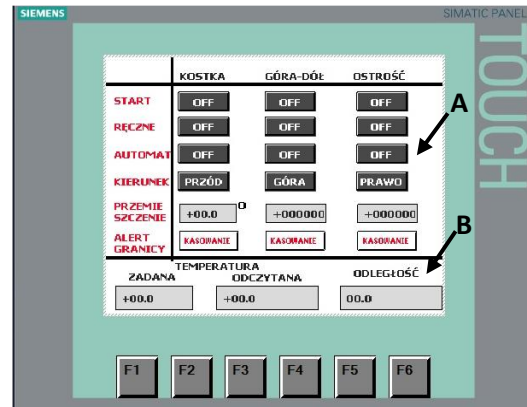


**Rysunek 29:** Schemat blokowy stanowiska pomiarowego: (A) statyw, (B) silnik krokowy, (C) układ liniowy, (D) silnik krokowy, (E) liniowy czujnik rezystancyjny, (F) silnik krokowy, (G) stolik z obserwowanym elementem, (H) pianka poliuretanowa, (I) kamera termowizyjna, (J) dodatkowy obiektyw kamery termowizyjnej Close Up 2x, (K) gumowy pasek, (d) WD (Work Distance) – odległość pomiędzy obserwowanym obiektem i obiektywem kamery termowizyjnej.

a) Widok zbudowanego stanowiska – otwarta pokrywa komory



b) Widok panelu dotykowego (HMI). A – obszar kontroli nastaw parametrów, B – obszar odczytu aktualnych wartości.



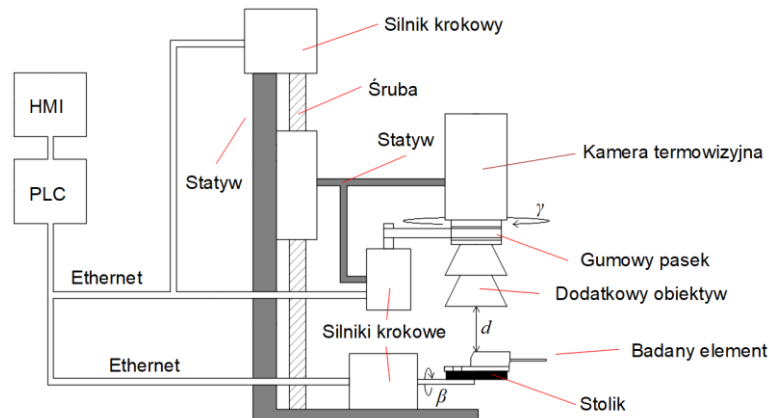
Rysunek 30: Widok zbudowanego stanowiska pomiarowego i panelu sterownika.

W prowadzonych pracach pomiar temperatury obudów TO-220 oraz TO-247 wykonywano po jej ustabilizowaniu. Z tego powodu częstotliwość rejestracji termogramów nie była istotna. W konsekwencji możliwe jest zastosowanie powszechnie dostępnych kamer termowizyjnych, cechujących się niską częstotliwością rejestracji termogramów. W trakcie pomiarów wykorzystano kamerę Flir E50 [100] z dodatkowym obiektywem Close up. 2x (T197214) [101]. Kamera ta jest wyposażona w matryce niechłodzonych detektorów mikrobolometrycznych o rozdzielczości przestrzennej 240 x 180 pikseli. Zastosowanie dodatkowego obiektywu w kamerze z matrycą o takiej rozdzielczości przestrzennej umożliwiło uzyskanie pola widzenia pojedynczego detektora o krawędzi równej  $67 \mu\text{m}$ . Zgodnie ze wskazaniami producenta obiektywu Close up. 2x uzyskanie krawędzi pola widzenia pojedynczego detektora o takiej wielkości było możliwe dla  $d = 33 \text{ mm}$  [102]. Jest to odległość WD (Work Distance), dla której możliwe jest uzyskanie ostrego termogramu.

Zmiana odległości  $d$  o wartość 1 milimetra powodowała pogorszenie ostrości rejestrowanego termogramu. W efekcie wzrastał również błąd termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego. Zapewnienie stałej odległości dla kamery trzymanej w ręce jest bardzo kłopotliwe. Z tego powodu w zbudowanym stanowisku uzyskanie odległości  $d = \text{WD}$ , gwarantującej poprawną ostrość obrazu realizowano poprzez umieszczenie kamery na specjalnie skonstruowanym statywie. Precyzyjny dobór odległości  $d$  był możliwy dzięki zastosowaniu statywu wyposażonego w przekładnię ślimakową napędzaną silnikiem krokowym 57H56H3004A2. Pracę silnika kontrolowano za pomocą sterownika PLC połączonego przez sterownik silnika krokowego DM556. W konsekwencji możliwy był dobór właściwej ostrości termogramu poprzez nastawę w sposób powtarzalny określonych odległości  $d$ , z rozdzielczością 0,25 mm.

Zmianę ostrości rejestrowanego termogramu można również uzyskać poprzez zmianę położenia kąowego  $\gamma$  pierścienia regulacji ostrości. W zbudowanym stanowisku uzyskano to poprzez połączenie gumowym paskiem pierścienia kamery z silnikiem krokowym, który kontrolowany był sterownikiem silnika krokowego DM556 i sterownikiem PLC. Rozwiązanie takie umożliwiło zmianę położenia kąowego pierścienia z rozdzielczością  $1,5^\circ$ . Omówiony

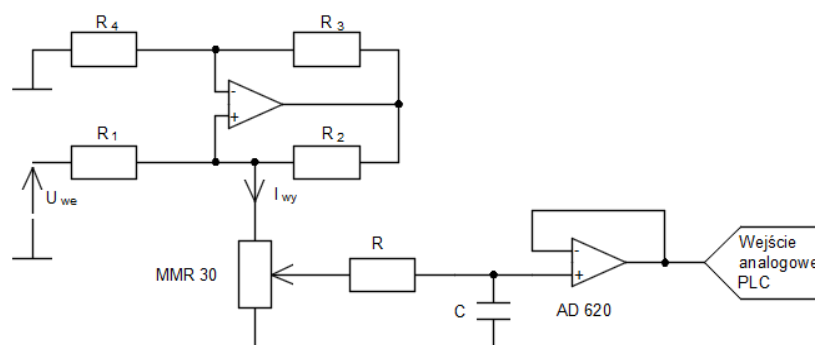
układ umożliwiający zmianę nastaw odległości  $d$  oraz położenia kąowego  $\gamma$  przedstawiono na rysunku 31.



**Rysunek 31:** Schemat blokowy układu pomiarowego.

Zadawane w opisanym stanowisku nastawy odległości  $d$  kontrolowano za pomocą potencjometrycznego czujnika odległości MMR30. Zgodnie z wymaganiami zawartymi w nocie katalogowej uzyskanie poprawnego pomiaru odległości  $d$  za pomocą tego czujnika było możliwe po jego zasileniu sygnałem prądowym o wartości natężenia równej  $100 \mu\text{A}$ . W tym celu zaprojektowano i wykonano źródło prądu pracującego w układzie Howlanda.

W zaprojektowanym i wykonanym stanowisku sygnał pochodzący z potencjometrycznego czujnika odległości pozyskiwany był za pomocą wejścia analogowego sterownika PLC. Ze względu na małą wartość rezystancji tego wejścia w obwodzie pomiarowym zastosowano wzmacniacz operacyjny AD620 pracujący w układzie wtórnika napięciowego. Podczas prac badawczych zaobserwowano, że na wartość wyniku pomiaru uzyskanego za pomocą czujnika MMR 30 wpływały zakłócenia pochodzące z pracujących silników krokowych, odpowiedzialnych za zmianę nastaw wartości  $d$  oraz  $\gamma$ . W celu zminimalizowania ich wpływu zastosowano przy źródle prądu i czujniku kondensatory filtrujące, oraz w obwodzie wejściowym sterownika PLC filtr RC. Schemat omawianego układu przedstawiono na rysunku 32.



**Rysunek 32:** Układ pomiarowy służący do odczytu sygnału napięciowego z czujnika potencjometrycznego MMR30.

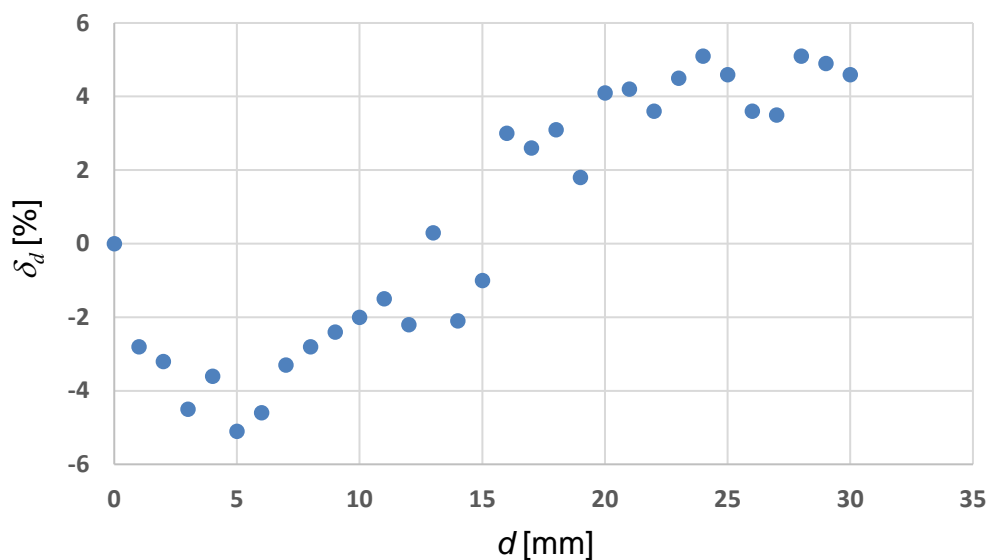
W celu weryfikacji dokładności pomiaru wartości  $d$  czujnikiem MMR30 wykonano równoległe pomiar laserowym dalmierzem FT50RLA-70-S1L8, do którego odnoszono wyniki pomiarów wykonanych za pomocą MMR30. Zakres pomiarowy zastosowanego dalmierza

wynosi od 30 do 100 mm, przy rozdzielczości pomiaru równej 0,1 mm. Przyjmując za wartość poprawną wynik pomiaru  $d_s$  dalmierzem FT50RLA-70-S1L8, wyznaczono względny błąd pomiaru  $\delta_d$  czujnikiem MMR30 – (38).

$$\delta_d = \frac{d_r - d_s}{d_s} \cdot 100\% \quad (38)$$

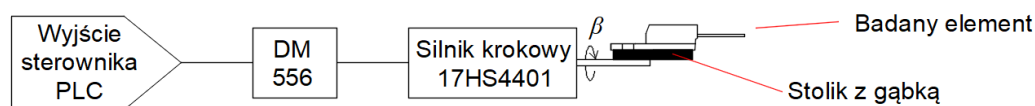
w którym:  $d_r$  – odległość zmierzona za pomocą MMR30,  $d_s$  – odległość zmierzona za pomocą FT50RLA-70-S1L8.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych wyznaczono przedstawioną na rysunku 33 charakterystykę  $\delta_d = f(d)$ .

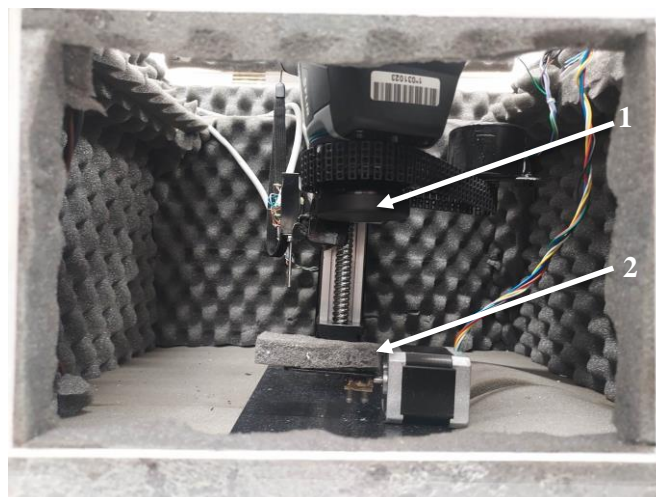


**Rysunek 33:** Zależność błędu względnego pomiaru odległości  $\delta_d$  czujnikiem MMR30 od odległości  $d$ .

W trakcie wykonywania termowizyjnych pomiarów temperatury obudowy urządzeń półprzewodnikowych istotne jest również położenie obserwowanej powierzchni obudowy urządzenia półprzewodnikowego względem obiektywu kamery termowizyjnej. Z tego względu konieczna była możliwość regulacji kąta obserwacji obudowy. W tym celu w zbudowanym stanowisku obserwowane urządzenie półprzewodnikowe umieszczano na odpowiednio przygotowanym stoliku. Był nim cienki płaskownik ze stali nierdzewnej pomalowany czarną, matową farbą. Pomalowanie stolika miało na celu zminimalizowanie wpływu promieniowania odbitego. Dodatkowo, w celu elektrycznego odizolowania elementu półprzewodnikowego od metalowych części, na stoliku umieszczono fragment gąbki wykonanej z materiału nieprzewodzącego. Tak przygotowany stolik zintegrowano z wałem silnika krokowego 17HS4401, który sterowano za pomocą sterownika PLC poprzez sterownik silnika krokowego DM556. W efekcie możliwe było sterowanie położeniem kątowym stolika  $\beta_k$  z rozdzielczością 0,9°. Schemat blokowy omawianego układu przedstawiono na rysunku 34, natomiast na rysunku 35 przedstawiono jego zdjęcie.



**Rysunek 34:** Schemat blokowy układu sterowania położeniem kątowym  $\beta$  stolika, na którym umieszczano obserwowane urządzenie półprzewodnikowe.



**Rysunek 35:** Zdjęcie przedstawiające obiektyw kamery termowizyjnej z dodatkowym obiektywem (1). Poniżej obiektywu jest widoczny silnik krokowy 17HS4401, z wałem którego zintegrowano stolik z gąbką (2). Sterownik silnika krokowego DM556 oraz sterownik PLC umieszczono poza komorą pokazaną na zdjęciu (poza zakresem zdjęcia).

Pomimo optycznej separacji wnętrza komory podczas prowadzonych prac badawczych zauważono, że źródłami promieniowania odbitego (od obserwowanej obudowy urządzenia półprzewodnikowego) są urządzenia, które znajdują się w jej wnętrzu. W celu pomiaru wartości temperatury odbitej zaprojektowano i wykonano odbłyśnik, którym był aluminiowy blok o wymiarach 45 x 16 x 16 mm, z wykonaną półsfery o promieniu 5 mm (rysunek 36). Wnętrze półsfery wygładzono uzyskując w ten sposób powierzchnię rozpraszającą padające promieniowanie. W celu wykonania pomiaru promieniowania odbitego w ustawieniach kamery termowizyjnej wyłączano kompensację pozostałych czynników, które wpływają na wynik pomiaru temperatury. Następnie, w odległości  $d = WD = 33$  mm umieszczano na stoliku odbłyśnik (w miejscu obudowy urządzenia półprzewodnikowego) i wykonywano termowizyjny pomiar temperatury powierzchni półsfery. Uzyskany wynik temperatury wpisywano w oprogramowaniu kamery termowizyjnej (Flir Tools) jako wartość temperatury odbitej.



**Rysunek 36:** Zdjęcie odbłyśnika do pomiaru temperatury odbitej.

### **3.3.2 Pomiar temperatury na powierzchni obudowy urządzenia półprzewodnikowego**

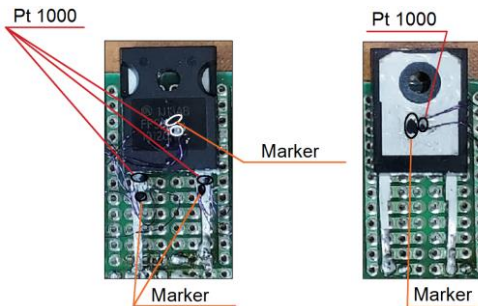
Termowizyjne pomiary temperatur obudów elementów półprzewodnikowych wykonano wykorzystując stanowisko przedstawione w pkt 3.1.1. Fragmenty obserwowanych obudów są wykonane z różnych materiałów i posiadają różne wartości współczynników emisyjności  $\varepsilon$ . Z tego powodu na wybrane powierzchnie badanych obudów naniesiono markery, czyli obszary pomalowane farbą Velvet Coating 811-21 o znanej wartości  $\varepsilon$  wynoszącej od 0,970 do 0,975, dla temperatur z zakresu od  $-36^{\circ}\text{C}$  do  $82^{\circ}\text{C}$ . Niepewność emisyjności powierzchni markera wynosiła 0,004 [103]. Wymiary obudów urządzeń półprzewodnikowych oraz materiały stosowane do ich konstrukcji pokazano w rozdziale 3.4.1.

W celu zweryfikowania poprawności termowizyjnego pomiaru temperatury uzyskane wyniki porównano z wynikami pomiaru temperatury otrzymanymi za pomocą metody stykowej. Z tego powodu, obok markerów naklejono czujniki temperatury Pt1000 w obudowie SMD 0602 [104]. Do przytwierdzenia czujników Pt1000 do obudów elementów półprzewodnikowych wykorzystano klej WLK 5 ze znaną wartością  $k = 0,836 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  [105]. Temperatura zarejestrowana za pomocą Pt1000 posłużyła do zweryfikowania poprawności termowizyjnego pomiaru temperatury oraz umożliwiła wyznaczenie współczynników  $\varepsilon$  powierzchni, które nie zostały pomalowane farbą Velvet Coating 811-21. Widok obudów urządzeń półprzewodnikowych z czujnikami temperatur oraz z naniesionymi markerami przedstawiono na rysunku 37.

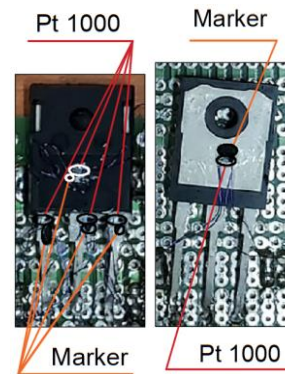


## K. Dziarski *Termowizyjne obserwacje elementów półprzewodnikowych*

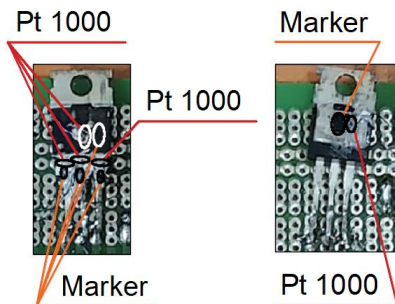
a) Rozmieszczenie czujników Pt1000 i markerów na obu stronach obudowy TO-247-2 diody FFSH10120A.



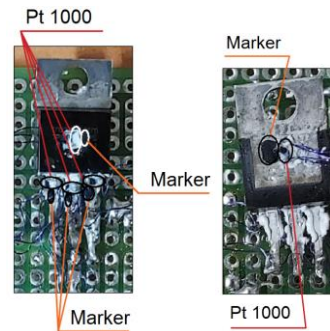
b) Rozmieszczenie czujników i markerów na obudowie TO-247-3 tranzystora C2M0280120D.



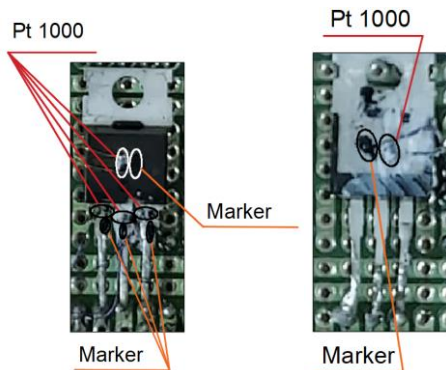
c) Rozmieszczenie czujników i markerów na obu stronach obudowy TO-220-3 tranzystora IRF 9640.



d) Rozmieszczenie czujników i markerów na obu stronach obudowy TO-220-3 tranzystora TP90H180PS.



e) Rozmieszczenie czujników i markerów na obu stronach obudowy TO-220-3 tranzystora IRF 9540.

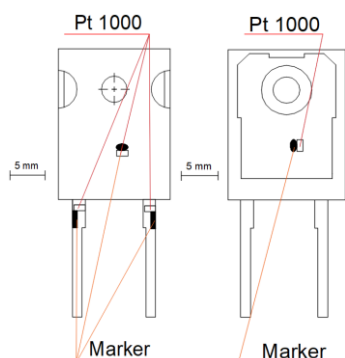


**Rysunek 37:** Widok obudów urządzeń półprzewodnikowych, które wykorzystano w przeprowadzonych pracach badawczych. Na obudowach są widoczne czujniki temperatur oraz markery namalowane farbą Velvet coating.

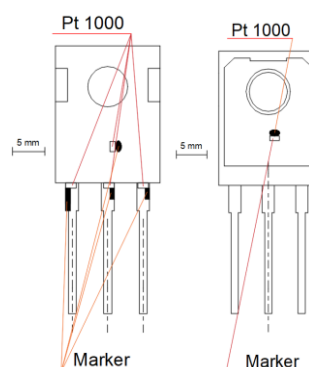
Wyznaczenie współczynników emisyjności  $\varepsilon$  powierzchni obudów urządzeń elektronicznych było możliwe dzięki zastosowaniu metody porównawczej. Polegało to na termowizyjnym pomiarze temperatury markera o znanym  $\varepsilon$ , a następnie pomiarze temperatury powierzchni o nieznanym wartości  $\varepsilon$  i takim doborze wartości  $\varepsilon$  w nastawach kamery termowizyjnej, aby uzyskać równość wyników pomiarów temperatury tej powierzchni i markera. Znaną wartość współczynnika  $\varepsilon$  markera można odczytać z dokumentów przygotowanych przez producenta farby, którą pokryto obserwowaną powierzchnię. W tej

metodzie należy założyć, że znana wartość współczynnika  $\varepsilon$  została wyznaczona z zadowalającą dokładnością. Należy również założyć, że grubość warstwy farby (materiału) jest na tyle cienka, że nie wpływa na wartość temperatury na powierzchni. Innym niezbędnym założeniem jest równość temperatury powierzchni ze znaną wartością  $\varepsilon_z$  oraz powierzchni, której wartość  $\varepsilon_n$  jest mierzona. Jest to możliwe, gdy odległość pomiędzy punktem pomiarowym umieszczonym na powierzchni o znanej wartości  $\varepsilon_z$  oraz punktem pomiarowym na powierzchni, której wartość  $\varepsilon_n$  jest mierzona jest niewielka. Założono, że naniesiony marker nie zaburza rozkładu temperatur na powierzchni obserwowanego fragmentu obudów. Umieszczenie markerów i czujników Pt1000 pokazano na rysunku 38.

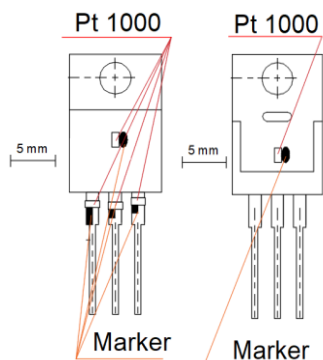
a) Położenie markerów oraz czujników Pt1000 na obudowie TO-247-2 diody FFSH10120A.



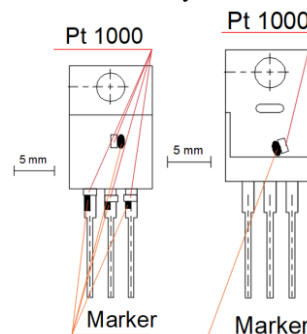
b) Położenie markerów oraz czujników Pt1000 na obudowie TO-247-3 tranzystora C2M0280120D.



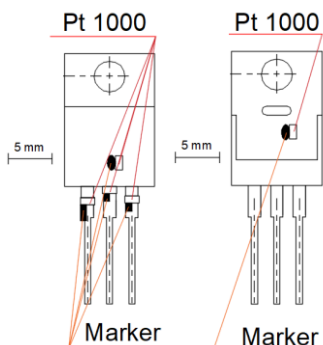
c) Położenie markerów oraz czujników Pt1000 na obudowie TO-220-3 z TP90H18PS



d) Położenie markerów oraz czujników Pt1000 na obudowie TO-247-3 tranzystora C2M0280120D.



e) Położenie markerów oraz czujników Pt1000 na obudowie TO-220-3 z IRF 9640.

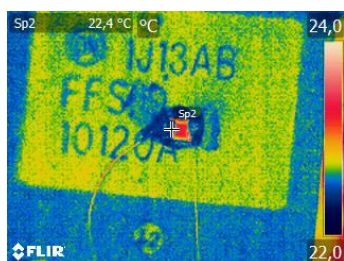


**Rysunek 38:** Rozmieszczenie markerów (namalowanych farbą Velvet coating) i czujników Pt1000 na obudowach urządzeń półprzewodnikowych wykoprzystanych w trakcie przeprowadzonych prac badawczych.

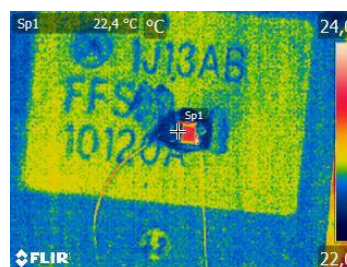


Poprawność doboru współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  i związana z tym dokładność termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego zweryfikowano poprzez porównanie wyniku tego pomiaru z wynikami stykowego pomiaru temperatury, który wykonano za pomocą czujników Pt1000 rozmieszczonych tak, jak przedstawiono na rysunku 38. Czujniki łączono metodą czteroprzewodową za pomocą drucików o średnicy  $\varphi = 0,15$  mm (w izolacji) z płytką uniwersalną. Płytką uniwersalną służyła do połączenia z przewodami o większej średnicy, co ułatwiało połączenie z urządzeniami pomiarowymi. Wartości napięcia  $U_{Pt1000}$  na zaciskach czujnika Pt1000 oraz prądu  $I_{Pt1000}$  przepływającego przez czujnik mierzono za pomocą multimetrów UT51. Przepływ prądu  $I_{Pt1000}$  o wartości  $100 \mu\text{A}$  (wartość zalecana przez producenta [104]) wymuszano za pomocą źródła prądowego w układzie Howlanda. Przepływ prądu o takim natężeniu nie powoduje samonagrzewania czujnika Pt1000, co pokazano na termogramach przedstawionych na rysunku 39.

a)  $32,5 \mu\text{A}$

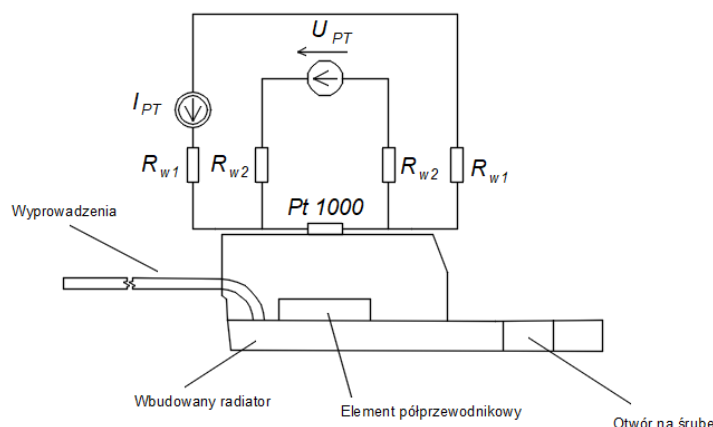


b)  $101,3 \mu\text{A}$



**Rysunek 39:** Czujnik Pt1000 przyklejony do obudowy diody FFSH10120A. Przez czujnik przepływa prąd o natężeniu a)  $32,5 \mu\text{A}$ , b)  $101,3 \mu\text{A}$ . W obu przypadkach zmierzona wartość temperatury obudowy czujnika wynosiła  $22,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pomiar wykonano na markerze namalowanym farbą Velvet Coating 811-21. Na termogramach są widoczne doprowadzenia o średnicy  $0,15$  mm.

Omówiony układ połączeń przedstawiono na rysunku 40.

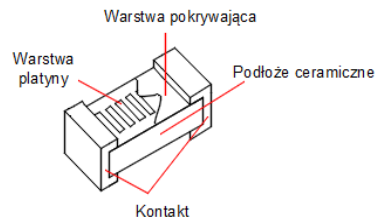


**Rysunek 40:** Położenie czujnika Pt1000 na obudowie urządzenia półprzewodnikowego wraz z doprowadzeniami:  $R_{w1}$ ;  $R_{w2}$  – rezystancja wyprowadzeń, Pt1000 – rezystancja czujnika Pt1000.

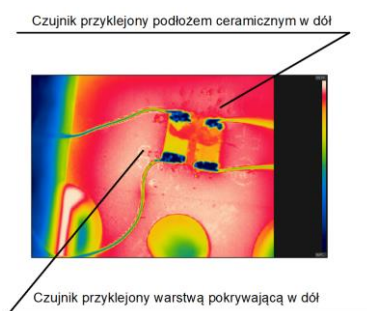
W ramach dalszych prac badawczych dodatkowo zweryfikowano wpływ sposobu zamontowania czujnika Pt1000 na poprawność uzyskanych wyników pomiaru temperatury. W tym celu na tej samej powierzchni (czarna przednia strona wykonana z EMC) diody FFSH10120A zamontowano dwa czujniki Pt1000. Jeden z czujników zamontowano podłożem

ceramicznym do dołu, natomiast drugi warstwą pokrywającą do dołu. Oba czujniki umieszczono w miejscu wskazanym na rysunku 41, natomiast wartości temperatury zmierzone za pomocą obu czujników zamieszczono w tabeli 1.

a) Konstrukcja czujnika Pt1000.



b) Termogram czujników Pt1000 przyklejonych do obudowy diody FFSH10120A.



c) Zdjęcie przyklejonych czujników Pt1000. Na czujnikach jest widoczny marker namalowany farbą Velvet Coating 811-21.



**Rysunek 41:** Umieszczenie dwóch czujników Pt1000 na obudowie TO-220.

**Tabela 1:** Zestawienie temperatur zmierzonych za pomocą czujnika Pt1000 przyklejonego poprawnie  $T_{pp}$  oraz czujnika Pt1000 przyklejonego odwrotnie  $T_{po}$ .  $P$  – moc wydzielona w elemencie półprzewodnikowym diody FFSH10120A.

L.p.	$P$	$T_{pp}$	$T_{po}$
	[W]	[°C]	[°C]
1	0,50	40,52	40,53
2	1,03	57,30	57,48
3	1,76	74,87	74,79
4	2,46	92,04	92,01
5	3,24	109,38	109,48

Po przeanalizowaniu wyników przedstawionych w tabeli 1 można zauważyć, że sposób przyklejenia czujnika Pt1000 nie wpływa na zmierzoną wartość temperatury. Za pomocą obu czujników przyklejonych do obudowy elementu półprzewodnikowego – warstwą platyny oraz warstwą ceramiczną (rysunek 41) otrzymano zbliżone wyniki (tabela 1). Na mierzoną wartość temperatury wpływa natężenie prądu przepływającego przez czujnik Pt1000.

### 3.4 Wyznaczenie temperatury elementu półprzewodnikowego

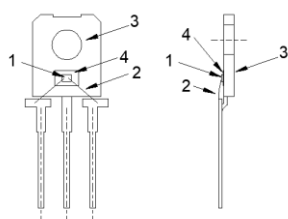
Drugi etap pośredniego termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego polega na wyznaczeniu jego temperatury  $T_j$  na podstawie temperatury obudowy  $T_c$ . Wyznaczenie zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego i temperaturą obudowy urządzenia półprzewodnikowego wymagało przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych, do których wykorzystano Metodę Elementów Skończonych (MES). Z kolei użycie tej metody wymagało stworzenia trójwymiarowych modeli badanych urządzeń

półprzewodnikowych. Do wykonania tych modeli konieczna była znajomość wymiarów poszczególnych fragmentów urządzeń półprzewodnikowych oraz materiałów, z których te fragmenty wykonano. W trakcie analizy literatury nie znaleziono niezbędnych informacji o wymiarach wewnętrznych badanych urządzeń półprzewodnikowych. Z tego powodu postanowiono otworzyć obudowy i wykonać pomiary.

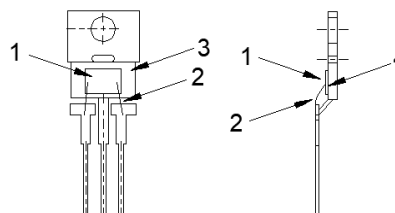
### 3.4.1 Struktura wewnętrzna urządzenia półprzewodnikowego

Otwarcie obudowy wymagało zdjęcia czarnej części (warstwy) wykonanej z EMC. Ten fragment obudowy usuwano po wcześniejszym jej wygrzaniu. W konsekwencji materiał ten zmieniał właściwości i możliwe było jego pokruszenie. Po skruszeniu warstwy EMC odsłonięto wewnętrzną strukturę urządzenia półprzewodnikowego (w tym elementy półprzewodnikowe i fragmenty wewnętrznych połączeń), umożliwiając ich zwymiarowanie. Tym czynnościami poddano urządzenia umieszczone w obudowach TO-220 oraz TO-247. W trakcie prac poznano budowę wewnętrzną tranzystora krzemowego IRF 9640 (obudowa TO-220-3), tranzystora C2M0280120 wykonanego na bazie węgliku krzemu (obudowa TO-247-3), diody FFSH 10120A wykonaną na bazie węgliku krzemu (obudowa TO-247-2) oraz element kaskadowy TP90H180PS wykonany na bazie krzemu i azotku galu (obudowa TO-220-3). Wewnętrzną budowę urządzeń półprzewodnikowych (po zdjęciu warstwy EMC) pokazano na rysunkach 42 i 43.

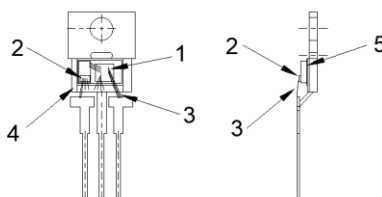
a) TO-220



b) TO-247



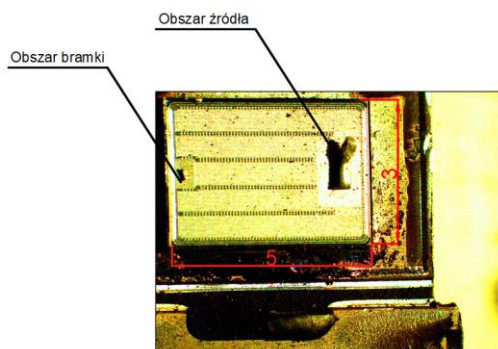
**Rysunek 42:** Widok urządzeń półprzewodnikowych w obudowie TO-220 (a) i TO-247 (b) po zdjęciu warstwy EMC; 1 – element półprzewodnikowy, 2 – druciki łączące element półprzewodnikowy z wyprowadzeniami, 3 – metalowa część obudowy, 4 – warstwa smaru.



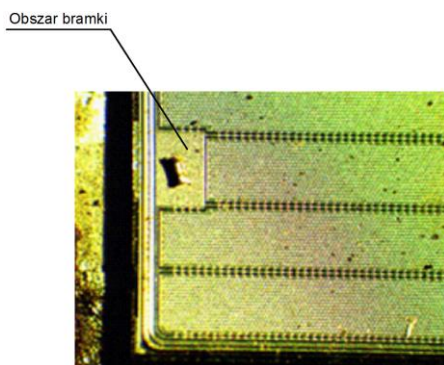
**Rysunek 43:** Widok urządzenia półprzewodnikowego zawierającego kaskadę tranzystor MOSFET wykonany z krzemu i tranzystora JFET wykonany z azotku galu po usunięciu warstwy EMC; 1 – element półprzewodnikowy wykonany z krzemu, 2 – element półprzewodnikowy wykonany z węgliku krzemu, 3 – połączenia pomiędzy elementami półprzewodnikowymi i wyprowadzeniami, 4 – metalowa część obudowy, 5 – miedziane płytki.

Do wykonania pomiarów odsłoniętych elementów półprzewodnikowych użyto mikroskopu MOTICAM 3.0 kalibrowanego za pomocą szkiełka kalibracyjnego z podziałką 0,1 mm. Wymiary elementów półprzewodnikowych różniły się w zależności od materiału, z którego zostały wykonane. Widok elementów półprzewodnikowych zarejestrowanych w trakcie pomiarów pokazano na rysunku 44 - 46.

a) Widok obszaru źródła (po prawej) i bramki (po lewej)



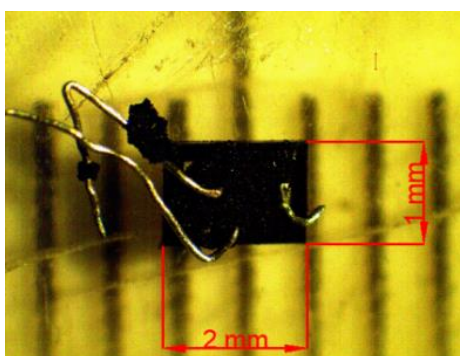
b) Obszar bramki tranzystora IRF 9640



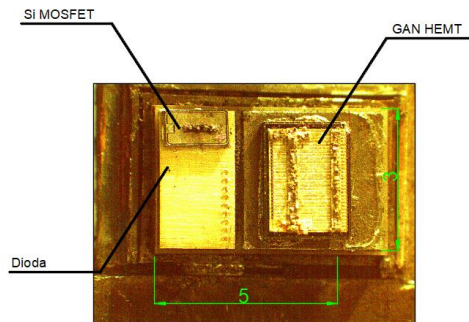
c) Połączenie pomiędzy obszarem źródła tranzystora IRF 9640 i jednym z wyprowadzeń urządzenia półprzewodnikowego (widok przed uszkodzeniem drutu)



**Rysunek 44:** Widok elementu półprzewodnikowego tranzystora IRF 9640.



**Rysunek 45:** Widok elementu półprzewodnikowego tranzystora C2M0280120 wykonanego na bazie SiC. W tle dodano płytkę wzorcową z rastrem 1 mm. Czarny fragment w centralnej części zdjęcia jest elementem półprzewodnikowym. Przed zniszczeniem obudowy, widoczne druciki łączyły element półprzewodnikowy z wyprowadzeniami urządzenia półprzewodnikowego.



**Rysunek 46:** Widok elementów półprzewodnikowych kaskady TP90H180PS. Po prawej widoczny GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) po lewej stronie widoczny tranzystor MOSFET wykonany na bazie Si.

Dokonano również pomiaru średnicy drutów łączących elementy półprzewodnikowe z wyprowadzeniami urządzeń półprzewodnikowych oraz średnicy połączeń pomiędzy elementami półprzewodnikowymi – tabela 2.

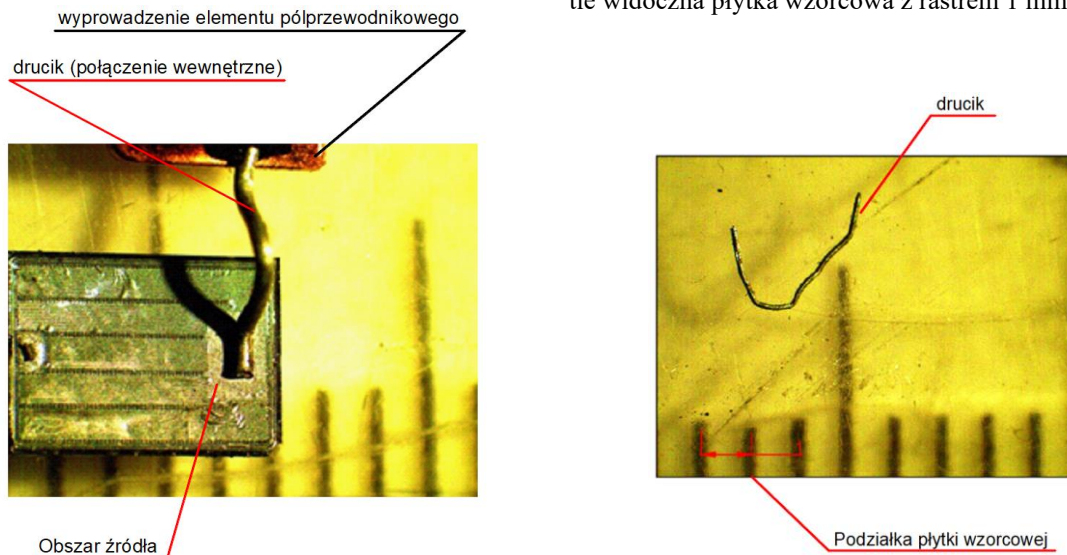
**Tabela 2:** Zestawienie średnic drucików znajdujących się we wnętrzach obudów urządzeń półprzewodnikowych.

Element	Średnica drucików	uwagi
IRF 9640	$\Phi = 0,1$ oraz $\Phi = 0,4$ mm	
IRF 9540	$\Phi = 0,1$ oraz $\Phi = 0,4$ mm	
C2M0280120	$\Phi = 0,11$ mm	wszystkie druciki
FFSH 10120A	$\Phi = 0,34$ mm	wszystkie druciki
TP90H180PS	$\Phi = 0,06$ mm	wszystkie druciki

Na rysunku 47 i 48 pokazano połączenia wewnętrzne IRF 9640 oraz TP90H180PS.

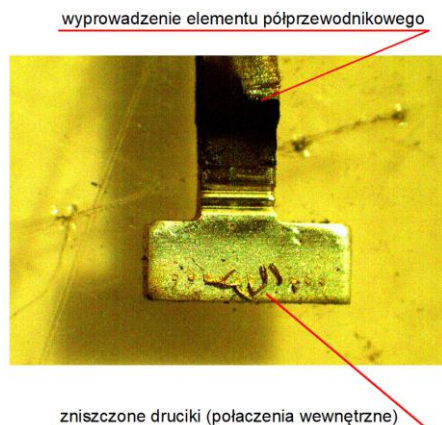
a) Drucik pomiędzy obszarem źródła i wyprowadzeniem urządzenia półprzewodnikowego.

b) Urwany drucik, który łączył obszarem bramki i wyprowadzenia urządzenia półprzewodnikowego. W tle widoczna płytka wzorcowa z rastrem 1 mm.



**Rysunek 47:** Widok połączeń wewnątrz obudowy tranzystora IRF 9640 (po uszkodzeniu obudowy).

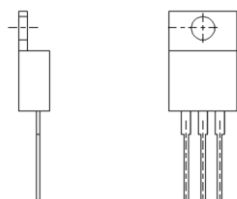




**Rysunek 48:** Widok pozostałości połączeń pomiędzy wyprowadzeniem i strukturą wewnętrzną urządzenia półprzewodnikowego TP90H180PS.

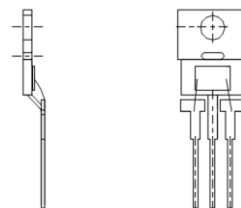
W każdym z otwartych urządzeń element półprzewodnikowy był umieszczony na metalowym fragmencie obudowy (radiatorze wewnętrznym) wykonanym z bielonej miedzi. Pomiedzy elementem półprzewodnikowym i radiatorem znajdowała się cienka warstwa smaru o grubości (0,05 mm). Grubość warstwy EMC (Epoxy Mould Compoud) pomiędzy elementem półprzewodnikowym a górną powierzchnią obudowy wynosiła 2,90 mm. Strukturę wewnętrzną poszczególnych urządzeń półprzewodnikowych przedstawiono na rysunkach 49 - 52.

a) Widok zewnętrzny.



5 mm

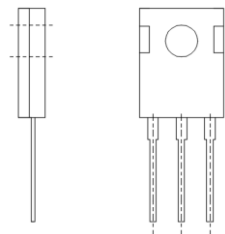
b) Struktura wewnętrzna.



5 mm

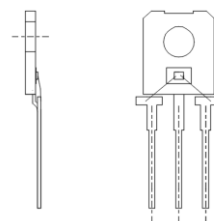
**Rysunek 49:** Tranzystory IRF 9640 i IRF 9540 w obudowie TO-220-3 z widocznym elementem półprzewodnikowym.

a) Widok zewnętrzny.



5 mm

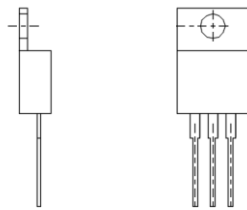
b) Struktura wewnętrzna.



5 mm

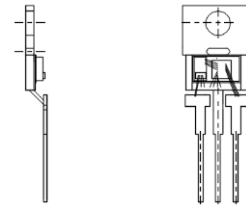
**Rysunek 50:** Tranzystor C2M0280120 w obudowie TO-247-3 z widocznym elementem półprzewodnikowym.

a) Widok zewnętrzny.



5 mm

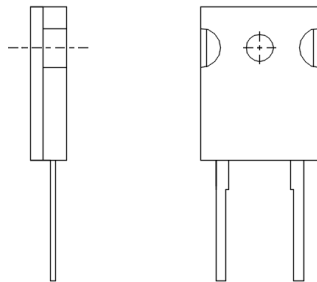
b) Struktura wewnętrzna



5 mm

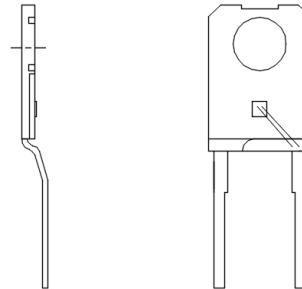
**Rysunek 51:** Tranzystor TP90H180PS w obudowie TO-220-3 z widocznym elementem półprzewodnikowym.

a) Widok zewnętrzny.



5 mm

b) Struktura wewnętrzna.



5 mm

**Rysunek 52:** Dioda FFSH10120A w obudowie TO-220-3 z widocznym elementem półprzewodnikowym.

Do wykonania symulacji MES konieczne jest wyznaczenie wartości współczynników konwekcji  $\alpha_k$ , które określono na podstawie (36)-(42). Program Solidworks wykorzystany do obliczeń symulacyjnych nie wymaga wprowadzania wartości współczynnika radiacji. Wartość ta jest wyznaczana w programie na podstawie wprowadzanych do modelu wartości  $\varepsilon$ . W zależności od materiału powierzchni wartość  $\varepsilon$  wynosiła od 0,4 (bielone części miedziane) do 0,95 (przednia część obudowy pokryta EMC). W celu wyznaczenia rozkładu temperatur w analizowanych obudowach elementów półprzewodnikowych do poszczególnych składników modelu należało przypisać materiał oraz związaną z nim wartość współczynnika przewodzenia ciepła  $k$ . Wprowadzone wartości  $\alpha_k$  oraz  $k$  przedstawiono w tabelach 3-7.

**K. Dziarski** Termowizyjne obserwacje elementów półprzewodnikowych

**Tabela 3:** Specyfikacja składników struktury wewnętrznej diod FFSH102A.

Składnik struktury wewnętrznej	Material	FFSH10120A dioda 1		FFSH10120A dioda 2		FFSH10120A dioda 3	
		$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]
Czarna część obudowy	EME 590	0,25	9,51	0,25	14,27	0,25	11,23
Tyłna część obudowy	Miedź	400	9,39	400	14,31	400	12,22
Element półprzewodnikowy	Krzem, Węgiel krzemu, Azotek galu	150	-	150	-	150	-
Wyprowadzenie lewe	Miedź	400	9,51	400	14,27	400	17,47
Wyprowadzenie prawe	Miedź	400	9,51	400	14,27	400	17,47
Połączenia wewnętrzne	Miedź	400	-	400	-	400	17,47
Smar	Żywica melaminowa	0,20	-	0,90	-	0,90	-
Moc wydzielona na złączu $P_j$ [W]		0,51		1,76		4,52	
Temperatura powietrza $T_a$ [°C]		20		20		20	

**Tabela 4:** Specyfikacja składników struktury wewnętrznej tranzystorów C2M0280120.

Składnik struktury wewnętrznej	Material	C2M0280120 tranzystor 1		C2M0280120 tranzystor 2		C2M0280120 tranzystor 3	
		$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]
Czarna część obudowy	EME 590	0,25	11,23	0,25	18,39	0,25	19,42
Tyłna część obudowy	Miedź	400	12,22	400	19,58	400	20,75
Element półprzewodnikowy	Krzem, Węgiel krzemu, Azotek galu	150	-	150	-	150	-
Wyprowadzenie lewe	Miedź	400	17,47	400	24,95	400	26,59
Wyprowadzenie prawe	Miedź	400	17,47	400	24,95	400	26,59
Połączenia wewnętrzne	Miedź	400	17,47	400	24,95	400	26,59
Smar	Żywica melaminowa	0,20	-	0,20	-	0,20	-
Moc wydzielona na złączu $P_j$ [W]		0,17		2,12		2,88	
Temperatura powietrza $T_a$ [°C]		20		20		20	



**K. Dziarski** Termowizyjne obserwacje elementów półprzewodnikowych

**Tabela 5:** Specyfikacja składników struktury wewnętrznej kaskad TP90H18PS.

Składnik struktury wewnętrznej	Material	TP90H18PS kaskada 1		TP90H18PS kaskada 2		TP90H18PS kaskada 3	
		$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]
Czarna część obudowy	EME 590	0,25	8,39	0,25	10,31	0,25	10,98
Tyłna część obudowy	Miedź	400	16,21	400	20,78	400	21,98
Element półprzewodnikowy	Krzem, Węglik krzemu, Azotek galu	150	-	150	-	150	-
Wyprowadzenie lewe	Miedź	400	19,67	400	24,95	400	26,35
Wyprowadzenie prawe	Miedź	400	19,67	400	24,95	400	26,35
Połączenia wewnętrzne	Miedź	400	19,67	400	24,95	400	26,35
Smar	Żywica melaminowa	0,20	-	0,20	-	0,20	-
Moc wydzielona na złączu $P_j$ [W]		0,41		1,14		1,54	
Temperatura powietrza $T_a$ [°C]		20		20		20	

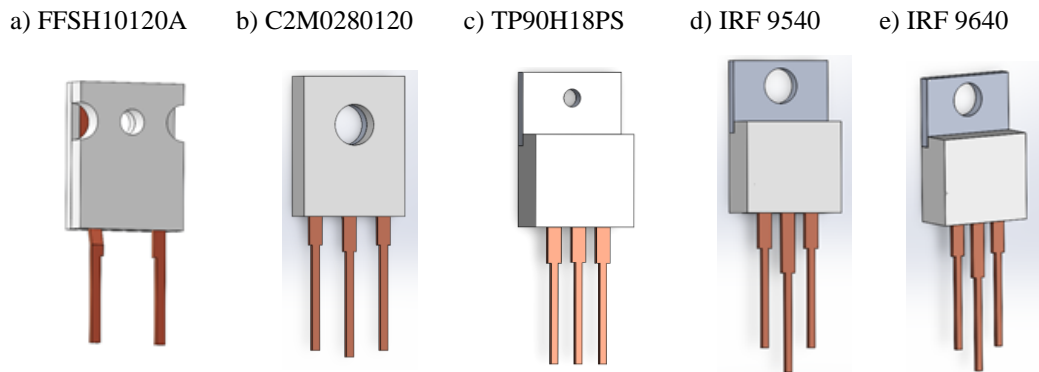
**Tabela 6:** Specyfikacja składników struktury wewnętrznej tranzystorów IRF9640.

Składnik struktury wewnętrznej	Material	IRF 9640 tranzystor 1		IRF 9640 tranzystor 2		IRF 9640 tranzystor 3	
		$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]
Czarna część obudowy	EME 590	0,25	12,75	0,25	18,91	0,25	22,61
Tyłna część obudowy	Miedź	400	18,25	400	18,85	400	34,41
Element półprzewodnikowy	Krzem, Węglik krzemu, Azotek galu	150	-	150	-	150	-
Wyprowadzenie lewe	Miedź	400	22,85	400	27,05	400	30,11
Wyprowadzenie prawe	Miedź	400	22,85	400	27,05	400	30,11
Połączenia wewnętrzne	Miedź	400	22,85	400	27,05	400	30,11
Smar	Żywica melaminowa	0,20	-	0,20	-	0,20	-
Moc wydzielona na złączu $P_j$ [W]		0,16		1,30		2,95	
Temperatura powietrza $T_a$ [°C]		20		20		20	

Tabela 7. Specyfikacja składników struktury wewnętrznej tranzystorów IRF9540.

Składnik struktury wewnętrznej	Material	IRF 9540 tranzystor 1		IRF 9540 tranzystor 2		IRF 9540 tranzystor 3	
		$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]	$k$ [W/m · k]	$\alpha_k$ [-]
Czarna część obudowy	EME 590	0,25	15,45	0,25	19,50	0,25	22,45
Tylna część obudowy	Miedź	400	23,35	400	29,45	400	32,65
Element półprzewodnikowy	Krzem, Węgiel krzemu, Azotek galu	150	-	150	-	150	-
Wyprowadzenie lewe	Miedź	400	24,95	400	28,65	400	31,40
Wyprowadzenie prawe	Miedź	400	24,95	400	28,65	400	31,40
Połączenia wewnętrzne	Miedź	400	24,95	400	28,65	400	31,40
Smar	Żywica melaminowa	0,20	-	0,20	-	0,20	-
Moc wydzielona na złączu $P_j$ [W]		0,39		1,19		2,42	
Temperatura powietrza $T_a$ [°C]		20		20		20	

Na podstawie pozyskanych informacji o strukturze urządzeń elektronicznych zbudowano ich trójwymiarowe modele, których widok pokazano na rysunku 53.



**Rysunek 53:** Trójwymiarowe modele wybranych urządzeń elektronicznych

### 3.4.2 Rozkład temperatury w obudowach urządzeń półprzewodnikowych

Do wyznaczenia rozkładu temperatury w obudowach urządzeń półprzewodnikowych można wykorzystać Metodę Elementów Skończonych, która polega na podziale analizowanego fragmentu obudowy na skończoną ilość mniejszych brył o określonym kształcie. W wierzchołkach powstałych brył znajdują się węzły, w których przechowywana jest informacja o temperaturze. Wartości temperatury w niektórych węzłach (np. znajdujących się na fragmencie obudowy diody, który został podzielony) są zadane jako warunek brzegowy. Znając właściwości termiczne materiału, z którego wykonano analizowany fragment obudowy, wartości współczynników radiacji i konwekcji oraz odległości pomiędzy węzłami, można wyznaczyć rozkład temperatur w obudowie.

Do wyznaczenia rozkładu temperatur w urządzeniach półprzewodnikowych wykorzystano oprogramowanie Solidworks 2020 SP05, które wykorzystuje MES. W programie tym stworzony model elementu półprzewodnikowego dzielony jest na czworościenne elementy skończone. Długość krawędzi tych elementów jest określana przez użytkownika. Wierzchołki czworościanów są nazywane węzłami. Im krótsza jest krawędź czworościanu, tym większa jest liczba węzłów i ich zagęszczenie. W konsekwencji wzrasta dokładność uzyskanego rozkładu temperatury. Z drugiej strony, im bardziej liczba węzłów wzrasta, tym więcej czasu potrzeba na obliczenie wartości w tych węzłach i uzyskanie pożądanego rozkładu temperatury.

Długość krawędzi oczka siatki postanowiono określić poprzez przeprowadzenie prac eksperymentalnych. Zmieniano ją w przypadku każdego elementu. Dla każdej zadanej długości krawędzi siatki przeprowadzano prace symulacyjne i notowano czas potrzebny do uzyskania rozkładu temperatury w analizowanej obudowie urządzenia półprzewodnikowego oraz weryfikowano otrzymywane rezultaty. Gdy uzyskiwaną (w wyniku prac symulacyjnych) wartość temperatury uznano za wartość ustaloną (wartość  $T_{Ci}$  nie różniła się od poprzedniej wartości  $T_{Ci-1}$  o  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dobrany rozmiar krawędzi oczka siatki uznawano za odpowiedni. W tabeli 8 zestawiono analizowane długości krawędzi oczek siatki oraz pozostałe parametry z nimi związane.

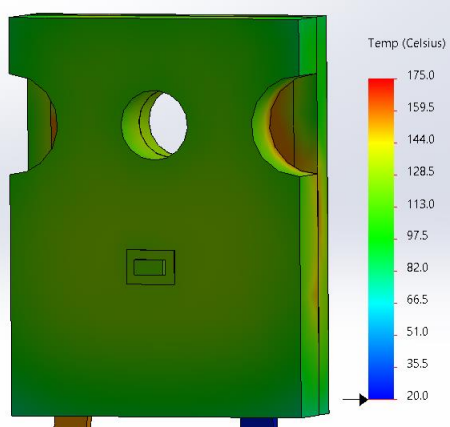
**Tabela 8:** Zestawienie różnic temperatur uzyskanych z symulacji  $T_{Ci}$  oraz czas trwania symulacji w zależności od wielkości krawędzi oczka siatki dla badanych urządzeń półprzewodnikowych.

L.p	Krawędź oczka siatki [mm]	Czas symulacji [s]	$T_{Ci} - T_{Ci-1}$ [°C]				
			FFSH10120A	C2M0280120	TP90H18PS	IRF9640	IRF9540
1	4,00	3	2,9	1,9	1,3	1,1	1,1
2	3,00	4	2,6	1,4	0,8	0,7	0,7
3	2,00	7	1,5	0,6	0,3	0,3	0,3
4	1,50	13	1,2	0,4	0,3	0,3	0,3
5	1,25	25	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
6	1,00	38	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
7	0,75	93	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
8	0,50	496	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

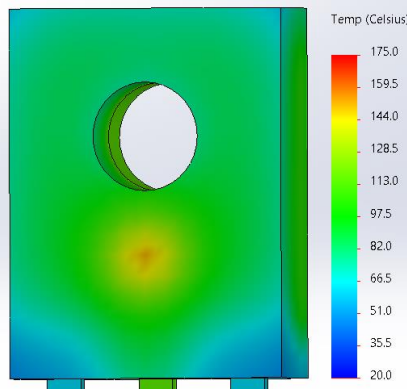
Po przeanalizowaniu danych z tabeli 8 można zauważyć, że wraz ze zmniejszeniem rozmiaru oczka siatki wzrasta czas potrzebny do wykonania symulacji. Jednocześnie można zaobserwować, że w przypadku niektórych długości krawędzi oczka siatki (punkty 6-8) pomimo wzrostu czasu potrzebnego do wykonania symulacji różnice pomiędzy otrzymanymi wartościami temperatur są niewielkie. Z tego powodu arbitralnie przyjęto długość oczka siatki z punktu nr 6.

Wykorzystując MES wyznaczono rozkłady temperatury w analizowanych obudowach elementów półprzewodnikowych. Wybrane przykłady uzyskanych rozkładów temperatury na powierzchni obudowy przedstawiono na rysunku 54.

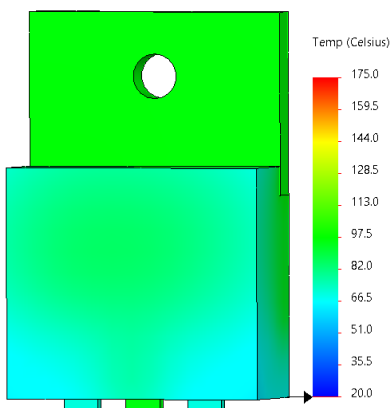
a) FFSH10120A dla  $P_j = 4,52$  W



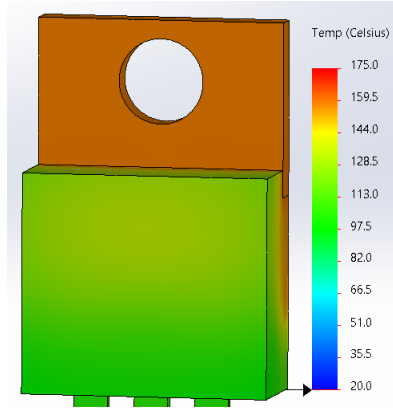
b) C2M0280120 dla  $P_j = 4,02$  W



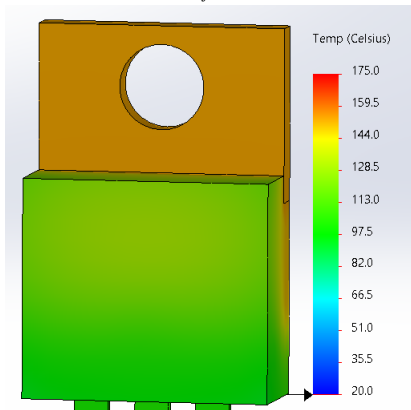
c) TP90H18PS dla  $P_j = 1,54$  W



d) IRF 9540 dla  $P_j = 2,95$  W

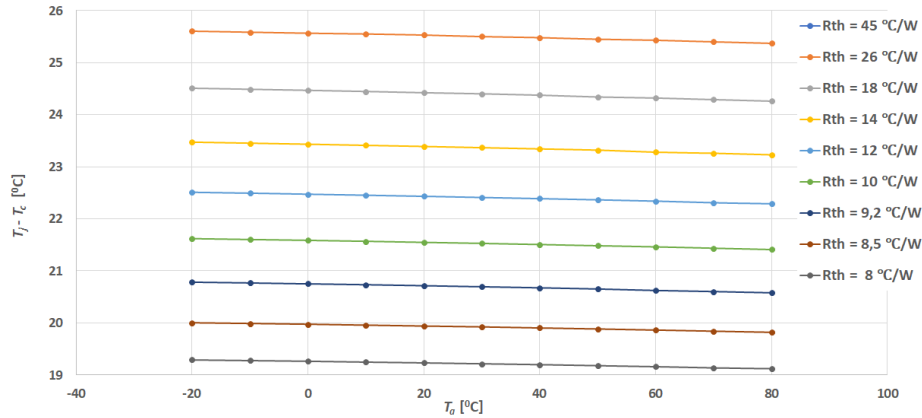


e) IRF 9640 dla  $P_j = 2,42$  W

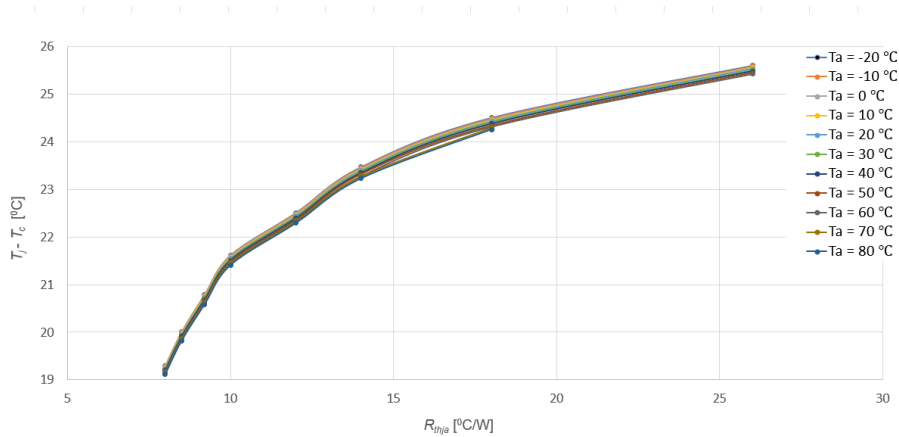


**Rysunek 54:** Rozkład temperatury na powierzchni obudowy wybranych urządzeń elektronicznych

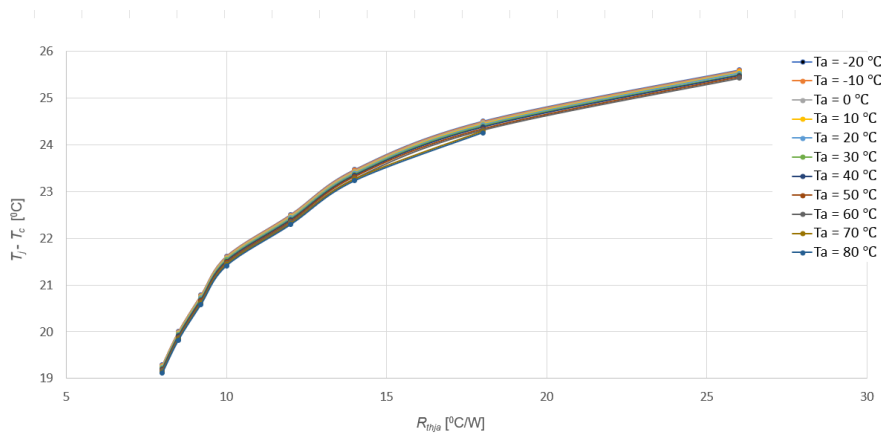
Z wykorzystaniem pozyskanych wyników prac symulacyjnych wyznaczono zależność  $T_j - T_C = f(T_a)$  dla różnych wartości rezystancji termicznej  $R_{thj-a}$  (rysunek 55), zależność  $T_j - T_C = f(R_{thj-a})$  dla różnych wartości  $T_a$  (rysunek 56) oraz zależność  $T_j - T_C = f(R_{thj-a})$  dla trzech wybranych wartości  $T_a$  i mocy  $P_j$  (rysunek 57).



**Rysunek 55:** Zależność  $T_j - T_C = f(T_a)$ , dla wybranych wartości rezystancji termicznej  $R_{thj-a}$ . Wartość  $P_j$  ustawiona w trakcie symulacji wynosiła 4,52 W. artość ustawionej mocy wybrano arbitralnie jako najwyższa wartość mocy uwzględnioną w przeprowadzonych pracach (bez uwzględnienia radiatorów).



**Rysunek 56:** Zależność  $T_j - T_C = f(R_{thj-a})$  dla wybranych wartości  $T_a$ . Wartość  $P_j$  ustawiona w trakcie symulacji wynosiła 4,52 W. Wartość ustawionej mocy wybrano arbitralnie jako najwyższa wartość mocy uwzględnioną w przeprowadzonych pracach (bez uwzględnienia radiatorów).



**Rysunek 57:** Zależność  $T_j - T_C = f(R_{thj-a})$  dla wybranych trzech wartości temperatury otoczenia  $T_a$  i trzech wybranych wartości mocy wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym  $P_j$ .

### **3.5 Weryfikacja termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego oraz otrzymanych zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego i temperaturą obudowy urządzenia półprzewodnikowego**

Otrzymane w wyniku obliczeń symulacyjnych zależności pomiędzy temperaturą  $T_j$  elementu półprzewodnikowego i temperaturą  $T_C$  obudowy urządzenia półprzewodnikowego poddano weryfikacji. Uznano, że wyniki otrzymane na podstawie prac symulacyjnych są poprawne tylko wtedy, gdy znajdują się w zakresie wyznaczonym przez sumę granicznych błędów pomiaru  $T_C$  otrzymanych za pomocą kamery termowizyjnej oraz czujnika Pt1000. Wartość temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego uzyskaną w wyniku prac symulacyjnych porównano z temperaturą obudowy zmierzoną termowizyjnie oraz z temperaturą zmierzoną za pomocą przyklejonego czujnika Pt1000. Z kolei temperaturę elementu półprzewodnikowego uzyskaną za pomocą MES porównano z wartością  $T_j$  zmierzoną za pomocą metody elektrycznej. Wykorzystanie metody elektrycznej wymagało wyznaczenia zależności pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego  $T_j$  i napięcia przewodzenia.

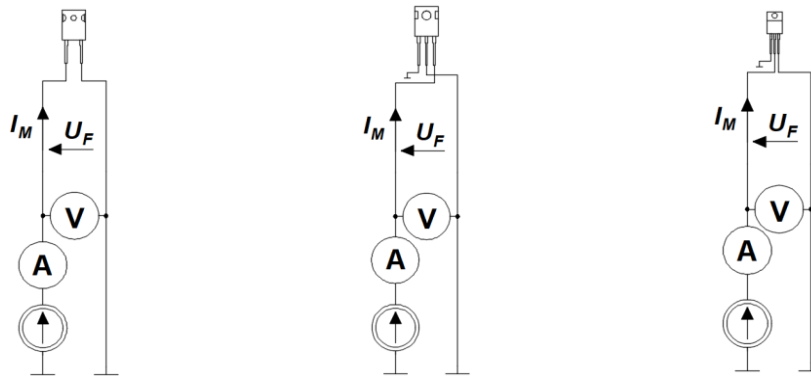
Zależność pomiędzy  $T_j$  i TSP wyznaczono wykorzystując metodę stałej wartości prądu (metodę wykorzystującą tryb ciągły). W konsekwencji możliwe było skonstruowanie prostszego (mniej złożonego) układu pomiarowego. Zastosowanie tej metody wymagało doboru odpowiedniej wartości prądu  $I_M$  przepływającego przez element półprzewodnikowy, dla której efekt samonagrzewania tego elementu nie spowoduje obarczenia wyznaczonej wartości  $T_j$  dużym błędem.

Wartość  $I_M$  dobierano doświadczalnie dla każdego z badanych urządzeń półprzewodnikowych na stanowisku przedstawionym w rozdz. 3.3.1. W tym celu zwiększano wartość natężenia prądu przepływającego przez urządzenie półprzewodnikowe i mierzono spadek napięcia pomiędzy wybranymi zaciskami  $U_M$ . Jednocześnie za pomocą kamery termowizyjnej mierzono temperaturę obudowy tego urządzenia półprzewodnikowego. Obserwowano jej przednią część pokrytą EMC, ponieważ ten fragment cechuje się wysoką wartością  $\varepsilon$  oraz znajduje się bezpośrednio nad elementem półprzewodnikowym. Wartość prądu zwiększano od 0 do wartości, dla której termowizyjnie wykryto przyrost temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego względem stanu początkowego. Wartość prądu, przy której zarejestrowano wzrost temperatury obserwowanej powierzchni była wartością  $I_M$ . Moc  $P_M$  wydzieloną w elemencie półprzewodnikowym w chwili przepływu prądu  $I_M$  wyznaczono jako iloczyn  $U_M$  i  $I_M$ . Schematy połączeń przedstawiono na rysunku 58.

a) dioda FFSH10120A

b) tranzystor C2M02800120D

c) tranzystory IRF 9540,  
IRF 9640 i TP90H180PS



Rysunek 58: Schemat układu pomiarowego służącego do wyznaczenia wartości prądu  $I_M$

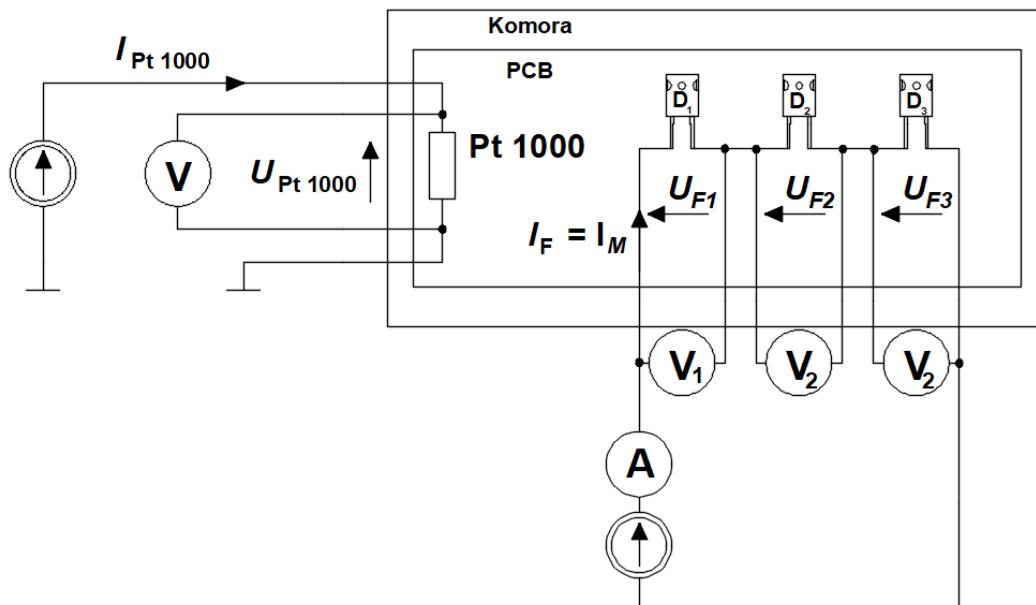
Zauważono, że w przypadku pracy bez zamontowanego radiatora, dla każdego z badanych urządzeń półprzewodnikowych wartość  $P_M$  jest mniejsza od 1% maksymalnej wartości mocy  $P_{MAX}$  możliwej do wydzielania w tym urządzeniu półprzewodnikowym, którą określono na podstawie danych katalogowych. Wyznaczone wartości prądu  $I_M$ , spadku napięcia  $U_M$ , mocy wydzielonej w urządzeniu półprzewodnikowym  $P_M$  w trakcie przepływu  $I_M$  oraz 1%  $P_{MAX}$  dla badanych urządzeń półprzewodnikowych przedstawiono w tabeli 9.

Tabela 9: Wyznaczone wartości prądu  $I_M$ , spadku napięcia  $U_M$ , mocy wydzielonej w urządzeniu półprzewodnikowym  $P_M$  w trakcie przepływu  $I_M$  oraz 1%  $P_{MAX}$  dla badanych urządzeń półprzewodnikowych.

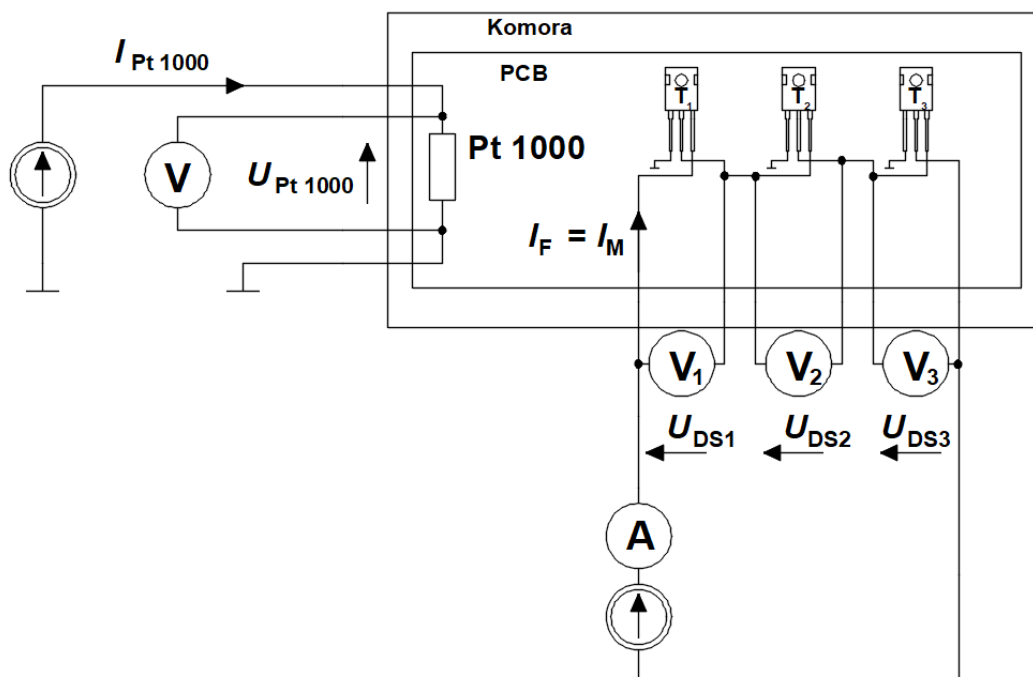
Badany element	$I_M$	$U_M$	$P_M$	1% $P_{MAX}$
	[A]	[V]	[W]	[W]
FFSH 10120A	0,036	1,01	0,040	0,05
C2M0280120	0,005	1,63	0,008	0,04
TP90H180PS	0,049	0,67	0,033	0,04
IRF 9640	0,100	1,57	0,157	0,03
IRF 9540	0,100	1,57	0,157	0,03

Po wyznaczeniu wartości  $I_M$  badane urządzenia półprzewodnikowe umieszczono w układzie pomiarowym służącym do wyznaczenia zależności pomiędzy TSP i  $T_j$ . Skonstruowany układ pomiarowy zawierał również źródło prądu i komorę klimatyczną, która umożliwiała zmianę wartości temperatury  $T_a$  w jej wnętrzu. Wartość  $T_a$  mierzono za pomocą czujnika Pt1000. Wartość prądu przepływającego przez Pt1000 wynosiła 100  $\mu$ A. Schematy układu pomiarowego dla każdego z badanych urządzeń półprzewodnikowych pokazano na rysunkach 59 – 61.

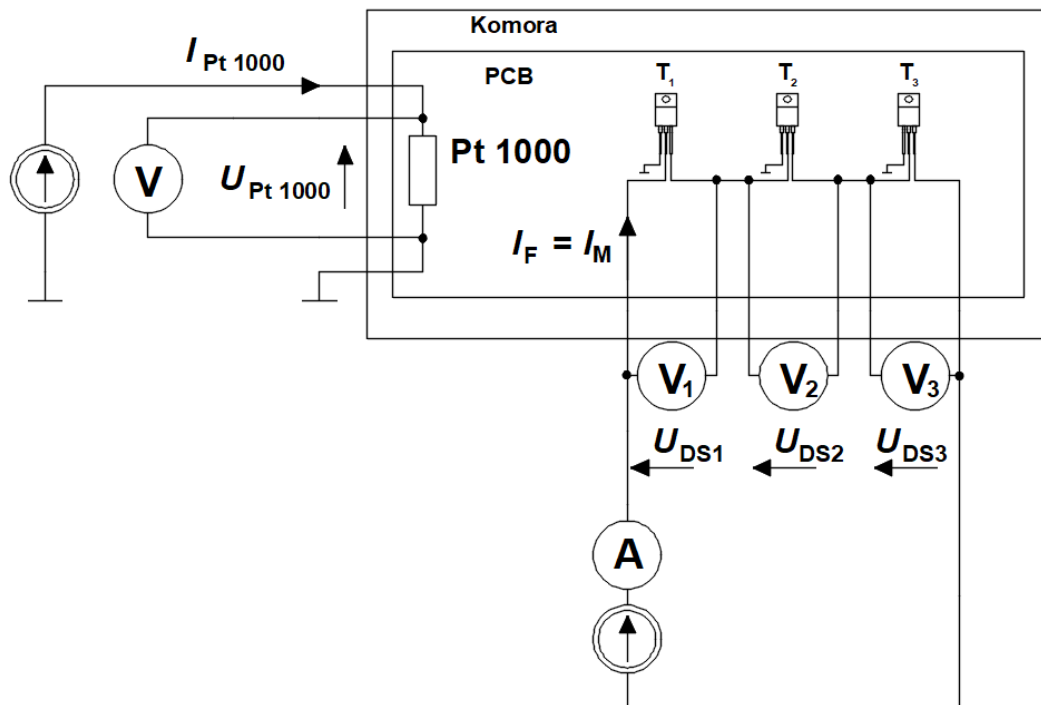




**Rysunek 59:** Schemat układu pomiarowego służącego do wyznaczenia zależności pomiędzy TSP (wybrano  $U_F$ ) i  $T_j$  diod FFSH10120A w obudowie TO-220.



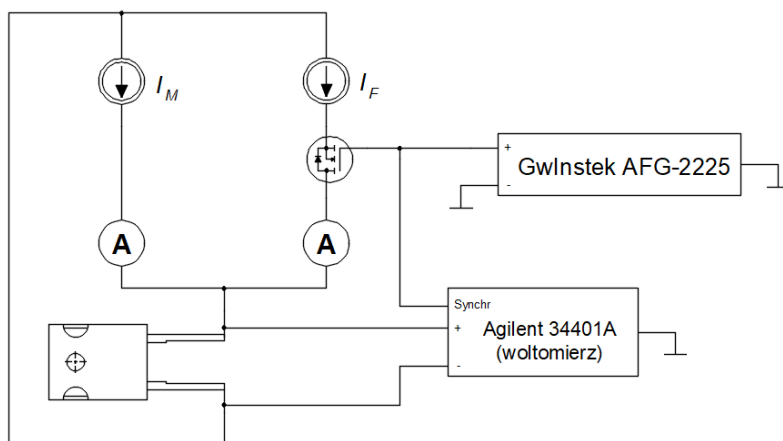
**Rysunek 60:** Schemat układu pomiarowego służącego do wyznaczenia zależności pomiędzy TSP (wybrano  $U_{DS}$ ) i  $T_j$  tranzystorów C2M02800120D w obudowie TO-247-3.



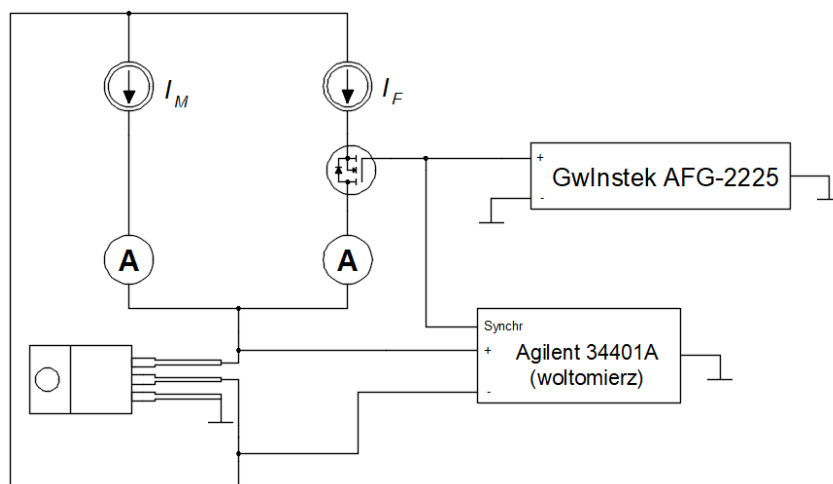
**Rysunek 61:** Schemat układu pomiarowego służącego do wyznaczenia zależności pomiędzy TSP (wybrano  $U_F$ ) i  $T_j$  tranzystorów IRF9540, IRF 9640 oraz TP90H180PS w obudowie TO-220.

Urządzenia półprzewodnikowe, połączone zgodnie ze schematami przedstawionymi na rysunkach 59 – 61, umieszczano w komorze klimatycznej i wymuszano przepływ prądu  $I_M$ . Wartość  $T_a$  zmieniano w zakresie od 20 °C do 180 °C z krokiem 10 °C. Dla każdej nastawy temperatury czekano odpowiednio długo, aby mierzona wartość TSP uległa ustaleniu. Uznano, że TSP ulega ustaleniu po około 40 minutach (zauważono, że po upływie tego czasu mierzone wartości TSP nie ulegają zmianie). Następnie odczytywano zmierzoną wartość TSP i zmieniano nastawę  $T_a$ .

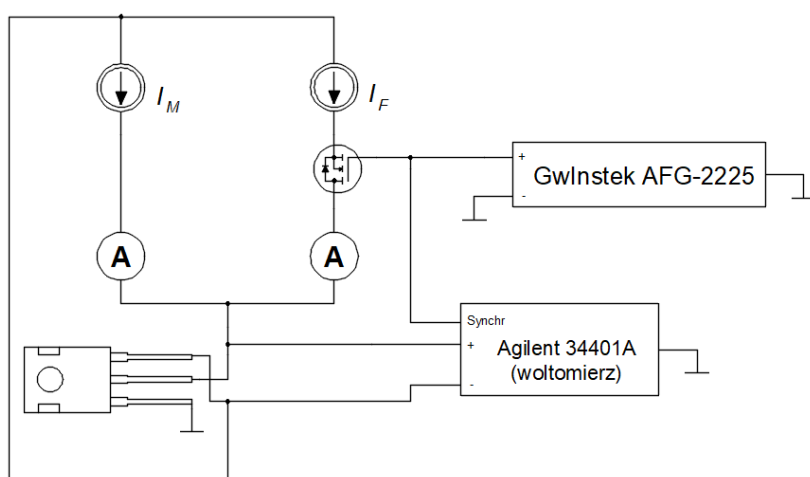
W celu zmierzenia temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$  za pomocą metody elektrycznej (na podstawie związku pomiędzy  $T_j$  i napięciem przewodzenia dla zadanej wartości prądu przewodzenia  $I_F$ ) badane urządzenia półprzewodnikowe połączone zgodnie ze schematami pokazanymi na rysunkach 62 – 64.



**Rysunek 62:** Schemat układu pomiarowego służącego do wyznaczenia temperatury elementu półprzewodnikowego za pomocą metody elektrycznej dla diody FFSH10120A.



**Rysunek 63:** Schemat układu pomiarowego służącego do wyznaczenia temperatury elementu półprzewodnikowego za pomocą metody elektrycznej dla tranzystorów IRF9540, IRF 9640 oraz TP90H180PS w obudowie TO-220.



**Rysunek 64:** Schemat układu pomiarowego służącego do wyznaczenia temperatury elementu półprzewodnikowego za pomocą metody elektrycznej dla tranzystora C2M02800120D.

Na początku pomiaru (w chwili  $t = 0$ ) przez badany element półprzewodnikowy (umieszczony w stanowisku przedstawionym w rozdziale 3.3.1) przepływał prąd  $I_F$ . Wartość  $I_F$

zmieniano arbitralnie z przyjętym krokiem od zera do wartości maksymalnej  $I_{Fmax}$  badanego elementu półprzewodnikowego. Wartość  $I_{Fmax}$  odczytywano z dokumentacji technicznej. W kolejnym kroku dokonywano przełączenia w układzie pomiarowym, zgodnie z którym przez badany element nie przepływał prąd  $I_F$ . Było to realizowane poprzez odpowiednie wysterowanie tranzystora (widocznego na schematach) sygnałem prostokątnym z generatora, którego wyjście podłączone było do bramki tego tranzystora. Sygnał z generatora wykorzystywano również do synchronizowania pomiaru napięcia przewodzenia.

W konsekwencji przez czas  $t = 20$  ms przez badany element półprzewodnikowy przepływał tylko prąd o natężeniu  $I_M$ . Założono, że w tym czasie wartość temperatury elementu półprzewodnikowego jest bliska temperaturze w chwili ustania przepływu prądu  $I_F$ . Gdy przez badany element półprzewodnikowy przepływał prąd  $I_M$  wykonywano pomiar spadku napięcia pomiędzy wybranymi wyprowadzeniami. Następnie za pomocą wyznaczonej zależności pomiędzy  $T_j$  i TSP wyznaczano temperaturę elementu półprzewodnikowego. Uznano, że temperatura elementu półprzewodnikowego uległa ustaleniu, gdy trzy kolejne pomiary spadku napięcia były takie same.

Wartości temperatury elementu półprzewodnikowego zmierzone za pomocą metody elektrycznej  $T_{je}$  porównano z wartościami temperatury uzyskanymi w wyniku prac symulacyjnych  $T_{js}$  i przedstawiono w tabeli 10.

**Tabela 10:** Zestawienie wartości temperatury wyznaczonych na podstawie prac symulacyjnych  $T_{js}$  z wartościami temperatury elementu półprzewodnikowego zmierzonymi za pomocą metody elektrycznej  $T_{je}$ . W pomiarach użyto elementy bez zamontowanego radiatora.

Badany element	$T_{js}$	$T_{je}$	$T_{js} - T_{je}$
	[°C]	[°C]	[°C]
FFSH10120A	44,9	44,3	0,6
	90,5	90,7	-0,2
	102,4	103,6	-1,2
C2M0280120	31,2	31,4	-0,2
	100,6	100,8	-0,2
	120,4	120,7	-0,3
TP90H180PS	46,2	46,3	-0,1
	81,8	82,1	-0,3
	101,3	101,6	-0,3
IRF 9640	37,1	37,2	-0,1
	84,9	85,2	-0,3
	150,8	151,2	-0,4
IRF 9540	52,9	53,2	-0,3
	96,7	97,1	-0,4
	150,5	150,7	-0,2

W dalszej części badań zweryfikowano wartości temperatur otrzymane w pracach symulacyjnych. Z tego powodu temperaturę obudowy wyznaczoną na podstawie prac symulacyjnych  $T_{CS}$  porównano z temperaturą obudowy zmierzoną za pomocą przyklejonego czujnika Pt1000  $T_{CP}$  oraz z termowizyjnym pomiarem temperatury obudowy elementu półprzewodnikowego  $T_{CC}$ . W przeprowadzonych pracach wykorzystano stanowisko przedstawione w 3.1.1. Umieszczenie czujników Pt1000 oraz markerów (namalowanych farbą Velvet Coating 811-21) pokazano na rysunku 38. Wartości  $T_{CS}$ ,  $T_{CP}$ ,  $T_{CC}$  uzyskane dla analizowanych urządzeń półprzewodnikowych zestawiono w tabelach 11 – 15.

**Tabela 11:** Zestawienie temperatur uzyskanych z symulacji  $T_{CS}$  z temperaturą zmierzoną za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{CC}$  oraz z temperaturą zmierzoną za pomocą czujnika Pt1000  $T_{CP}$  dla diody FFSH10120A.

Fragment obudowy	FFSH10120A								
	egzemplarz 1			egzemplarz 2			egzemplarz 3		
	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Czarna część obudowy	40,3	41,0	39,2	73,9	73,2	71,3	83,9	83,2	81,3
Tyłna część obudowy	44,2	44,5	43,9	82,8	83,2	82,2	92,8	93,2	92,2
Wyprowadzenie lewe	38,4	38,6	37,4	60,2	60,9	60,7	70,2	70,9	70,7
Wyprowadzenie prawe	42,0	40,9	40,2	68,2	68,9	68,8	78,2	78,9	78,8

**Tabela 12:** Zestawienie temperatur uzyskanych z symulacji  $T_{CS}$  z temperaturą zmierzoną za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{CC}$  oraz z temperaturą zmierzoną za pomocą czujnika Pt1000  $T_{CP}$  dla tranzystora C2M0280120.

Fragment obudowy	C2M0280120								
	egzemplarz 1			egzemplarz 2			egzemplarz 3		
	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Czarna część obudowy	27,7	29,3	27,8	76,5	77,3	76,5	90,1	91,6	90,4
Tyłna część obudowy	30,6	31,1	30,1	91,9	92,9	92,5	111,9	113,0	112,2
Wyprowadzenie lewe	28,8	31,2	27,9	65,7	66,9	66,6	79,8	80,2	79,7
Wyprowadzenie prawe	30,4	31,9	29,0	79,5	79,3	79,0	97,7	100,0	99,2

**Tabela 13:** Zestawienie temperatur uzyskanych z symulacji  $T_{CS}$  z temperaturą zmierzoną za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{CC}$  oraz z temperaturą zmierzoną za pomocą czujnika Pt1000  $T_{CP}$  dla tranzystora TP90H18PS.

Fragment obudowy	TP90H18PS								
	egzemplarz 1			egzemplarz 2			egzemplarz 3		
	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$	$T_{CS}$	$T_{CC}$	$T_{CP}$
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Czarna część obudowy	38,3	39,8	36,7	64,9	66,7	63,3	77,3	77,1	73,2
Tyłna część obudowy	45,9	49,4	48,4	97,7	97,7	98,5	117,8	117,7	117,3
Wyprowadzenie lewe	33,2	35,0	34,7	55,9	58,2	57,9	65,9	68,4	66,2
Wyprowadzenie prawe	41,2	39,0	39,3	69,7	70,5	69,8	81,3	80,0	79,7

**Tabela 14:** Zestawienie temperatur uzyskanych z symulacji  $T_{CS}$  z temperaturą zmierzoną za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{CC}$  oraz z temperaturą zmierzoną za pomocą czujnika Pt1000  $T_{CP}$  dla tranzystora IRF 9640.

Fragment obudowy	IRF 9640								
	egzemplarz 1			egzemplarz 2			egzemplarz 3		
	$T_{CS}$ [°C]	$T_{CC}$ [°C]	$T_{CP}$ [°C]	$T_{CS}$ [°C]	$T_{CC}$ [°C]	$T_{CP}$ [°C]	$T_{CS}$ [°C]	$T_{CC}$ [°C]	$T_{CP}$ [°C]
Czarna część obudowy	33,5	31,6	30,7	73,3	73,5	73,4	130,9	128,9	128,6
Tylna część obudowy	42,5	41,2	40,8	106,3	104,5	108,0	180,4	172,9	171,3
Wyprowadzenie lewe	49,5	47,2	46,7	69,4	72,7	72,1	99,8	101,0	100,5
Wyprowadzenie prawe	43,5	51,0	50,2	79,4	80,6	80,2	114,8	114,9	114,5

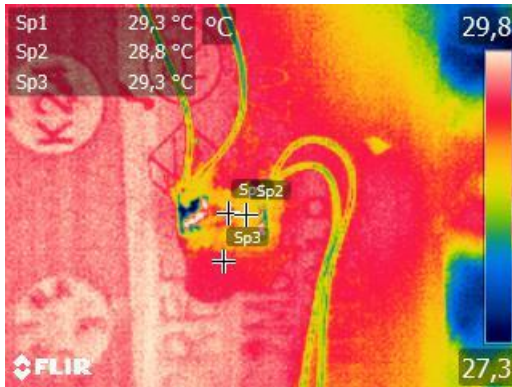
**Tabela 15:** Zestawienie temperatur uzyskanych z symulacji  $T_{CS}$  z temperaturą zmierzoną za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{CC}$  oraz z temperaturą zmierzoną za pomocą czujnika Pt1000  $T_{CP}$  dla tranzystora IRF 9540.

Fragment obudowy	IRF 9540								
	egzemplarz 1			egzemplarz 2			egzemplarz 3		
	$T_{CS}$ [°C]	$T_{CC}$ [°C]	$T_{CP}$ [°C]	$T_{CS}$ [°C]	$T_{CC}$ [°C]	$T_{CP}$ [°C]	$T_{CS}$ [°C]	$T_{CC}$ [°C]	$T_{CP}$ [°C]
Czarna część obudowy	46,1	44,3	43,0	81,9	80,3	77,9	127,2	128,0	123,2
Tylna część obudowy	92,1	90,6	89,7	141,7	115,7	113,6	170,1	167,8	166,3
Wyprowadzenie lewe	58,6	58,4	57,8	86,9	86,4	86,1	115,9	116,3	115,7
Wyprowadzenie prawe	64,3	65,0	63,9	95,2	97,1	97,7	133,3	133,1	132,9

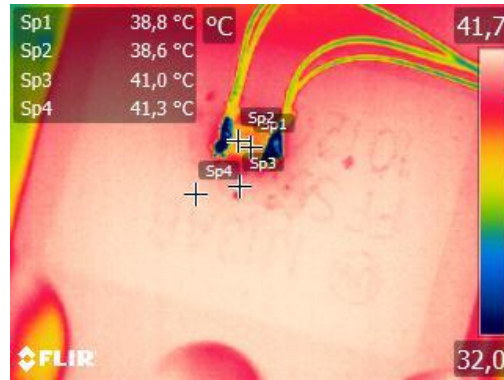
Przykładowe termogramy, które zarejestrowano w trakcie przeprowadzonych prac pokazano na rysunku 65.

## K. Dziarski Termowizyjne obserwacje elementów półprzewodnikowych

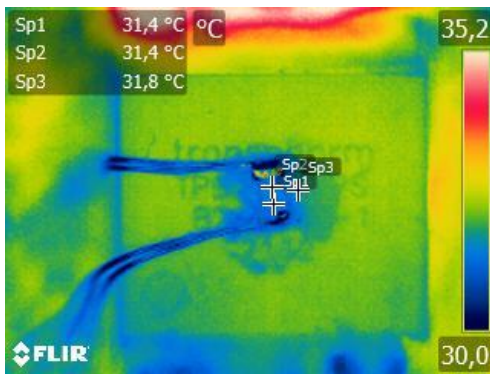
a) Termogram obudowy tranzystora C2M0280120 z przyklejonym czujnikiem Pt1000.



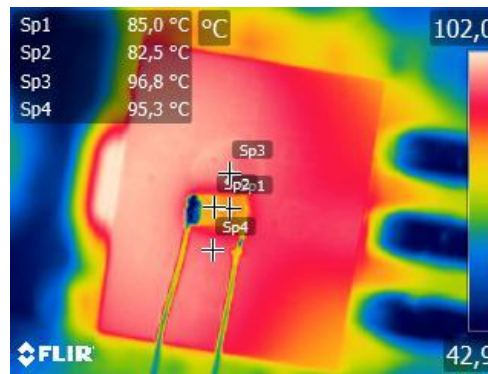
b) Termogram obudowy diody FFSH10120A z przyklejonym czujnikiem Pt1000.



c) Termogram obudowy tranzystora TP90H18PS z przyklejonym czujnikiem Pt1000.

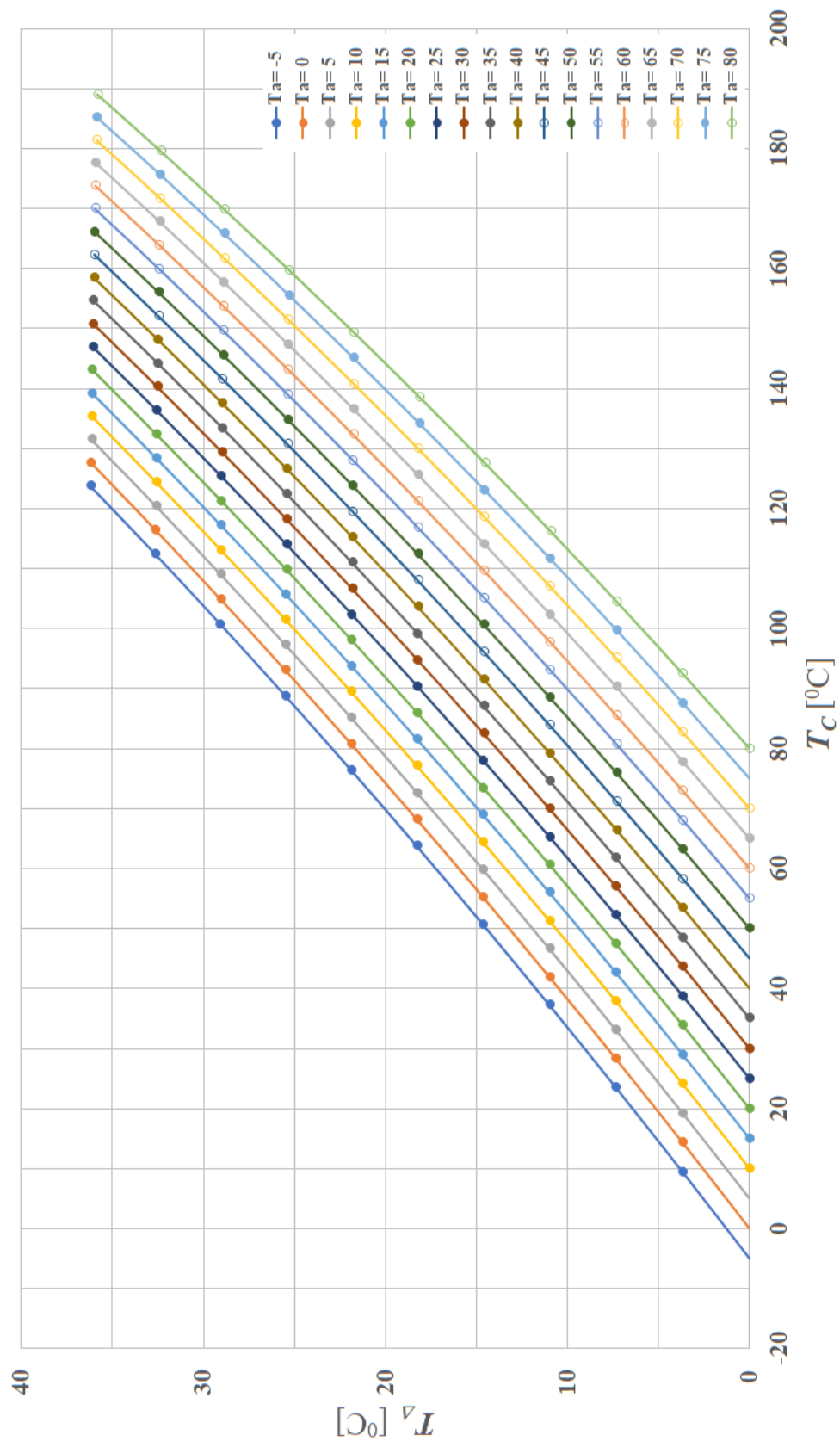


d) Termogram obudowy tranzystora IRF 9540 z przyklejonym czujnikiem Pt1000.



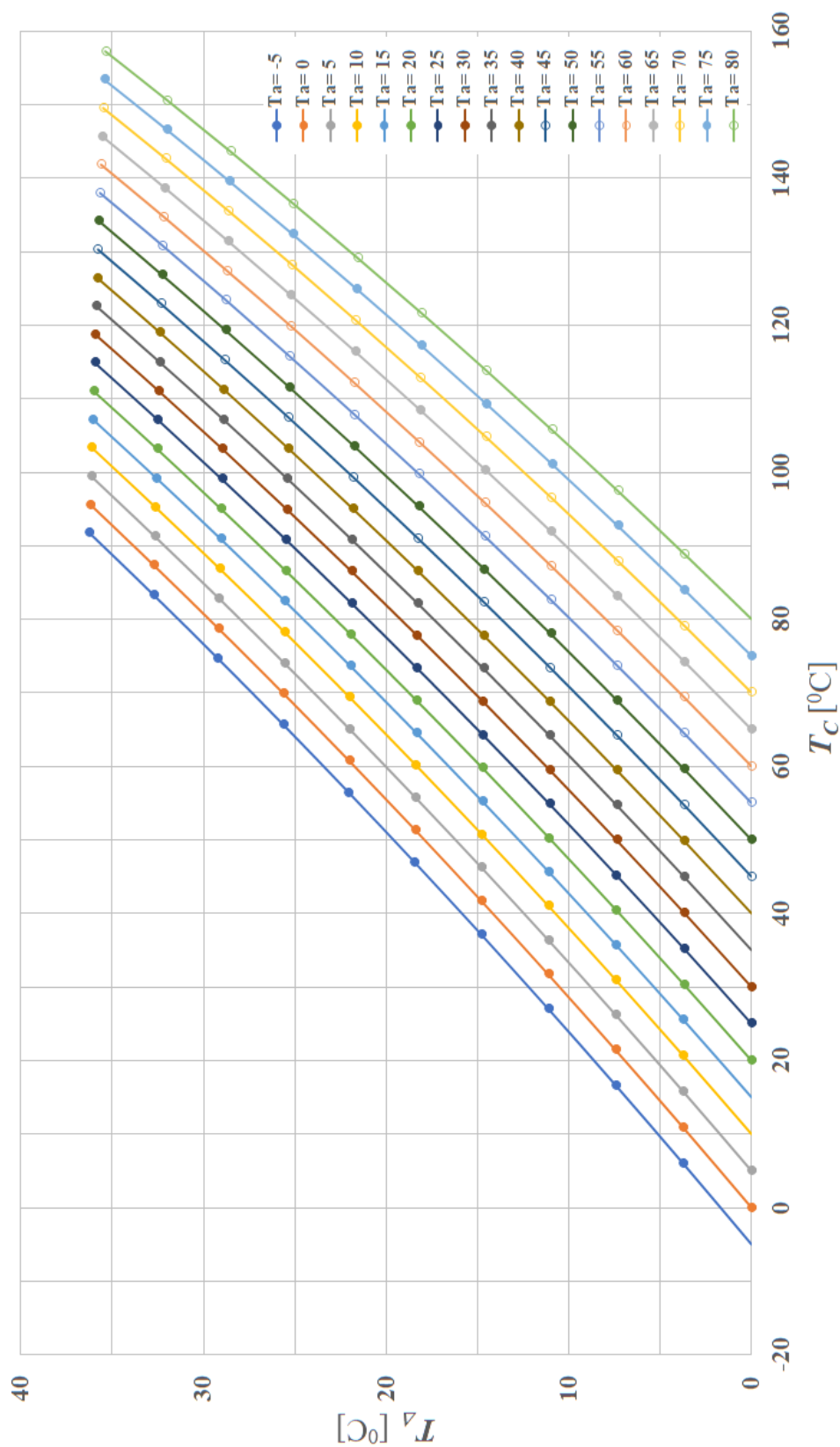
Rysunek 65: Przykładowe termogramy urządzeń półprzewodnikowych.

Po stwierdzeniu, że temperatura uzyskana za pomocą prac symulacyjnych  $T_{CS}$  jest zgodna z wartością temperatury zmierzonej za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{CC}$  oraz z wartością temperatury zmierzonej za pomocą czujnika Pt1000  $T_{CP}$  wyznaczono symulacyjnie zależności  $T_A = f(T_C)$  dla zmiennych wartości  $T_a$ . Wykorzystano w tym celu MES oraz wcześniej przygotowane modele (rysunek 50). Otrzymane zależności przedstawiono na rysunkach 66 – 70.

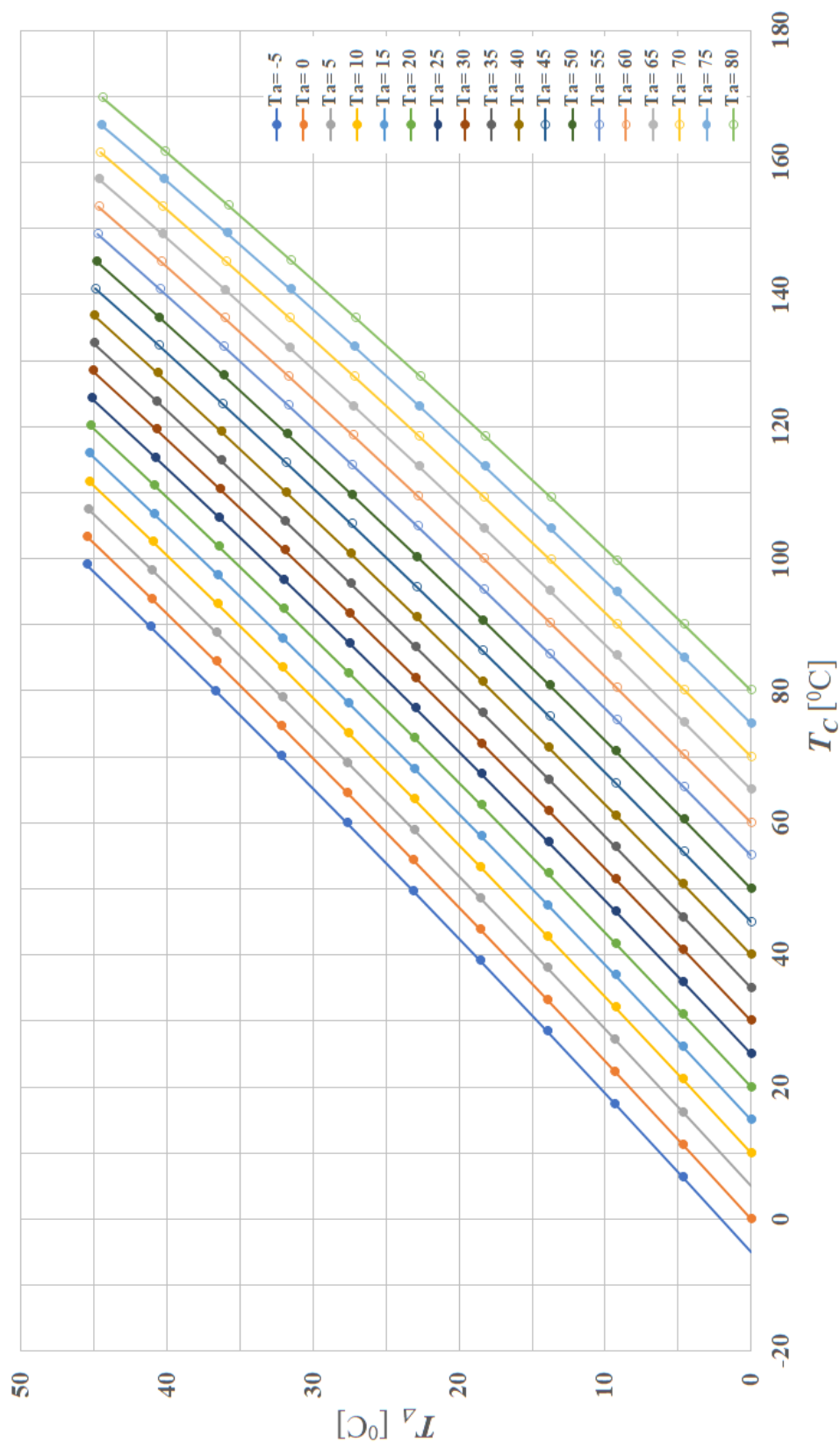


Rysunek 66: Zależności  $T_j = f(T_c)$  dla diody FFSH10120A.

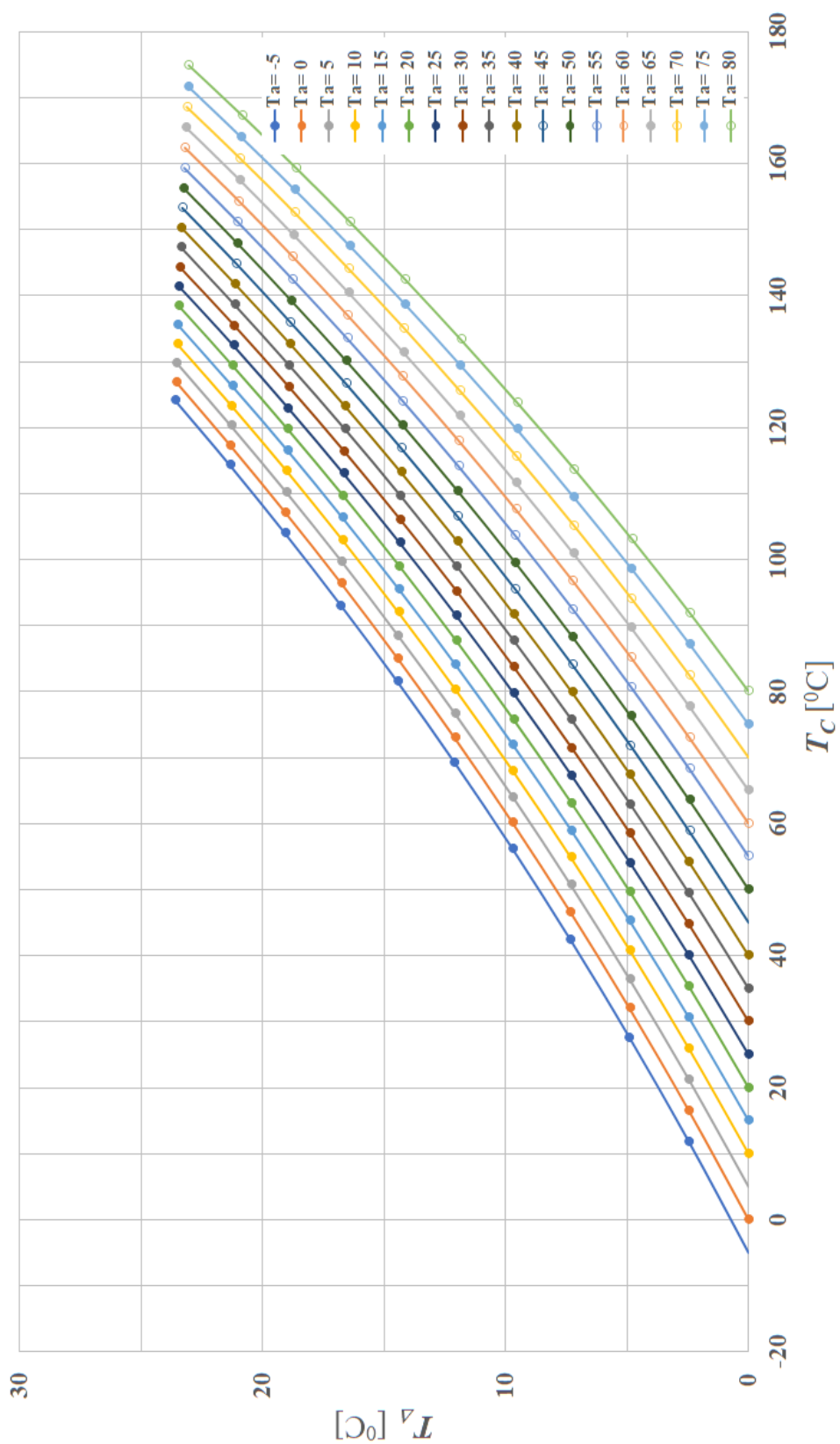




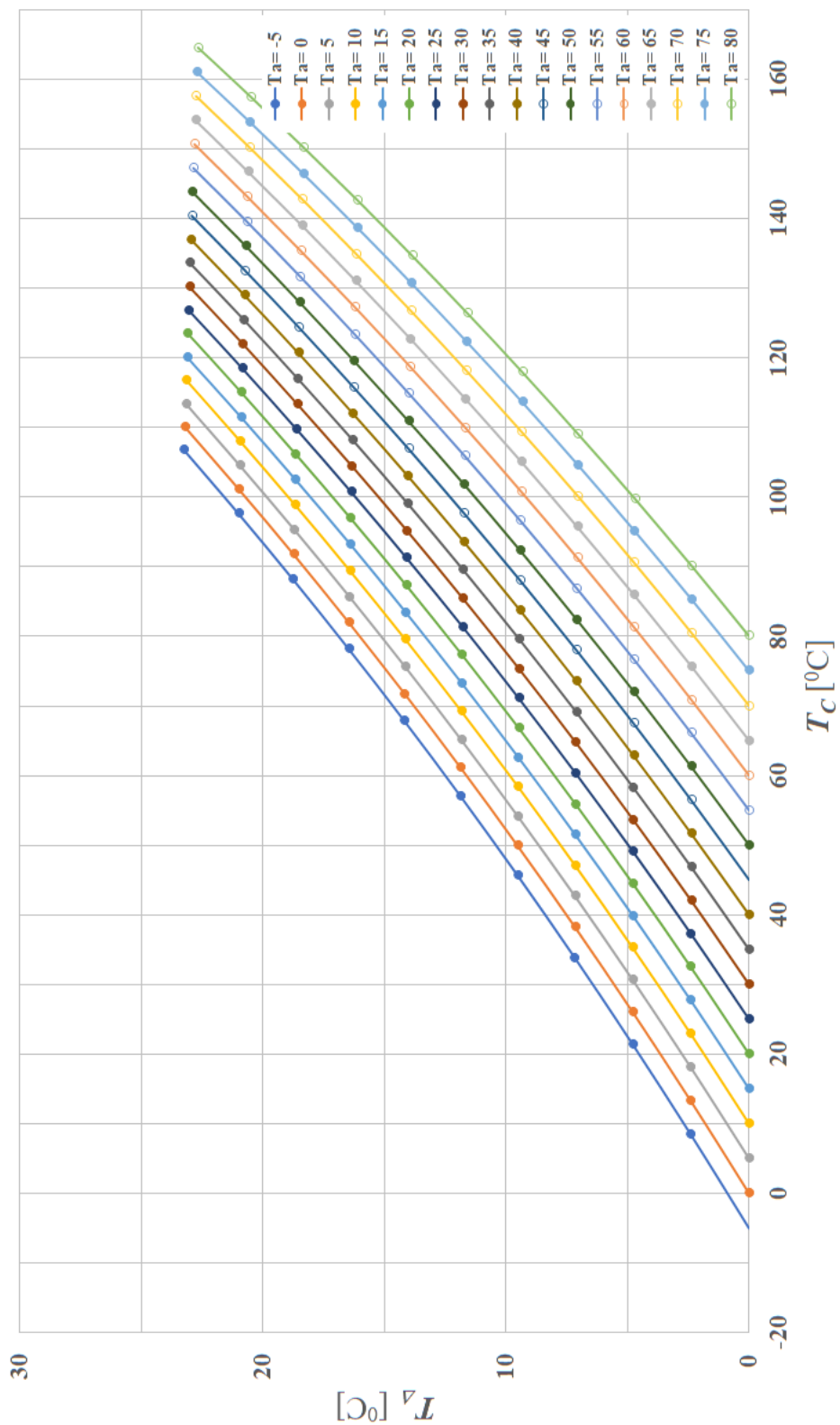
Rysunek 67: Zależności  $T_j = f(T_c)$  dla tranzystora C2M0280120.



Rysunek 68: Zależności  $T_j = f(T_c)$  dla tranzystora TP90H18PS.



Rysunek 69: Zależności  $T_j = f(T_c)$  dla tranzystora IRF 9640.



Rysunek 70: Zależności  $T_j = f(T_c)$  dla tranzystora IRF 9540.

Celem określenia matematycznych zależności wiążących  $T_{\Delta}$  z zarejestrowaną temperaturą obudowy  $T_C$ , otrzymane w wyniku prac symulacyjnych krzywe przedstawione na rysunkach 66-70 aproksymowano za pomocą (39)

$$T_{\Delta} = (a_1 \cdot T_a + b_1) \cdot T_C + (a_2 \cdot T_a + b_2) \quad (39)$$

Wartości współczynników  $a_1, b_1, a_2, b_2$  oraz wyznaczone wartości błędów aproksymacji przedstawiono w tabeli 16.

**Tabela 16:** Wartości współczynników  $a_1, b_1, a_2, b_2$  oraz wyznaczone wartości błędów aproksymacji dla analizowanych urządzeń półprzewodnikowych.

L.p	Element	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	Błąd aproksymacji
		[1/°C]	[-]	[-]	[°C]	[°C]
1	FFSH10120A	0,00056	0,28	-0,32	-0,18	1,12
2	C2M0280120	0,00098	0,37	-0,45	0,15	1,97
3	TP90H18PS	0,00067	0,43	-0,49	0,07	2,10
4	IRF 9649	0,00070	0,18	-0,23	-0,34	1,66
5	IRF 9540	0,00071	0,20	-0,26	-0,06	2,16

### 3.6 Budżet niepewności termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego

Wyniki wszystkich pomiarów są obarczone niepewnością. Jest to nieujemny parametr związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które w uzasadniony sposób można przypisać mierzonej wielkości [106]. W przedziale, którego granice są wyznaczone przez niepewność pomiaru i który został określony dla wyniku pomiaru mierzonej wielkości, z określonym prawdopodobieństwem znajduje się poprawny wynik pomiaru tej wielkości. W związku z tym wszystkie zmierzone wartości, które znajdują się w tym przedziale można uznać za poprawny wynik pomiaru.

Istnieje kilka sposobów oceny niepewności pomiaru, np. metoda propagacji rozkładów realizowana za pomocą symulacji Monte Carlo [107], ocena niepewności pomiaru za pomocą analizy statystycznej serii obserwacji (metoda typu A) oraz na podstawie przesłanek naukowych (metoda typu B). W trakcie trwania termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego warunki panujące w laboratorium oraz warunki panujące w otoczeniu obserwowanego urządzenia półprzewodnikowego i kamery termowizyjnej ulegały zmianie. To z kolei wpływało na wskazanie kamery termowizyjnej. Uwzględniając specyfikę badań zdecydowano, że w przeprowadzonych pracach, dla jednej nastawy mocy wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym  $P_j$  wykonano pojedynczy pomiar. W konsekwencji niemożliwe było wyznaczenie rozrzutu wyników pomiaru. Z tego powodu pominięto niepewność typu A.

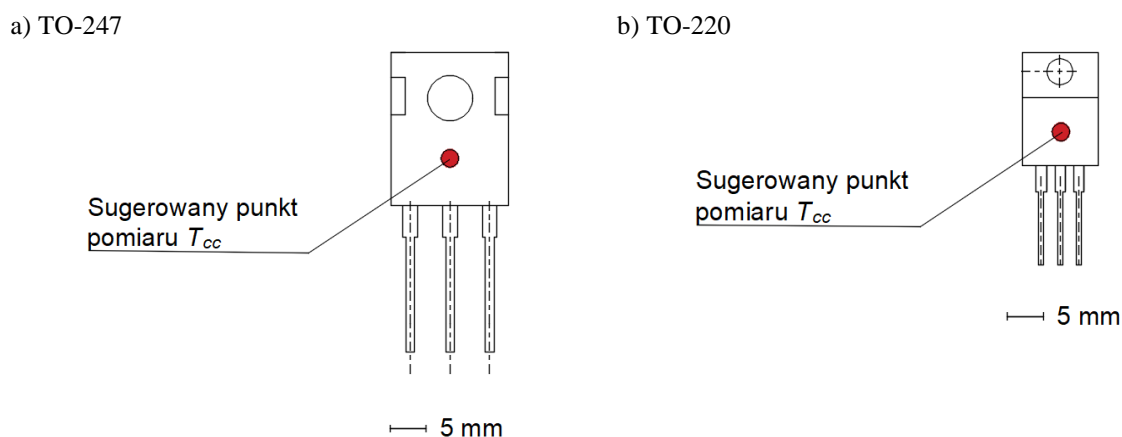
Termowizyjny pośredni pomiar temperatury  $T_{jc}$  elementu półprzewodnikowego polega na wykonaniu termowizyjnego pomiaru temperatury  $T_{CC}$  obudowy tego urządzenia oraz ustaleniu wartości  $T_{jc}$  na podstawie wcześniej wyznaczonej w wyniku prac symulacyjnych różnicy między temperaturą  $T_{js}$  elementu półprzewodnikowego a temperaturą  $T_{CS}$  obudowy urządzenia półprzewodnikowego (40).

$$T_{jc} = T_{cc} + T_{\Delta}$$

$$T_{\Delta} = T_{js} - T_{cs} \quad (40)$$

gdzie:  $T_{jc}$  – temperatura elementu półprzewodnikowego wyznaczona na podstawie termowizyjnego pomiaru temperatury  $T_{cc}$  obudowy urządzenia półprzewodnikowego,  $T_{js}$  – temperatura elementu półprzewodnikowego wyznaczona na podstawie prac symulacyjnych,  $T_{cs}$  – temperatura obudowy elementu półprzewodnikowego wyznaczona na podstawie prac symulacyjnych,  $T_{\Delta}$  – różnica pomiędzy temperaturą  $T_{js}$  elementu półprzewodnikowego wyznaczoną na podstawie prac symulacyjnych a temperaturą  $T_{cs}$  obudowy elementu półprzewodnikowego wyznaczoną na podstawie prac symulacyjnych.

W celu wykonania wiarygodnego pośredniego pomiaru  $T_{jc}$  należy zmierzyć wartość  $T_{cc}$  w środku czarnej przedniej części obudowy, ponieważ ten fragment cechuje się wysoką wartością współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  (mała wartość promieniowania odbitego  $T_{refl}$ ) oraz jest umieszczony bezpośrednio nad elementem półprzewodnikowym (krótka ścieżka przepływu ciepła przez EMC – tworzywo, z którego wykonano tą część obudowy). Proponowane miejsce wykonania pomiaru  $T_{cc}$  pokazano na rysunku 71.



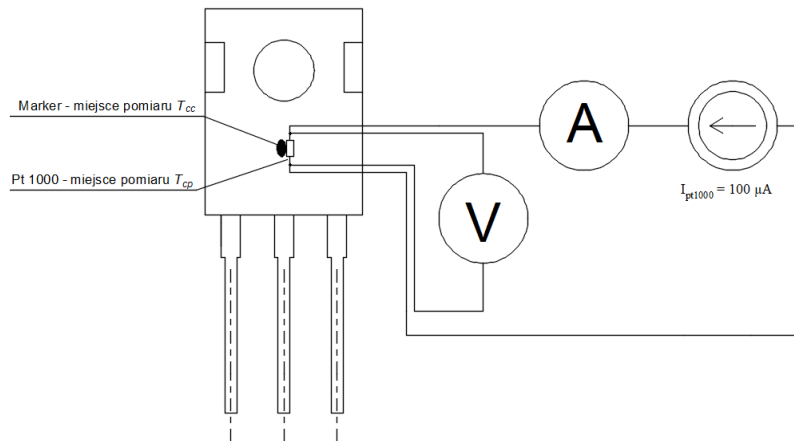
**Rysunek 71:** Sugerowana lokalizacja punktu pomiarowego termopowizyjnego pomiaru wartości  $T_{cc}$ .

Wyznaczona temperatura  $T_{jc}$  jest wiarygodna, gdy zmierzoną wartość  $T_{cc}$  można uznać za poprawną. Z kolei wynik pomiaru temperatury  $T_{cc}$  można uważać za wiarygodny, gdy jest zgodny z wynikiem innego pomiaru temperatury tej powierzchni. W celu sprawdzenia, czy zmierzoną wartość  $T_{cc}$  można uznać za miarodajną porównano ją z wartością  $T_{CP}$  zmierzoną za pomocą czujnika Pt1000. Wskazana powierzchnia obudowy urządzenia półprzewodnikowego (rysunek 71) jest ciałem promieniującym selektywnie. Oznacza to, że wartość  $\varepsilon$  jest zależna od temperatury tej powierzchni  $T_C$  ( $\varepsilon = f(T_C)$ ). Z tego powodu na obudowie, w sugerowanym miejscu pomiaru (rysunek 71) naniesiono za pomocą farby Nextel Velvet Coating 811-21 – 9218 marker. Następnie na wykonanym markerze zmierzono termowizyjnie wartość  $T_{cc}$ . Pomiar wielkości  $T_{cc}$  wykonano na stanowisku przedstawionym w rozdziale 3.3.1.

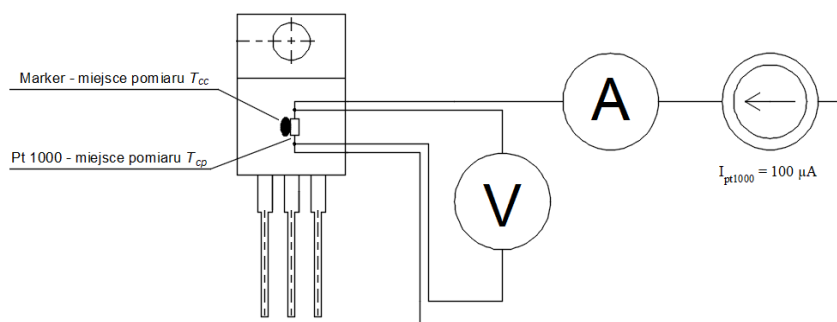
Temperaturę  $T_{CP}$  wyznaczono na podstawie rezystancji czujnika Pt1000, którą zmierzono za pomocą metody czteroprzewodowej. Ten czujnik przytwierdzono klejem termoprzewodzącym w miejscu wskazanym na rysunku 72 obok naniesionego markera. Prąd

przepływający przez czujnik Pt1000 był równy  $100 \mu\text{A}$ . Jest to wartość, która nie powodowała samonagrzewania czujnika. Jej dobór był podyktowany wskazaniem producenta [104] oraz rezultatami przeprowadzonych prac (rysunku 39). Zastosowano źródło prądu w układzie Howlanda. Układ pomiarowy oraz miejsce pomiaru pokazano na rysunku 72.

a) TO-247



b) TO-220



**Rysunek 72:** Miejsce termowizyjnego pomiaru temperatury  $T_{CC}$  obudowy urządzenia półprzewodnikowego oraz pomiaru temperatury  $T_{CP}$  obudowy urządzenia półprzewodnikowego za pomocą Pt1000.

Wyniki pomiarów wartości  $T_{CC}$  oraz  $T_{CP}$  są obarczone niepewnościami. Założono, że zmierzona wartość  $T_{CC}$  jest wiarygodna, gdy zakres wyznaczony przez niepewność rozszerzoną tego pomiaru  $U(T_{CC})$  ma część wspólną z zakresem wyznaczonym przez niepewność rozszerzoną  $U(T_{CP})$  pomiaru wykonanego za pomocą Pt1000. Obie wartości ( $U(T_{CC})$  oraz  $U(T_{CP})$ ) są niepewnością pojedynczego pomiaru. Z tego powodu w obu przypadkach pominięto niepewność typu A i poprzestano na wyznaczeniu niepewności typu B (rozdział 2.6.2).

W celu wyznaczenia  $U(T_{CC})$  za pomocą metody typu B należało określić jakie czynniki występowały w trakcie pomiaru  $T_{CC}$ , które z nich mogły wpływać na wskazanie kamery termowizyjnej oraz jaki był zakres zmienności tych czynników. Pomiar odbywał się w warunkach laboratoryjnych. Obserwowaną obudowę urządzenia półprzewodnikowego i kamerę termowizyjną umieszczono w dedykowanej komorze wykonanej z plexi (rozdział 3.3.1). Z tego powodu pominięto wpływ ruchu powietrza na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury. Odległość pomiędzy obiektywem kamery termowizyjnej i obudową elementu półprzewodnikowego była mała i wynosiła  $d = 33 \text{ mm}$ . Dodatkowo powierzchnia markera, na którym mierzono wartość  $T_{CC}$  mieściła się w kwadracie o wymiarze  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ . Z tego powodu nie analizowano rozkładu temperatury we wnętrzu wymienionej komory.

Na podstawie wykonanego przeglądu literatury (2.4.1.2), obserwacji (3.2.5) oraz zdobytego doświadczenia stwierdzono, że na mierzoną wartość  $T_{CC}$  wpływają: emisyjność powierzchni obudowy urządzenia półprzewodnikowego  $\varepsilon$ , temperatura odbita  $T_r$ , temperatura otoczenia  $T_a$ , transmitancja powietrza  $\tau_a$ , temperatura soczewki obiektywu kamery termowizyjnej  $T_l$ , transmitancja soczewki kamery termowizyjnej  $\tau_l$ , kąt obserwacji  $\beta$  oraz nieostrość rejestrowanego termogramu  $T_{us}$ . Dodatkowo uwzględniono niepewność kamery termowizyjnej  $\Delta T_k$ , którą odczytano z danych producenta.

Przed wykonaniem właściwego pomiaru  $T_{CC}$  sprawdzono, czy czynniki, które wpływają na mierzoną wartość  $T_{CC}$  są od siebie zależne, to znaczy czy zmiana wartości jednego z czynników wpływa na zmianę wartości innego czynnika. W tym celu wartość  $T_{CC}$  mierzono w punkcie pokazanym na rysunku 71. Jednocześnie zmieniano nastawy poszczególnych czynników (jeden czynnik w trakcie jednej próby) i obserwowano, czy wartości pozostałych czynników ulegają zmianie. W tym celu użyto oprogramowania Flir Tools +. Na podstawie wykonanych obserwacji, dokonanego przeglądu literatury (2.4.1.2) oraz zdobytego doświadczenia stwierdzono, że wraz ze zmianą wartości  $\beta$  zmianie ulega wartość  $\varepsilon$  obserwowanej powierzchni. Ponieważ w trakcie trwania pomiaru  $T_{CC}$  wartość  $\beta \ll 60^\circ$  i nie ulegała zmianie można stwierdzić, że oba czynniki są niezależne. Uwzględniając dodatkowo niewielką wartość  $d$  należy stwierdzić, że wszystkie z wymienionych czynników ( $\varepsilon, T_r, T_a, \tau_a, T_l, \tau_l, \beta, T_{us}$ ) są od siebie niezależne.

Pomiar wartości  $T_{CC}$  wykonywano w stanie ustalonym, to znaczy wtedy, gdy zauważono, że wskazanie kamery termowizyjnej nie ulega zmianie. Dodatkowo przed wykonaniem pomiaru kamera termowizyjna była umieszczona na stanowisku przez arbitralnie przyjęty czas, dłuższy od jednej godziny. W konsekwencji możliwe było założenie, że zakres zmienności  $T_l$  jest bliski zakresowi zmienności  $T_a$ . Odległość pomiędzy obiektywem kamery termowizyjnej i budową urządzenia półprzewodnikowego  $d$  wpływa na wartość  $\tau_a$ . W przeprowadzonych pracach wartość  $d$  była niewielka (33 mm). Z tego powodu wpływ  $\tau_a$  na wskazanie kamery termowizyjnej był pomijalny.

Zakresy zmienności wielkości  $T_r, \tau_a, T_l$ , czynnika związanego ze zmianą kąta obserwacji  $T_\beta$  oraz czynnika związanego ze zmianą ostrości rejestrowanego termogramu  $T_{us}$  dobrano na podstawie informacji przedstawionych w rozdziałach (2.4.1.2) oraz (3.2.5). Zakres zmienności  $T_a$  dobrano na podstawie wartości zarejestrowanych w laboratorium w trakcie trwania pomiarów. Dodatkowo zakres zmienności  $\tau_l$  dobrano na podstawie literatury [109, 110], a zakres zmienności  $\varepsilon$  na podstawie literatury [111]. Ponieważ pomiar  $T_{CC}$  wykonano na markerze o stałej wartości  $\varepsilon = 0,97$  założono, że zakres zmienności  $\varepsilon$  jest nie większy niż rozdzielczość nastawy tej wielkości w kamerze termowizyjnej ( $\Delta\varepsilon = 0,01$ ). Dobre zakresy zmienności  $\varepsilon, T_r, d, T_a, \tau_a, T_l, \tau_l$  oraz wartości estymat (wyznaczona na podstawie (21)) przedstawiono w tabeli 17.



**Tabela 17:** Zakresy zmienności oraz wartości estymat wielkości  $\varepsilon$ ,  $T_r$ ,  $d$ ,  $T_a$ ,  $\tau_a$ ,  $T_l$ ,  $\tau_l$ .

Wielkość wejściowa $X_i$	Jednostka	Górna granica zakresu wartości $h_+$	Dolna granica zakresu wartości $h_-$	Estymata wielkości wejściowej $x_i$
$\varepsilon$	-	0,980	0,960	0,97
$T_r$	°C	5,000	0,000	2,50
$d$	m	0,038	0,028	0,03
$T_a$	°C	30,000	16,000	22,50
$T_l$	°C	30,000	16,000	22,50
$\tau_l$	-	1,000	0,980	0,99
$\tau_a$	-	1,000	0,980	0,99

Wyznaczenie  $U(T_{cc})$  wymagało wyznaczenia wartości niepewności standardowej  $u(T_{cc})$ . Z kolei ta wielkość jest pierwiastkiem sumy kwadratów niepewności standardowych wielkości wejściowych pomnożonych przez współczynniki wrażliwości  $C_i$ . Niepewności standardowe wielkości uwzględnionych w tabeli 17 otrzymywano za pomocą równań (22 – 23). Niepewność standardową wielkości  $T_k$ ,  $T_\beta$ ,  $T_{us}$  i  $T_\Delta$  wyznaczono poprzez podzielenie wartości błędu granicznego przez pierwiastek z 3 (we wszystkich przypadkach założono prostokątny rozkład rawdopodobieństwa). W przypadku błędu granicznego  $\Delta T_\beta$  wynikającego z nieprawidłowego doboru kąta obserwacji jego wartość odczytano z publikacji [112], przy założeniu, że  $\beta \ll 60^\circ$ . Wartość błędu granicznego  $\Delta T_{us}$  odczytano z publikacji [109]. W tym przypadku założono, że wartość miary ostrości EOL jest większa od 0,8 (wartość znormalizowana). Wartości  $C_i$  można otrzymać jako pochodną cząstkową (40) po zmiennej, której wartość jest wyznaczana.

$$T_{cc} = \sqrt[4]{\frac{T_k^4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma - (1 - \varepsilon) \cdot \tau_a \cdot \sigma \cdot T_{refl}^4 \cdot \tau_l - (1 - \tau_a) \cdot \sigma \cdot T_a^4 \cdot \tau_l - (1 - \tau_l) \cdot \sigma \cdot T_l^4}{\varepsilon \cdot \tau_a \cdot \sigma \cdot \tau_l}} + \quad (40)$$

$$+ T_\beta + T_{us}$$

gdzie:  $T_k$  – temperatura wskazana przez kamerę termowizyjną bez uwzględnienia wpływu pozostałych czynników,  $T_\beta$  – czynnik związany ze zmianą kąta obserwacji,  $T_{us}$  – czynnik związany ze zmianą nieostrości.

Wyznaczone wartości  $C_i$  przedstawiono w (41) – (50).

$$\frac{\partial T_{cc}}{\partial \tau_a} = \frac{\frac{-\tau_l T_a^4 \sigma - \tau_l T_{refl}^4 \sigma (1 - \varepsilon)}{\tau_l \sigma \tau_a \varepsilon} - \frac{-\tau_l T_{refl}^4 \sigma \tau_a (1 - \varepsilon) - \tau_l T_a^4 \sigma (1 - \tau_a) - (1 - \tau_l) T_l^4 \sigma + \sigma \varepsilon T_k^4}{\tau_l \sigma \tau_a^2 \varepsilon}}{4 \left( \frac{-\tau_l T_{refl}^4 \sigma \tau_a (1 - \varepsilon) - \tau_l T_a^4 \sigma (1 - \tau_a) - (1 - \tau_l) \sigma T_l^4 + \sigma \varepsilon T_k^4}{\tau_l \sigma \tau_a \varepsilon} \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (41)$$

$$\frac{\partial T_{cc}}{\partial \varepsilon} = \frac{\frac{T_{refl}^4}{\varepsilon} - \frac{-\tau_l T_{refl}^4 \sigma \tau_a (1 - \varepsilon) - \tau_l T_a^4 \sigma (1 - \tau_a) - (1 - \tau_l) T_l^4 \sigma + \sigma \varepsilon T_k^4}{\tau_l \sigma \tau_a \varepsilon^2}}{4 \left( \frac{-\tau_l T_{refl}^4 \sigma \tau_a (1 - \varepsilon) - \tau_l T_a^4 \sigma (1 - \tau_a) - (1 - \tau_l) \sigma T_l^4 + \sigma \varepsilon T_k^4}{\tau_l \sigma \tau_a \varepsilon} \right)^{\frac{3}{4}}} \quad (42)$$

$$\frac{\partial T_{cc}}{\partial T_k} = \frac{1}{4\tau_l\sigma\tau_a\varepsilon\left(\frac{-\tau_l T_{refl}^4\sigma\tau_a(1-\varepsilon) - \tau_l T_a^4\sigma(1-\tau_a) - (1-\tau_l)T_l^4\sigma + \sigma\varepsilon T_k^4}{\tau_l\sigma\tau_a\varepsilon}\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (43)$$

$$\frac{\partial T_{cc}}{\partial \vartheta_{refl}} = \frac{T_{refl}^3(1-\varepsilon)}{\varepsilon\left(\frac{-\tau_l T_a^4\sigma(1-\tau_a) - (1-\tau_l)T_l^4\sigma - \tau_l T_{refl}^4\sigma\tau_a(1-\varepsilon) + \sigma\varepsilon T_k^4}{\tau_l\sigma\tau_a\varepsilon}\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (44)$$

$$\frac{\partial T_{cc}}{\partial \vartheta_l} = -\frac{T_l^3(1-\tau_l)}{\sigma\tau_a\varepsilon\left(\frac{-\tau_l T_a^4\sigma(1-\tau_a) - (1-\tau_l)\sigma T_l^4 - \tau_l T_{refl}^4\sigma\tau_a(1-\varepsilon) + \sigma\varepsilon T_k^4}{\tau_l\sigma\tau_a\varepsilon}\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (45)$$

$$\frac{\partial T_{cc}}{\partial \vartheta_a} = -\frac{T_a^3(1-\tau_l)}{\tau_a\varepsilon\left(\frac{-\tau_l T_a^4\sigma(1-\tau_a) - (1-\tau_l)\sigma T_l^3 - \tau_l T_{refl}^4\sigma\tau_a(1-\varepsilon) + \sigma\varepsilon T_k^4}{\tau_l\sigma\tau_a\varepsilon}\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{cc}}{\partial \tau_l} &= \frac{T_{refl}^4\sigma\tau_a(-(1-\varepsilon)) - T_a^4\sigma(1-\tau_a) + \sigma T_l^4}{\tau_l\sigma\tau_a\varepsilon} - \frac{-\tau_l T_{refl}^4\sigma\tau_a(1-\varepsilon) - \tau_l T_a^4\sigma(1-\tau_a) - (1-\tau_l)\vartheta_l^4\sigma}{\tau_l^2\sigma\tau_a\varepsilon} \\ &= \frac{4\left(\frac{-\tau_l T_{refl}^4\sigma\tau_a(1-\varepsilon) - \tau_l T_a^4\sigma(1-\tau_a) - (1-\tau_a)T_l^4\sigma + \sigma\varepsilon T_k^4}{\tau_l\sigma\tau_a\varepsilon}\right)^{\frac{3}{4}}}{\tau_l\sigma\tau_a\varepsilon} \end{aligned} \quad (47)$$

$$\frac{\partial T_{cc}}{\partial T_\beta} = 1 \quad (48)$$

$$\frac{\partial T_{cc}}{\partial T_{us}} = 1 \quad (49)$$

Wyznaczenie wartości  $u(T_{CC})$  wymaga skonstruowania budżetu niepewności. Uwzględniono w nim błąd kamery termowizyjnej  $\Delta T_k$ , który dodano do budżetu ze współczynnikiem  $C_i = 1$ . Wartość  $\Delta T_k$  wynoszącą 2 °C lub 2% liczono zgodnie ze wskazaniem producenta [100]. Przykładowy budżet niepewności dla  $T_{CC} = 130$  °C przedstawiono w tabeli 18.

Tabela 18: Budżet niepewności dla  $T_{CC} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$  (dioda FFSH10120A).

Symbol	Jednostka	Estymata wielkości wejściowej $x_i$	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład Prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości $c_i$	Udział w niepewności $u_i(y)$
$\tau_a$	-	0,99	0,0057735	normalny	0,4488	0,00259
$\varepsilon$	-	0,95	0,02886751	prostokątny	-7,6450	-0,22070
$T_{refl}$	$^{\circ}\text{C}$	2,50	1,44337567	prostokątny	0,0119	0,01718
$\tau_l$	-	0,99	0,0057735	prostokątny	-10,3190	-0,05960
$T_a$	$^{\circ}\text{C}$	23,00	4,04145188	prostokątny	-0,0151	-0,06100
$T_l$	$^{\circ}\text{C}$	23,00	4,04145188	prostokątny	-0,0151	-0,06100
$T_{\beta}$	$^{\circ}\text{C}$	149,00	1,15470054	prostokątny	1,0000	1,15470
$T_{us}$	$^{\circ}\text{C}$	149,50	0,06	prostokątny	1,0000	0,06000
$T_k$	$^{\circ}\text{C}$	129,00	1,49	prostokątny	1,0000	1,49000
$T_{CC}$	$^{\circ}\text{C}$	130,00				1,90000

Wartość  $u(T_{CC}) = 1,90$  jest pierwiastkiem sumy kwadratów udziałów w niepewności  $u_i(y)$ . W celu wyznaczenia  $U(T_{CC})$  wartość  $u(T_{CC})$  należy przemnożyć przez współczynnik rozszerzenia  $k$ . Jest to liczba większa od jedności, przez którą mnoży się niepewność standardową w celu uzyskania niepewności rozszerzonej. Dobór wartości  $k = 2$  oznacza, że prawdopodobieństwo wystąpienia zmierzonej wartości w wyznaczonym przez niepewność rozszerzoną zakresie wynosi 95 %.

Niepewność pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego  $U(T_{CP})$  wykonanego za pomocą czujnika Pt1000 składa się z dwóch wielkości:  $u(T_{Pt1000})$  oraz  $u(T_{Pt1000t})$ . Wielkość  $u(T_{Pt1000})$  jest związana ze zmianą rezystancji  $R_{Pt1000}$  czujnika Pt1000, natomiast  $u(T_{Pt1000t})$  jest związana z błędem własnym czujnika Pt1000. W celu wyznaczenia wartości  $u(T_{Pt1000})$  należało wyznaczyć błąd graniczny pomiaru rezystancji czujnika Pt1000  $\Delta R_{Pt1000}$  i następnie za pomocą zależności  $T_{Pt1000} = f(R_{Pt1000})$  wyznaczyć wartość  $\Delta T_{Pt1000}$ .

Wyznaczenie wielkości  $\Delta R_{Pt1000}$  wymagało wykonania pomiaru wartości spadku napięcia na czujniku Pt1000  $U_{Pt1000}$  oraz natężenie prądu przepływającego przez ten czujnik  $I_{Pt1000}$ . Mierzoną wartość  $U_{Pt1000}$  odczytywano za pomocą multimetru Agilent 34401A, natomiast wielkość  $I_{Pt1000}$  mierzono za pomocą multimetru Brymen 859CF. Wartość  $\Delta T_{Pt1000}$  wyznaczono na podstawie błędu granicznego rezystancji czujnika  $\Delta R_{Pt1000}$ . Tą wartość wyznaczono za pomocą (56 – 57). Równanie (50) pochodzi z dokumentacji multimetru Brymen 859CF natomiast (51) z dokumentacji multimetru Agilent 34401A. Jako przykład wyznaczono  $\Delta T_{CP}$  dla  $T_{CP} = 49,62\text{ }^{\circ}\text{C}$  (50 – 55).

$$\begin{aligned} \Delta I_{Pt1000} &= \pm (0,1\%U_m + 20LSD) = \\ &= \frac{0,1}{100} \cdot 0,101 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 10^{-6} = 3,52 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{Pt1000} &= \pm (0,0035\%U_m + 0005\%U_z) = \\ &= \frac{0,0035}{100} \cdot 0,12 + \frac{0,0005}{100} \cdot 10 = 5,43 \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad (51)$$

$$\delta U_{Pt1000} = \frac{\Delta U_{Pt1000}}{U_{Pt1000}} \cdot 100 = \frac{5,43 \cdot 10^{-5}}{0,12} \cdot 100 = 0,04 \quad (52)$$

$$\delta I_{Pt1000} = \frac{\Delta I_{Pt1000}}{I_{Pt1000}} \cdot 100 = 0,35 \quad (53)$$

$$\delta R_{Pt1000} = \delta U_{Pt1000} + \delta I_{Pt1000} = 0,04 + 0,35 = 0,39 \quad (54)$$

$$\Delta R_{Pt1000} = \frac{R_{Pt1000} \cdot \delta R_{Pt1000} \cdot 1}{100} = \frac{1195,29 \cdot 0,39 \cdot 1}{100} = 4,66 \quad (55)$$

gdzie:  $U_m$  – wartość zmierzona,  $U_z$  – zastosowany zakres pomiaru napięcia, LSD – najmniej znacząca cyfra.

Na podstawie danych producenta czujnika Pt1000 [108] pozyskano (56) opisujące zależność  $T_{Pt1000} = f(R)$ . Do (56) podstawiono górne (57) i dolne (58) wartości  $R_{Pt1000+}$  i  $\Delta R_{Pt1000}$ .

$$T_{Pt1000} = 10^{-5} \cdot R_{Pt1000}^2 + 0,235 \cdot R_{Pt1000} - 245,35 + R_{Pt1000}^2 \cdot 4 \cdot 10^{-7} - R_{Pt1000} \cdot 2 \cdot 10^{-5} + 0,0011 \quad (56)$$

$$T_{Pt1000+} = 10^{-5} \cdot 1199,95^2 + 0,235 \cdot 1199,95 - 245,35 + 1199,95^2 \cdot 4 \cdot 10^{-7} - 1199,95 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + 0,0011 = 51,58 \quad (57)$$

$$T_{Pt1000-} = 10^{-5} \cdot 1190,63^2 + 0,235 \cdot 1190,63 - 245,35 + 1190,63^2 \cdot 4 \cdot 10^{-7} - 1190,63 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + 0,0011 = 49,17 \quad (58)$$

gdzie:  $T_{Pt1000+}$  - wartość temperatury zmierzona za pomocą Pt1000 po dodaniu górnego zakresu  $\Delta R_{Pt1000}$ ,  $T_{Pt1000-}$  - wartość temperatury zmierzona za pomocą Pt1000 po dodaniu dolnego zakresu  $\Delta R_{Pt1000}$ .

Odejmując  $T_{Pt1000-}$  od  $T_{Pt1000+}$  otrzymano wartość  $\Delta T_{Pt1000}$  (59)

$$T_{Pt1000+} - T_{Pt1000-} = \Delta T_{Pt1000} = 2,43 \quad (59)$$

Wyznaczenie wartości  $\Delta T_{Pt1000t}$  (i w konsekwencji  $u(T_{Pt1000t})$ ) było możliwe na podstawie danych producenta [104, 108] oraz informacji z normy PN-EN IEC 60751:2022-11 "Platynowe czujniki przemysłowych termometrów rezystancyjnych i platynowe czujniki temperatury".

W celu ułatwienia zrozumienia sposobu wyznaczania wartości  $u(T_{Pt1000t})$  kontynuowano obliczenia dla pierwszego wiersza z tabeli 19. Na podstawie tych danych wyznaczono funkcję  $T_{CP} = f(\Delta T_{Pt1000t})$  (60), która ma zastosowanie dla wartości temperatur wyrażonych w °C.

$$\Delta T_{Pt1000t} = \frac{T_{cp} + 60}{200} = \frac{49,82 + 60}{200} = 0,55 \quad (60)$$

Wartość  $U(T_{CP})$  otrzymano jako pierwiastek sumy kwadratów niepewności  $u(T_{Pt1000})$  oraz  $u(T_{Pt1000t})$ . Z kolei te wartości otrzymano po podzieleniu wartości  $T_{Pt1000}$  oraz  $T_{Pt1000t}$  przez pierwiastek z 3 (założono prostokątny rozkład prawdopodobieństwa). Sposób wyznaczania  $U(T_{CP})$  pokazano w (61 – 64).

$$u(T_{Pt1000}) = \frac{\Delta T_{Pt1000}}{\sqrt{3}} = \frac{2,43}{\sqrt{3}} = 1,40 \quad (61)$$

$$u(T_{Pt1000t}) = \frac{\Delta T_{Pt1000t}}{\sqrt{3}} = \frac{0,55}{\sqrt{3}} = 0,32 \quad (62)$$

$$u(T_{cp}) = \sqrt{u(T_{Pt1000})^2 \cdot 1 + u(T_{Pt1000t})^2 \cdot 1} = \sqrt{1,40^2 \cdot 1 + 0,32^2 \cdot 1} = 1,44 \quad (63)$$

$$U(T_{cp}) = k \cdot u(T_{cp}) = 2 \cdot 1,44 = 2,88 \quad (64)$$

W tabeli 19 przedstawiono wartości  $T_{CC}$ ,  $U(T_{CC})$  dla współczynnika rozszerzenia  $k = 2$ ,  $T_{CP}$  oraz  $U(T_{CP})$  dla  $k = 2$ ,  $\Delta T_{Pt1000}$ ,  $\Delta T_{Pt1000t}$ ,  $u(T_{Pt1000})$ ,  $u(T_{Pt1000t})$ .

**Tabela 19:** Wartości  $T_{CC}$ ,  $U(T_{CC})$  dla współczynnika rozszerzenia  $k = 2$ ,  $T_{CP}$  oraz  $U(T_{CP})$  dla  $k = 2$ ,  $\Delta T_{Pt1000}$ ,  $\Delta T_{Pt1000t}$ ,  $u(T_{Pt1000})$ ,  $u(T_{Pt1000t})$ .

$T_{CC}$	$U(T_{CC})$	$T_{CP}$	$u(T_{CP})$	$U(T_{CP})$	$u(T_{Pt1000})$	$u(T_{Pt1000t})$	$\Delta T_{Pt1000}$	$\Delta T_{Pt1000t}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
49,62	± 3,25	49,82	± 1,44	± 2,88	± 1,40	± 0,32	± 2,43	± 0,55
52,26	± 3,31	52,56	± 1,46	± 2,92	± 1,42	± 0,33	± 2,46	± 0,57
68,78	± 3,31	69,28	± 1,54	± 3,08	± 1,50	± 0,38	± 2,59	± 0,66
87,92	± 3,43	88,22	± 1,64	± 3,28	± 1,58	± 0,43	± 2,74	± 0,75
107,79	± 3,43	108,19	± 1,74	± 3,48	± 1,67	± 0,49	± 2,89	± 0,85
127,94	± 3,79	128,44	± 1,84	± 3,68	± 1,76	± 0,55	± 3,05	± 0,95
147,59	± 4,15	147,69	± 1,95	± 3,9	± 1,85	± 0,61	± 3,21	± 1,05
159,49	± 4,38	159,79	± 2,22	± 4,44	± 2,09	± 0,76	± 3,62	± 1,31

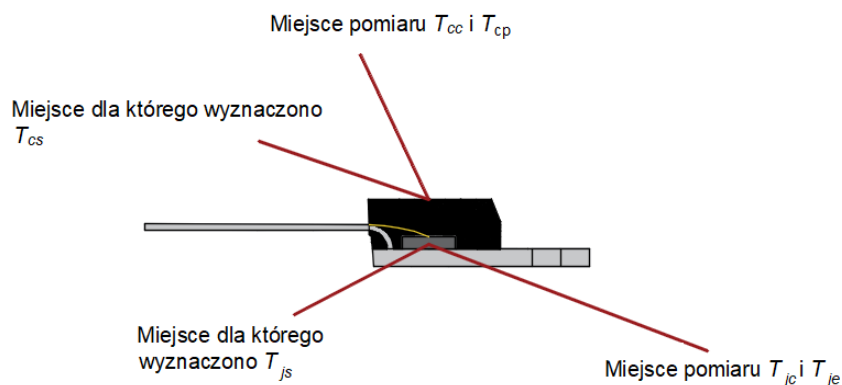
Po przeanalizowaniu danych z tabeli 19 można stwierdzić, że wartości  $T_{CC}$  oraz  $T_{CP}$  mieszczą się w części wspólnej zakresów wyznaczonych przez niepewności  $U(T_{CC})$  oraz  $U(T_{CP})$ . Z tego powodu wartość  $T_{CC}$  można uznać za wiarygodną.

Potwierdzenie wiarygodności pomiaru  $T_{CC}$  umożliwiło sprawdzenie, czy wynik termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{jc}$  również jest wiarygodny. W tym celu wykonano pomiar temperatury elementu półprzewodnikowego za pomocą metody elektrycznej  $T_{je}$  (rozdział 3.5), a wynik tego pomiaru porównano z  $T_{jc}$ . Dodatkowo wyznaczono niepewności  $U(T_{jc})$  i  $U(T_{je})$ . Uznano, że wartość  $T_{jc}$  jest wiarygodna, gdy znajduje się w części wspólnej zakresów wyznaczonych przez  $U(T_{jc})$  i  $U(T_{je})$ .

Wartość  $U(T_{je})$  wyznaczono za pomocą metody typu B. Ponieważ dla każdej wartości  $T_{jc}$  wykonywano jeden pomiar pominięto niepewność typu A. Postępowano w sposób podobny, w który wyznaczono  $U(T_{CC})$ . W skonstruowanym budżecie niepewności uwzględniono wartość  $T_{\Delta}$ , którą dodano do (40). Wartość współczynnika  $C_i$  dla  $T_{\Delta}$  wynosiła 1. W skonstruowanym budżecie użyto wartości  $U(T_{CC})$  otrzymanej w budżecie pokazanym w tabeli 18.

W celu ułatwienia zrozumienia prezentowanego sposobu wyznaczania  $U(T_{jc})$  na rysunku 73 przedstawiono miejsca pomiaru  $T_{CC}$ ,  $T_{CP}$ ,  $T_{CS}$ ,  $T_{js}$  oraz miejsca, dla których

wyznaczono  $T_{jc}$ ,  $T_{je}$ . Z uwagi na podobieństwo obudów TO-247 oraz TO-220 posłużono się przekrojem obudowy TO-220.



**Rysunek 73:** Miejsca pomiaru  $T_{CC}$ ,  $T_{CP}$ ,  $T_{CS}$ ,  $T_{js}$  oraz miejsca, dla których wyznaczono  $T_{jc}$ ,  $T_{je}$ .

Przykładowy budżet niepewności pokazano w tabeli 20. Wykorzystano dane z budżetu przedstawionego w tabeli 18.

**Tabela 20:** Budżet niepewności dla  $T_{je} = 148,36 \text{ °C}$  ( $T_{CC} = 120 \text{ °C}$ ) dla diody FFSH10120A.

Symbol	Jednostka	Estymata wielkości wejściowej $x_i$	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości $c_i$	Udział w niepewności $u_i(y)$
$T_A$	°C	1,12	0,64	prostokątny	1	0,64
$T_{CC}$	°C	120	1,91	prostokątny	1	1,82
$T_{jc}$	°C	148,36				1,93

Wartość  $U(T_{je})$  wyznaczono na podstawie analizy niepewności poszczególnych wielkości mierzonych w trakcie pomiaru  $T_{je}$ . W pierwszej części pomiaru wyznaczano charakterystykę  $U_F = f(T_a)$ . Pomiar wykonywano w stanie ustalonym za pomocą stanowiska przedstawionego w rozdziale 3.5. Czujnik Pt1000 umieszczono w środku komory klimatycznej blisko elementu półprzewodnikowego. Założono, że  $T_j = T_a$ . Źródło prądowe zasilające czujnik Pt1000 umieszczono poza komorą. Znając wartości z dokumentacji technicznej multimetrów mierzących wartości  $U_{Pt1000}$  i  $I_{Pt1000}$  oraz za pomocą (54) – (55) wyznaczono  $\Delta R_{Pt1000}$ .

Następnie za pomocą (57) – (58) wyznaczono górny i dolny zakres  $\Delta T_{Pt1000}$ . Dzieląc tą wartość przez pierwiastek z 3 (założono prostokątny rozkład prawdopodobieństwa) wyznaczono  $u(T_{Pt1000})$ . Korzystając z (59) wyznaczono  $\Delta T_{Pt1000t}$ . Wartości  $u(T_{Pt1000t})$  otrzymano dzieląc  $\Delta T_{Pt1000t}$  przez pierwiastek z 3 (również założono prostokątny rozkład prawdopodobieństwa). Wartość  $u(T_a)$  wyznaczono jako pierwiastek z sumy kwadratów wartości  $u(T_{Pt1000})$  oraz  $u(T_{Pt1000t})$ . Ponieważ nie zauważono korelacji pomiędzy obiema wartościami założono, że w obu przypadkach  $C_i = 1$ . W celu wyznaczenia  $U(T_a)$  wartość  $u(T_a)$  pomnożono przez 2. W drugiej części pomiaru na podstawie zmierzonej wartości  $U_F$  oraz znanej charakterystyki  $T_j = f(U_F)$  wyznaczano wartość  $T_{je}$  (rozdział 3.5). Wykorzystano to samo źródło prądowe oraz ten sam multimetr (do pomiaru  $U_F$ ), które wykorzystano w pierwszej części pomiaru. W celu wyznaczenia wartości  $\Delta T_{je}$  wyznaczono charakterystyki  $U_F = f(T_j)$ . Znając wartości  $\Delta U_F$  oraz  $U(T_a)$  możliwe było wyznaczenie wartości  $\Delta T_{je}$ . W celu wyznaczenia wartości  $U(\Delta T_{je})$  wartość  $\Delta T_{je}$  podzielono przez pierwiastek z 3 (założono prostokątny rozkład prawdopodobieństwa) i pomnożono przez  $k = 2$ . W tabelach 21 – 23 przedstawiono wyniki

**K. Dziarski** *Termowizyjne obserwacje elementów półprzewodnikowych*

otrzymane dla  $T_{je} = 30\text{ °C}$ ,  $T_{je} = 90\text{ °C}$ ,  $T_{je} = 120\text{ °C}$ .

**Tabela 21:** Zestawienie wartości dla  $T_{je} = 30\text{ °C}$ .

L.p.	Nazwa elementu	$T_{je}$	$\pm U(T_{je})$	$T_{cc}$	$\pm U(T_{cc})$	$T_{jc}$	$\pm U(T_{jc})$	$T_{\Delta}$	$\pm \Delta T_{je}$
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	FFSH10120A	30	2,05	27,8	3,04	30,4	4,2	1,12	1,62
2	C2M0280120D	30	2,05	26,3	4,44	30,5	5,4	1,97	1,62
3	TP90H18PS	30	2,05	25,3	4,67	30,7	6,4	2,10	1,66
4	IRF 9640	30	2,05	27,5	3,90	30,2	4,4	1,66	1,64
5	IRF 9540	30	2,05	27,6	4,78	30,6	4,4	2,16	1,65

**Tabela 22:** Zestawienie wartości dla  $T_{je} = 90\text{ °C}$ .

L.p.	Nazwa elementu	$T_{je}$	$\pm U(T_{je})$	$T_{cc}$	$\pm U(T_{cc})$	$T_{jc}$	$\pm U(T_{jc})$	$T_{\Delta}$	$\pm \Delta T_{je}$
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	FFSH10120A	90	2,66	75,4	3,3	90,4	3,48	1,12	3,25
2	C2M0280120D	90	2,71	71,6	3,3	90,5	4,78	1,97	3,25
3	TP90H18PS	90	2,70	70,0	3,3	90,7	5,00	2,10	3,25
4	IRF 9640	90	2,70	80,3	3,3	90,2	4,27	1,66	3,25
5	IRF 9540	90	2,69	75,9	3,3	90,6	5,10	2,16	3,25

**Tabela 23:** Zestawienie wartości dla  $T_{je} = 120\text{ °C}$ .

L.p.	Nazwa elementu	$T_{je}$	$\pm U(T_{je})$	$T_{cc}$	$\pm U(T_{cc})$	$T_{jc}$	$\pm U(T_{jc})$	$T_{\Delta}$	$\pm \Delta T_{je}$
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	FFSH10120A	120	5,16	98,1	3,3	20,4	5,63	1,12	3,77
2	C2M0280120D	120	5,17	94,5	3,3	20,5	6,50	1,97	3,77
3	TP90H18PS	120	5,17	92,0	3,3	20,7	6,66	2,10	3,77
4	IRF 9640	120	5,15	105,6	3,4	20,2	6,13	1,66	3,77
5	IRF 9540	120	5,18	103,6	3,4	20,6	6,47	2,16	3,77

#### 4. Przykładowe wyniki pomiarów temperatury struktur półprzewodnikowych w obudowach znajdujących się w otwartej przestrzeni lub zabudowanych na radiatorze

W praktycznych zastosowaniach urządzenia półprzewodnikowe montowane są na radiatorze. Umożliwia to poprawę warunków chłodzenia elementu półprzewodnikowego. W przeprowadzonych pracach zbadano, czy na podstawie termowizyjnego pomiaru temperatury radiatora, znajomości rozkładu temperatury w urządzeniu półprzewodnikowym oraz znajomości rozkładu temperatury w radiatorze możliwe jest wyznaczenie temperatury elementu półprzewodnikowego. Przeprowadzone prace składały się z trzech etapów:

- wyznaczenia rozkładu temperatury na powierzchni radiatorów oraz na powierzchni obudów dołączonych urządzeń półprzewodnikowych,
- sprawdzenie poprawności termowizyjnego pomiaru temperatury radiatora,
- porównania temperatury elementu półprzewodnikowego zmierzonej za pomocą metody elektrycznej z temperaturą elementu półprzewodnikowego wyznaczoną za pomocą MES.

W celu wyznaczenia rozkładu temperatury na powierzchni radiatora należało wykonać trójwymiarowe modele przedstawiające radiatory z dołączonymi urządzeniami półprzewodnikowymi. Do przeprowadzonych prac wybrano radiatory o rezystancji termicznej 14 K/W, 13 K/W, 11 K/W, 9 K/W oraz 6,9 K/W. W wyborze kierowano się subiektywną opinią o powszechności użycia poszczególnych rodzajów radiatorów. Wybrano również urządzenia półprzewodnikowe, które użyto w poprzedniej części pracy (FFSH10120A, C2M0280120, TP90H18PS, IRF 9540 oraz IRF 9640). W pierwszym etapie wyznaczono rozkład temperatur na powierzchni analizowanych radiatorów oraz dołączonych obudów urządzeń półprzewodnikowych. Wykonane trójwymiarowe modele urządzeń półprzewodnikowych przymocowanych do radiatorów pokazano na rysunkach 74 – 79. Na radiatorach są widoczne czujniki Pt1000 oraz markery namalowane farbą Velvet Coating 811-21 (których użyto w następnym etapie prac).

- a) Trójwymiarowy model z widocznymi czujnikami Pt1000 oraz markerami namalowanymi farbą Velvet Coating 811-21.      b) Widok radiatora [113].

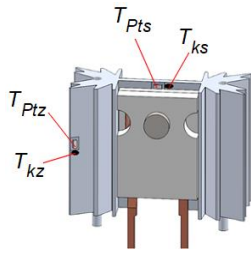


**Rysunek 74:** Radiator RAD-DY-KY/3 o rezystancji termicznej 6,9 K/W z diodą FFSH10120A.



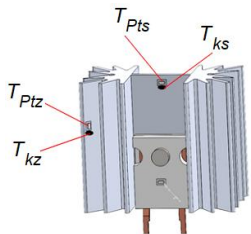
## K. Dziarski *Termowizyjne obserwacje elementów półprzewodnikowych*

- a) Trójwymiarowy model z widocznymi czujnikami Pt1000 oraz markerami namalowanymi farbą Velvet Coating 811-21. b) Widok radiatora [114].



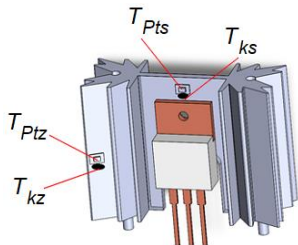
**Rysunek 75:** Radiator SK 104 25,4 STC o rezystancji termicznej 14 K/W z diodą FFSH10120A.

- a) Trójwymiarowy model z widocznymi czujnikami Pt1000 oraz markerami namalowanymi farbą Velvet Coating 811-21. b) Widok radiatora [115].



**Rysunek 76:** Radiator SK 104 50,8 STC o rezystancji termicznej 9 K/W z diodą FFSH10120A.

- a) Trójwymiarowy model z widocznymi czujnikami Pt1000 oraz markerami namalowanymi farbą Velvet Coating 811-21. b) Widok radiatora [116].



**Rysunek 77:** Radiator SK 104 38,1 STC o rezystancji termicznej 11 K/W z tranzystorem IRF 9540 (lub IRF 9640).

- a) Trójwymiarowy model z widocznymi czujnikami Pt1000 oraz markerami namalowanymi farbą Velvet Coating 811-21. b) Widok radiatora [114].



**Rysunek 78:** Radiator SK 104 25,4 STC o rezystancji termicznej 14 K/W z tranzystorem C2M0280120.

- a) Trójwymiarowy model z widocznymi czujnikami Pt1000 oraz markerami namalowanymi farbą Velvet Coating 811-21. b) Widok radiatora [114].



**Rysunek 79:** Radiator SK 104 25,4 STC o rezystancji termicznej 14 K/W z tranzystorem TP90H18PS .

W drugim etapie prowadzonych prac sprawdzono poprawność termowizyjnego pomiaru temperatury powierzchni radiatora. W tym celu temperaturę radiatora zmierzoną za pomocą czujników Pt1000 porównano z temperaturą zmierzoną za pomocą kamery termowizyjnej. Dla każdego typu obudowy i wybranych mocy  $P_j$  wydzielanych w elementach półprzewodnikowych porównano temperatury mierzone za pomocą Pt1000  $T_{Ptz}$  i  $T_{Pts}$  ( $T_{Ptz}$  – temperatura mierzona na żebrze radiatora,  $T_{Pts}$  – temperatura mierzona na środku radiatora) z temperaturami zmierzonymi za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$  i  $T_{ks}$  ( $T_{kz}$  – temperatura mierzona na żebrze,  $T_{ks}$  – temperatura mierzona na środku). Uznano, że wyniki są takie same, gdy ich różnica jest mniejsza niż 2 °C lub 2 % pomiaru termowizyjnego (wartość błędu termowizyjnego pomiaru temperatury).

Umieszczenie czujników Pt1000 na poszczególnych radiatorach pokazano na rysunkach 74 – 79. Termowizyjny pomiar temperatury radiatora wykonano na powierzchni markerów, które pokazano na tych samych rysunkach. W przeprowadzonych pracach wykorzystano stanowisko przedstawione w rozdziale 3.1.1. Wartości mocy  $P_j$ , które zadawano w elemencie półprzewodnikowym w trakcie trwania pomiarów przyjęto arbitralnie. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabelach 24 – 28.

**Tabela 24:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą Pt1000  $T_{Ptz}$ , temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$  temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą Pt1000  $T_{Pts}$  i temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  dla tranzystora IRF 9540 (rezystancja termiczna radiatora 11 K/W).

L.p	P	Żebro		Środek radiatora	
		$T_{Ptz}$	$T_{kz}$	$T_{Pts}$	$T_{ks}$
	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	0,4	27,7	28,3	27,7	28,3
2	0,6	31,3	31,3	31,3	31,3
3	1,0	36,3	36,7	36,3	36,7
4	1,5	40,3	42,4	40,3	42,4
5	1,9	47,6	48,6	47,6	48,6
6	2,5	52,7	53,8	52,7	53,8
7	3,0	56,7	58,2	56,7	58,2
8	3,5	61,5	63,3	61,5	63,3
9	4,3	66,0	68,6	66,0	68,6
10	4,8	68,5	69,4	68,5	72,4
11	5,5	72,8	74,8	75,8	77,8
12	6,2	78,7	80,9	78,7	82,8

**Tabela 25:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą Pt1000  $T_{Ptz}$ , temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$  temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą Pt1000  $T_{Pts}$  i temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  dla tranzystora IRF 9640 (rezystancja termiczna radiatora 11 K/W).

L.p	P	Żebro		Środek radiatora	
		$T_{Ptz}$	$T_{kz}$	$T_{Pts}$	$T_{ks}$
	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	0,8	36,0	36,1	35,0	36,5
2	2,2	50,3	53,1	51,8	53,8
3	3,1	64,9	66,3	66,8	68,4
4	3,7	72,9	74,1	71,4	72,5
5	4,3	78,1	81,7	79,9	82,3

**Tabela 26:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą Pt1000  $T_{Ptz}$ , temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$  temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą Pt1000  $T_{Pts}$  i temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  dla tranzystora C2M0280120 (rezystancja termiczna radiatora 14 K/W).

L.p	P	Żebro		Środek radiatora	
		$T_{Ptz}$	$T_{kz}$	$T_{Pts}$	$T_{ks}$
	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	1,6	45,1	44,2	46,7	44,8
2	3,3	66,5	64,1	68,8	66,3
3	5,2	88,5	87,2	90,0	87,1

**Tabela 27:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą Pt1000  $T_{Ptz}$ , temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$  temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą Pt1000  $T_{Pts}$  i temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  dla tranzystora TP90H18PS (rezystancja termiczna radiatora 11 K/W).

L.p	P	Żebro		Środek radiatora	
		$T_{Ptz}$	$T_{kz}$	$T_{Pts}$	$T_{ks}$
	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	0,7	34,6	35,9	33,8	36,4
2	0,9	36,9	38,1	35,2	38,6
3	1,5	44,5	47,2	26,3	48,0
4	2,3	54,8	57,2	56,8	58,4
5	3,1	65,8	66,4	65,9	67,8
6	5,0	83,7	86,0	85,2	87,9

**Tabela 28:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą Pt1000  $T_{Ptz}$ , temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$  temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą Pt1000  $T_{Pts}$  i temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  dla tranzystora FFSH10120A (rezystancja termiczna radiatora 13 K/W).

L.p	P	Żebro		Środek radiatora	
		$T_{Ptz}$	$T_{kz}$	$T_{Pts}$	$T_{ks}$
	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	0,5	29,1	29,9	29,5	30,1
2	1,0	37,4	39,1	38,0	39,4
3	1,7	46,0	48,5	46,7	49,0
4	2,3	53,6	57,0	54,9	57,6
5	3,1	62,3	66,1	63,2	66,9
6	3,8	70,3	75,3	71,6	76,1
7	4,7	79,0	84,6	78,8	85,6

W ostatnim trzecim etapie prowadzonych prac wartość temperatury elementu półprzewodnikowego wyznaczoną za pomocą MES porównano z wartością temperatury zmierzonej za pomocą metody elektrycznej. Wykorzystano układy pomiarowe przedstawione na rysunkach 62 – 64 oraz metodę pomiaru wartości  $T_j$  opisaną w rozdziale 3.4. W przypadku każdego z badanych urządzeń półprzewodnikowych wykorzystano wartość prądu  $I_M$  oraz zależność pomiędzy  $T_j$  i TSP, które wyznaczono w rozdziale 3.4. W tabelach 29 – 35 zestawiono wartości termowizyjnego pomiaru temperatury radiatora  $T_{kz}$ , termowizyjnego pomiaru temperatury środka radiatora  $T_{ks}$ , temperatury elementu półprzewodnikowego zmierzonej elektrycznie  $T_{je}$  oraz otrzymanymi za pomocą MES temperaturą żebra radiatora  $T_{sz}$ , temperatury środka radiatora  $T_{ss}$ , i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{js}$ .

**Tabela 29:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$ , temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{je}$  otrzymanej metodą elektryczną oraz otrzymanymi za pomocą MES temperatury żebra radiatora  $T_{sz}$ , temperatury środka radiatora  $T_{ss}$ , i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{js}$  dla tranzystora IRF 9540 (rezystancja termiczna radiatora = 11 K/W). Wyniki otrzymane dla mocy  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym równej 6,17 W.

Temperatura żebra radiatora		Temperatura środka radiatora		Temperatura elementu półprzewodnikowego	
Zmierzona termowizyjnie $T_{kz}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{sz}$	Zmierzona termowizyjnie $T_{ks}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{ss}$	Zmierzona metoda elektryczną $T_{je}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{js}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
80,9	80,6	82,80	82,5	90,0	89,6

**Tabela 30:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$ , temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{je}$  otrzymanej metodą elektryczną oraz otrzymanymi za pomocą MES temperatury żebra radiatora  $T_{sz}$ , temperatury środka radiatora  $T_{ss}$ , i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{js}$  dla tranzystora IRF 9640 (rezystancja termiczna radiatora = 11 K/W). Wyniki otrzymane dla mocy  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym równej 4,28 W.

Temperatura żebra radiatora		Temperatura środka radiatora		Temperatura elementu półprzewodnikowego	
Zmierzona termowizyjnie $T_{kz}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{sz}$	Zmierzona termowizyjnie $T_{ks}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{ss}$	Zmierzona metoda elektryczną $T_{je}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{js}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
81,7	82,3	82,3	83,4	87,5	88,6

**Tabela 31:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$ , temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{je}$  otrzymanej metodą elektryczną oraz otrzymanymi za pomocą MES temperatury żebra radiatora  $T_{sz}$ , temperatury środka radiatora  $T_{ss}$ , i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{js}$  dla tranzystora C2M0280120 (rezystancja termiczna radiatora 14 K/W). Wyniki otrzymane dla mocy  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym równej 5,23 W.

Temperatura żebra radiatora		Temperatura środka radiatora		Temperatura elementu półprzewodnikowego	
Zmierzona termowizyjnie $T_{kz}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{sz}$	Zmierzona termowizyjnie $T_{ks}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{ss}$	Zmierzona metoda elektryczną $T_{je}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{js}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
87,2	87,9	87,10	88	102,1	103,2

**Tabela 32:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$ , temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{je}$  otrzymanej metodą elektryczną oraz otrzymanymi za pomocą MES temperatury żebra radiatora  $T_{sz}$ , temperatury środka radiatora  $T_{ss}$ , i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{js}$  dla tranzystora TP90H18PS (rezystancja termiczna radiatora 11 K/W). Wyniki otrzymane dla mocy  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym równej 4,99 W.

Temperatura żebra radiatora		Temperatura środka radiatora		Temperatura elementu półprzewodnikowego	
Zmierzona termowizyjnie $T_{kz}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{sz}$	Zmierzona termowizyjnie $T_{ks}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{ss}$	Zmierzona metoda elektryczną $T_{je}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{js}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
86,0	84,9	87,9	87,1	95,2	94,9

**Tabela 33:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$ , temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{je}$  otrzymanej metodą elektryczną oraz otrzymanymi za pomocą MES temperatury żebra radiatora  $T_{sz}$ , temperatury środka radiatora  $T_{ss}$ , i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{js}$  dla diody TP90H18PS FFSH10120A (rezystancja termiczna radiatora 11 K/W). Wyniki otrzymane dla mocy  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym równej 4,72 W.

Temperatura żebra radiatora		Temperatura środka radiatora		Temperatura elementu półprzewodnikowego	
Zmierzona termowizyjnie $T_{kz}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{sz}$	Zmierzona termowizyjnie $T_{ks}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{ss}$	Zmierzona metoda elektryczną $T_{je}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{js}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
86,0	84,9	87,9	87,1	95,2	94,9

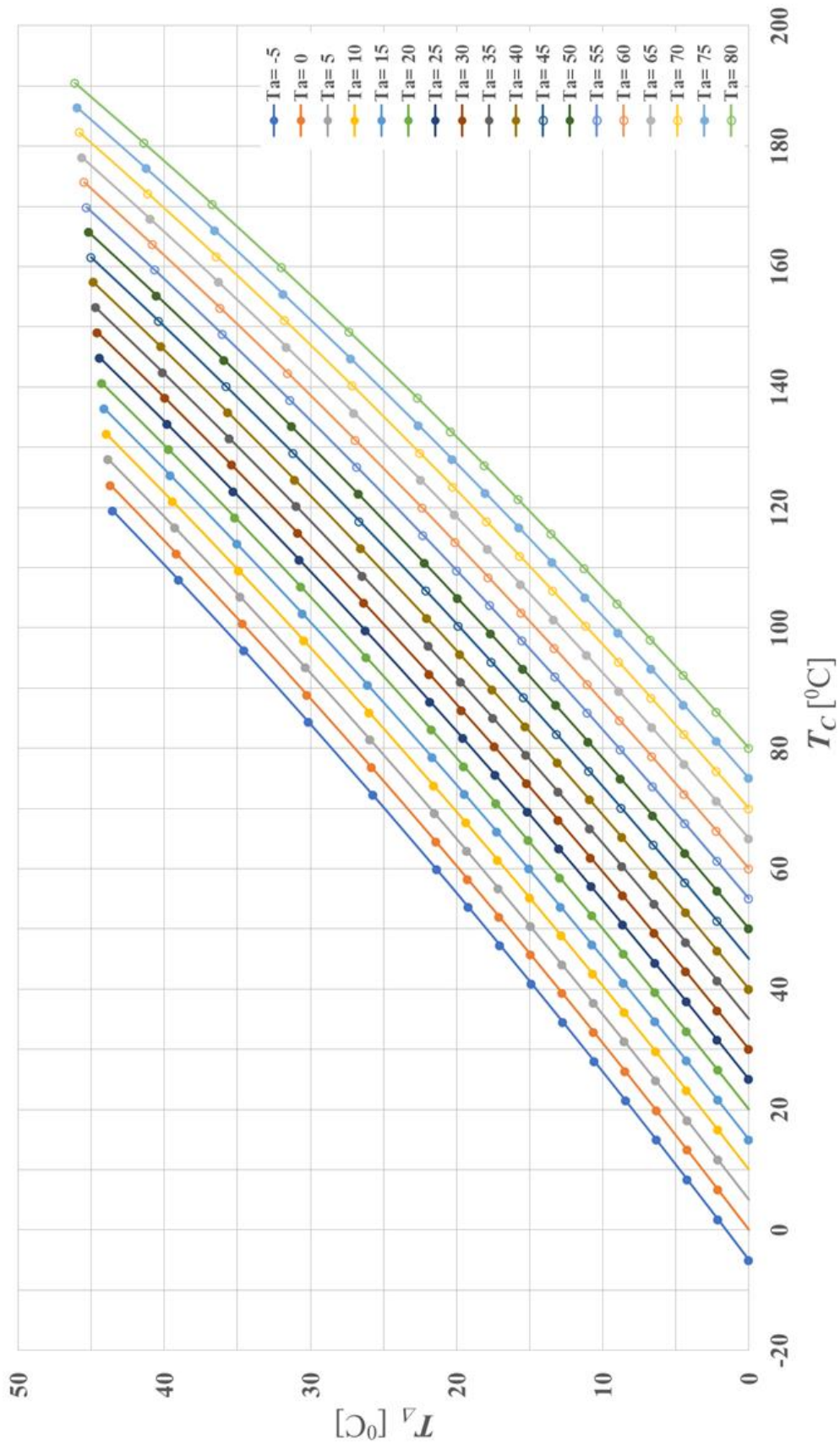
**Tabela 34:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$ , temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{je}$  otrzymanej metodą elektryczną oraz otrzymanymi za pomocą MES temperatury żebra radiatora  $T_{sz}$ , temperatury środka radiatora  $T_{ss}$ , i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{js}$  dla diody TP90H18PS FFSH10120A (rezystancja termiczna radiatora 13 K/W). Wyniki otrzymane dla mocy  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym równej 4,72 W.

Temperatura żebra radiatora		Temperatura środka radiatora		Temperatura elementu półprzewodnikowego	
Zmierzona termowizyjnie $T_{kz}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{sz}$	Zmierzona termowizyjnie $T_{ks}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{ss}$	Zmierzona metoda elektryczną $T_{je}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{js}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
50,1	50,2	50,1	50,9	57,4	57,8

**Tabela 35:** Zestawienie temperatury radiatora mierzonej na żebrze za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{kz}$ , temperatury radiatora mierzonej na środku za pomocą kamery termowizyjnej  $T_{ks}$  i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_j$  oraz otrzymanymi za pomocą MES temperatury żebra radiatora  $T_{sz}$ , temperatury środka radiatora  $T_{ss}$ , i temperatury elementu półprzewodnikowego  $T_{js}$  dla diody TP90H18PS FFSH10120A (rezystancja termiczna radiatora 14 K/W). Wyniki otrzymane dla mocy  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym równej 4,72 W.

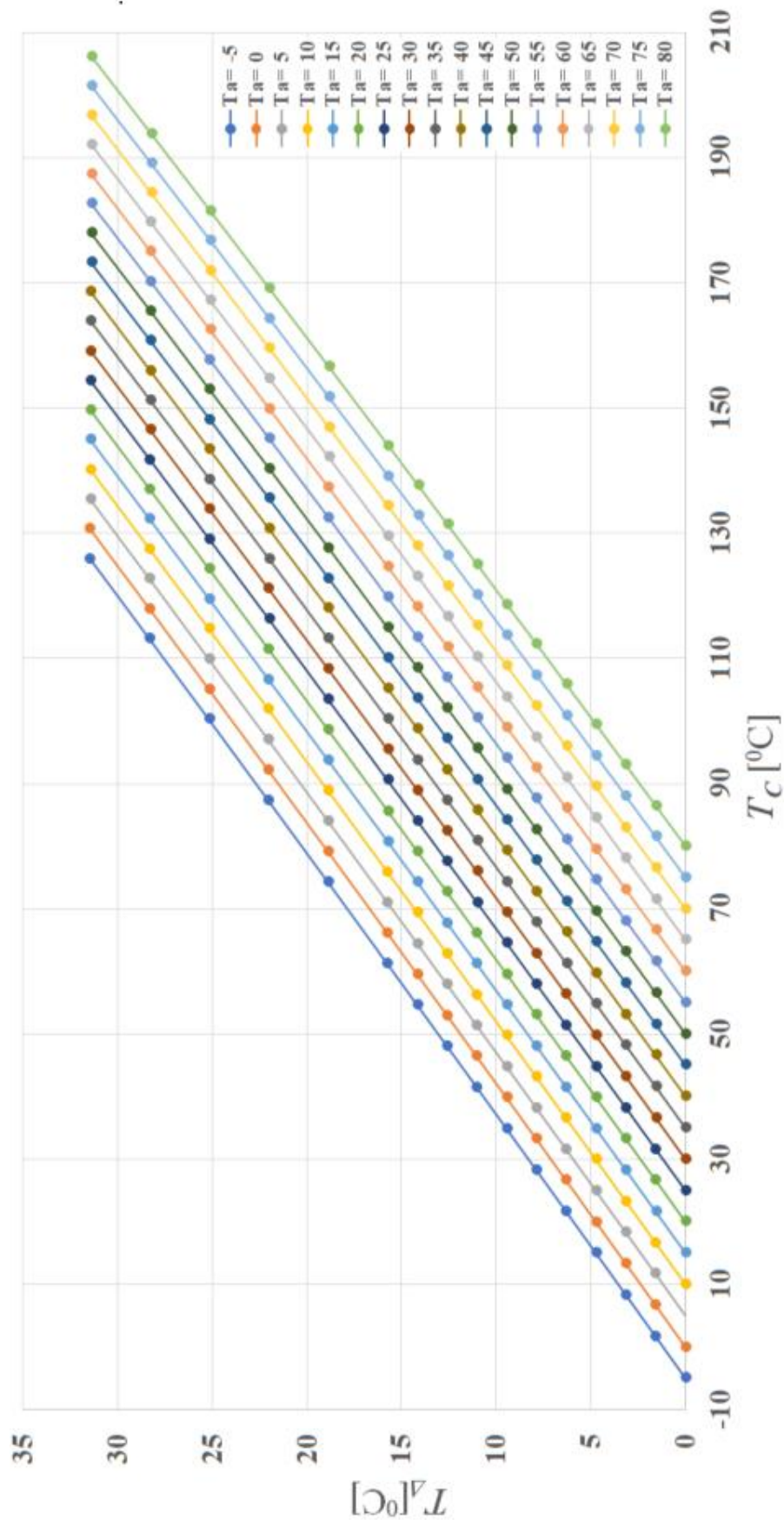
Temperatura żebra radiatora		Temperatura środka radiatora		Temperatura elementu półprzewodnikowego	
Zmierzona termowizyjnie $T_{kz}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{sz}$	Zmierzona termowizyjnie $T_{ks}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{ss}$	Zmierzona metoda elektryczną $T_{je}$	Otrzymana za pomocą MES $T_{js}$
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
40,4	50,5	39,1	39,6	48,1	47,8

W celu wyznaczenia zależności  $T_A = T_j - T_C = f(T_C)$  przeprowadzono prace symulacyjne. Otrzymane rezultaty przedstawiono na rysunkach 80 – 84.

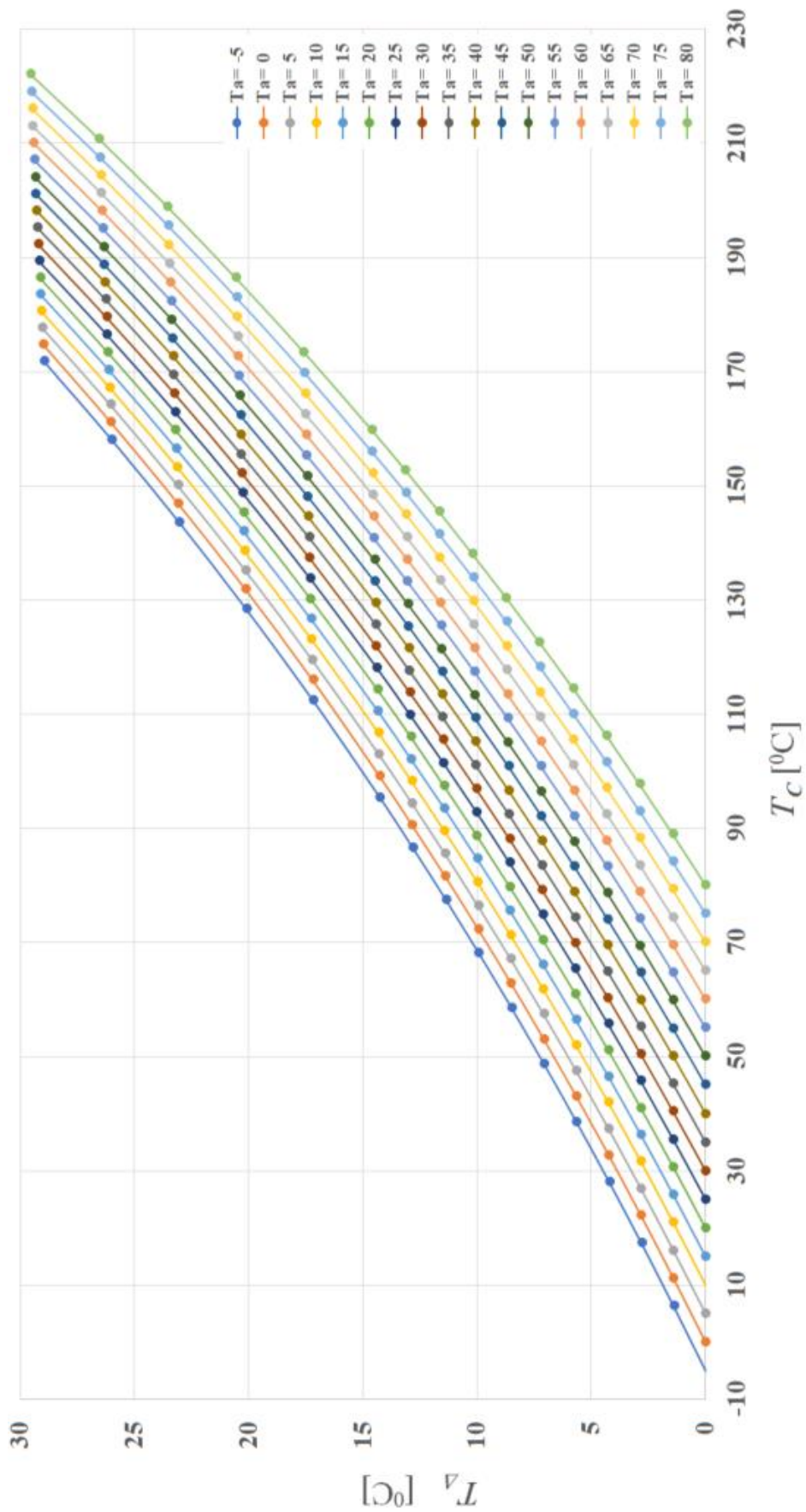


Rysunek 80: Zależności  $T_j = T_c + f(T_c)$  dla diody FFSH10120A.

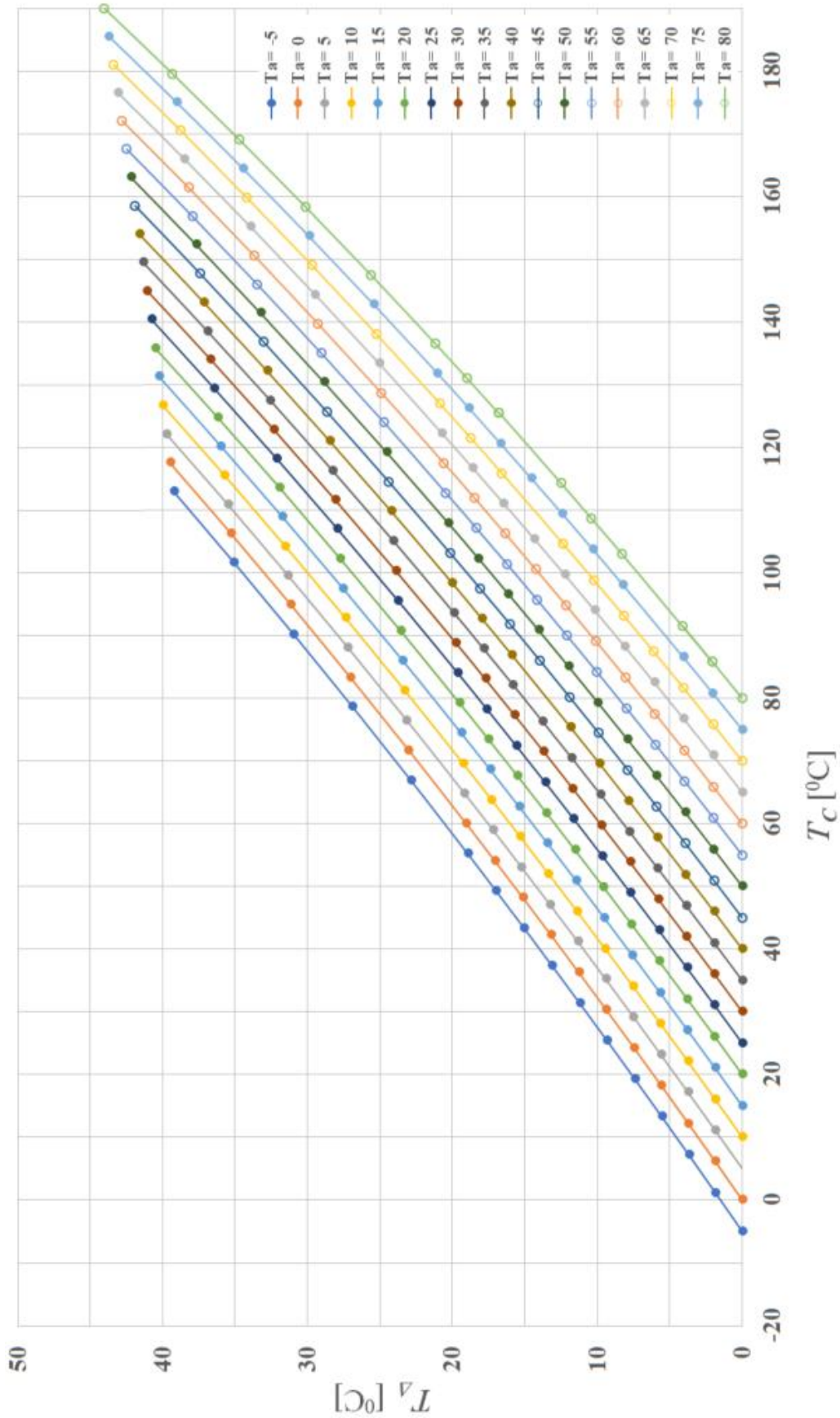




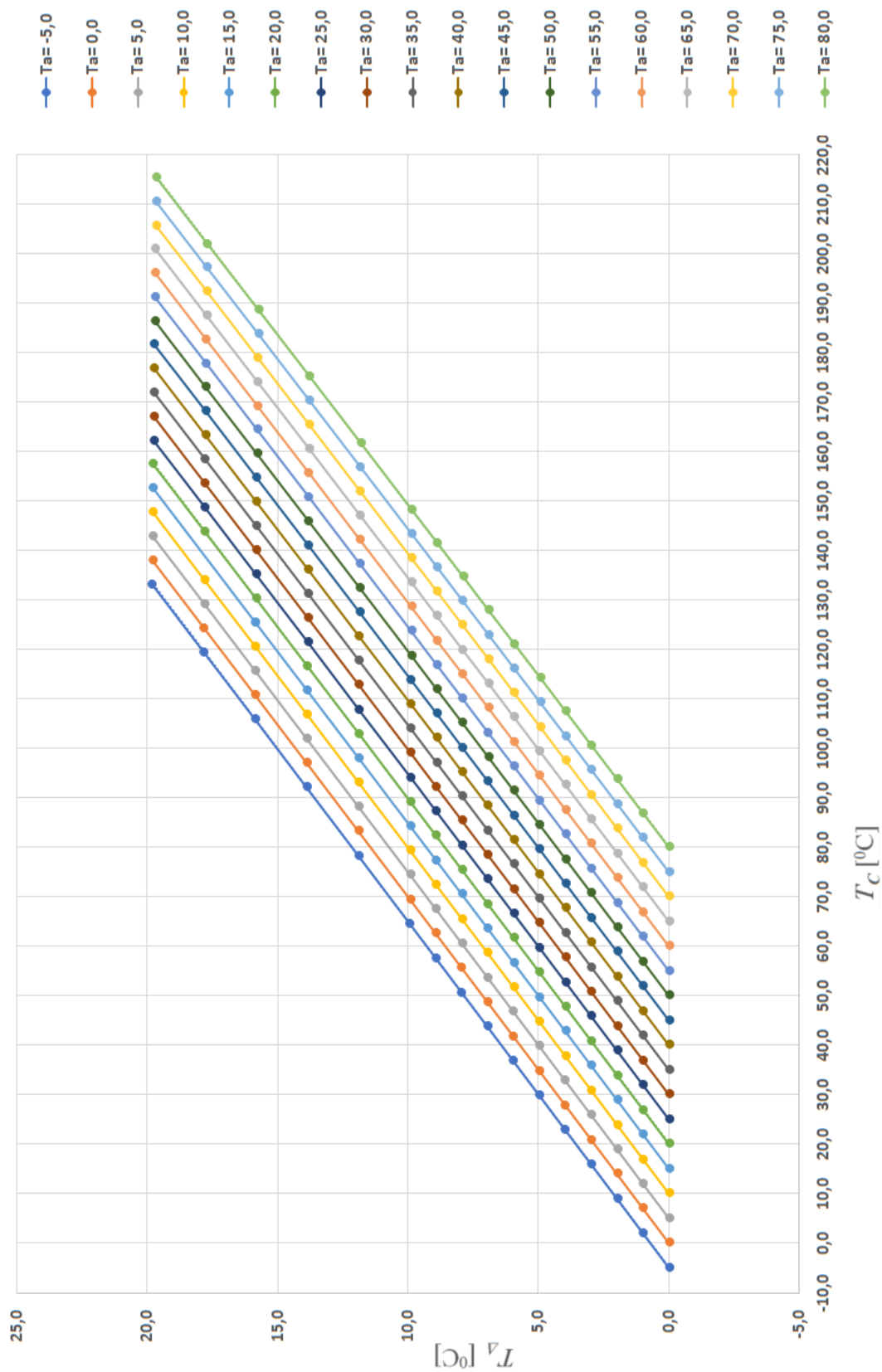
Rysunek 81: Zależności  $T_j = T_c + f(T_c)$  dla tranzystora C2M0280120.



Rysunek 82: Zależności  $T_d = T_j - T_c = f(T_c)$  dla tranzystora TP90H18PS.



Rysunek 83: Zależności  $T_j = T_c + f(T_c)$  dla tranzystora IRF 9640.



Rysunek 84: Zależności  $T_j = T_c + T_a = f(T_c)$  dla tranzystora IRF 9540.

Krzywe przedstawione na rysunkach 80-84 aproksymowano za pomocą (65).

$$T_{\Delta} = (a_1 \cdot T_a + b_1) \cdot T_c + (a_2 \cdot T_a + b_2) \quad (65)$$

Wartości współczynników  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$  oraz wyznaczone wartości błędów aproksymacji przedstawiono w tabeli 36.

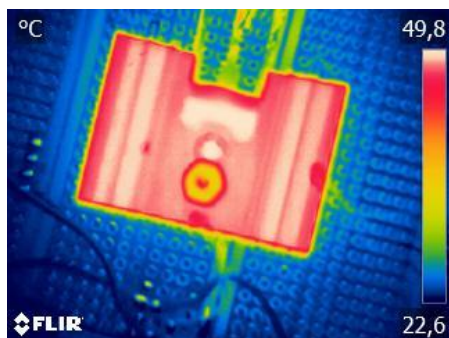
**Tabela 36:** Wartości współczynników  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$  oraz wyznaczone wartości błędów aproksymacji dla analizowanych urządzeń półprzewodnikowych.

L.p	Element	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	Błąd aproksymacji
		[1/°C]	[-]	[-]	[°C]	[°C]
1	FFSH10120A	0,000792	0,350	-0,413	-0,1310	1,38
2	C2M0280120	0,000447	0,392	-0,417	-0,5300	0,90
3	TP90H18PS	0,000760	0,447	-0,503	-0,6350	1,66
4	IRF 9649	0,000783	0,333	-0,395	-0,0136	1,28
5	IRF 9540	0,000785	0,385	-0,448	0,0555	1,21

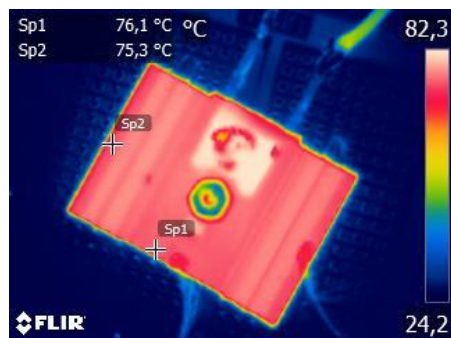
Przykładowe termogramy zarejestrowane w trakcie wykonywanych prac pokazano na rysunku 85.



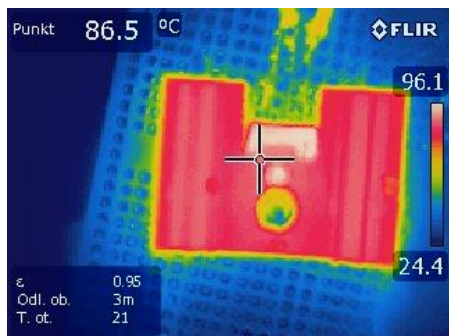
a) Rozkład temperatury na radiatorze SK 104 38,1 STC (rezystancja termiczna 11 K/W), do którego przymocowano tranzystor C2M0280120.



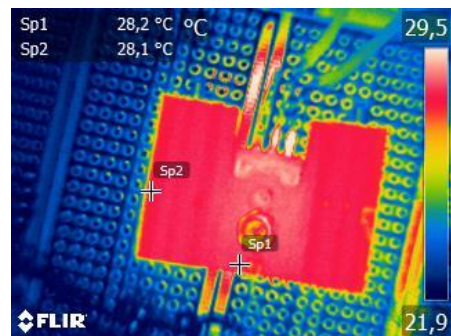
b) Rozkład temperatury na radiatorze SK 104 38,1 STC (rezystancja termiczna 11 K/W), do którego przymocowano diodę FFSH10120A.



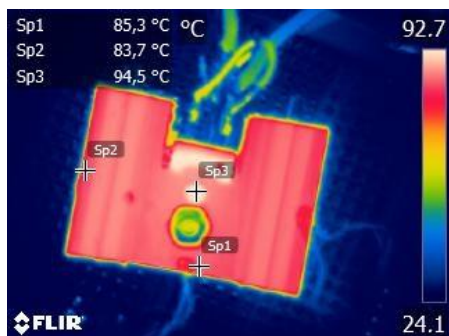
c) Rozkład temperatury na radiatorze SK 104 38,1 STC (rezystancja termiczna 11 K/W), do którego przymocowano tranzystor TP90H18PS.



d) Rozkład temperatury na radiatorze SK 104 38,1 STC (rezystancja termiczna 11 K/W), do którego przymocowano tranzystor IRF 9540.



e) Rozkład temperatury na radiatorze SK 104 38,1 STC (rezystancja termiczna 11 K/W), do którego przymocowano tranzystor IRF 9640.



**Rysunek 85:** Przykładowe termogramy urządzeń półprzewodnikowych umieszczonych na radiatorach, które zarejestrowano w trakcie wykonywanych prac.

## 5. Podsumowanie

Termowizja w podczerwieni jest powszechnie stosowaną metodą, która umożliwia wykonanie pomiaru temperatury wybranej powierzchni, w tym powierzchni obudowy urządzenia półprzewodnikowego. W normalnych warunkach pracy dostęp do jego wewnętrznych struktur, w tym do elementu półprzewodnikowego jest utrudniony. Z tego powodu podjęto się prac, których głównym celem było wykonanie pośredniego termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego.

Przeprowadzono analizę istniejących metod pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych. Wybrano i dostosowano te, dzięki którym możliwe było wykonanie pośredniego, termowizyjnego pomiaru temperatury elementów półprzewodnikowych. Opisano sposób wykonania pomiaru oraz warunki, które należy spełnić, by wykonany pomiar był poprawny. Dokonano analizy czynników, które wpływają na wielkość pośredniego termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego oraz skonstruowano budżet niepewności.

W pośrednim termowizyjnym pomiarze temperatury elementu półprzewodnikowego konieczne jest wykonanie termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego oraz wyznaczenie temperatury tego elementu na podstawie znanego rozkładu temperatury urządzenia półprzewodnikowego wyznaczonego za pomocą MES (Metody Elementów Skończonych). Dowiedziono, że możliwe jest wykorzystanie tej metody dla elementów półprzewodnikowych wykonanych na bazie krzemu, węgliku krzemu i azotku galu oraz hybrydowego elementu półprzewodnikowego.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że postawiona teza została udowodniona. Najważniejsze cele, które zrealizowano to:

- Zbadano oddziaływanie czynników wpływających na wynik termowizyjnego pomiaru temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego dla odległości pomiędzy obiektywem kamery i tą obudową mniejszej niż 43 mm.
- Wykazano, że największa wartość mocy  $P_j$  wydzielonej w elemencie półprzewodnikowym, dla której nie obserwuje się wzrostu temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego jest mniejsza od jednego procenta maksymalnej mocy możliwej do wydzielenia  $P_{jmax}$  w kierunku przewodzenia.
- Dla każdego badanego elementu półprzewodnikowego wyznaczono zależność pomiędzy jego temperaturą i wybranym parametrem termoczułym (TSP).
- Określono wymiary wewnętrzne badanych urządzeń półprzewodnikowych.
- Na podstawie pozyskanych wymiarów opracowano modele badanych urządzeń półprzewodnikowych (w tym umieszczonych na radiatorach).
- Wykorzystując opracowane modele oraz MES uzyskano rozkłady temperatury w obudowach badanych urządzeń półprzewodnikowych (oraz w dołączonych radiatorach).
- Wykorzystując uzyskane rozkłady temperatur oraz informacje literaturowe o budowie urządzeń półprzewodnikowych określono punkt, w którym należy wykonać termowizyjny pomiar temperatury obudowy tego urządzenia

- Pokazano, że możliwe jest wykonanie pośredniego, termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego skonstruowanego na bazie Si, SiC oraz hybrydowego (Si- MOSFET – GaN JFET).
- Wyniki otrzymane na podstawie pośredniego termowizyjnego pomiaru temperatury elementu półprzewodnikowego porównano z wynikami otrzymanymi za pomocą metody elektrycznej.
- Otrzymane za pomocą MES rozkłady temperatur na powierzchni obudowy urządzenia półprzewodnikowego (oraz powierzchni radiatora) porównano z wynikami pomiarów termowizyjnych oraz stykowego pomiaru temperatury (pomiar za pomocą Pt1000).

Stwierdzono, że różnica pomiędzy temperaturą elementu półprzewodnikowego i termowizyjnie zmierzoną wartością temperatury obudowy urządzenia półprzewodnikowego jest zależna od mocy, którą wydzielono w elemencie półprzewodnikowym oraz temperatury otoczenia. Prace prowadzono w temperaturze otoczenia równej 20°C. Zarejestrowana w tych warunkach różnica wynosiła od 3,60°C (dla  $T_j = 44,6^\circ\text{C}$ ) do 44,40°C (dla  $T_j = 117,9^\circ\text{C}$ ). Można również zauważyć wpływ materiału, z którego wykonano element półprzewodnikowy na wspomnianą różnicę temperatur. Największe różnice pomiędzy temperaturą złącza i termowizyjnie zmierzoną temperaturą obudowy zarejestrowano dla elementu półprzewodnikowego wykonanego z krzemu, natomiast najmniejsze dla elementów półprzewodnikowych wykonanych z węgliku krzemu.

Podstawę przyjętego warsztatu naukowego stanowiły znane metody wyznaczania temperatury elementu półprzewodnikowego, stykowego pomiaru temperatury obudowy elementu półprzewodnikowego oraz termowizyjne pomiary temperatury tej obudowy. W celu wyznaczenia rozkładu temperatury w obudowach elementów półprzewodnikowych stosowano Metodę Elementów Skończonych.

Informacja o temperaturze elementu półprzewodnikowego, który jest umieszczony w działającym urządzeniu jest ważną informacją. Poprawne wyznaczenie tej temperatury umożliwia przewidzenie awarii i takie zaplanowanie naprawy urządzenia, by zminimalizować koszty związane z brakiem działania tego urządzenia. Możliwa jest również weryfikacja poprawności doboru radiatora do urządzenia półprzewodnikowego, w konsekwencji czego możliwy jest dobór takiego radiatora, który umożliwi pracę z odpowiednią temperaturą i nie jest przewymiarowany.

Dalsze prace będą polegały na udoskonaleniu opracowanej metody wyznaczania temperatury elementu półprzewodnikowego poprzez zbadanie elementów półprzewodnikowych umieszczonych w obudowach innego typu, w tym umieszczonych na innych radiatorach z konwekcją naturalną lub wymuszoną.



## Bibliografia

1. Jäger, Jonas, *et al.* "Contacting inkjet-printed silver structures and SMD by ICA and solder." *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 12.7 (2022): 1232-1240.
2. Sobolewski, Maciej, *et al.* "Solder joints reliability of through hole assemblies with various land and hole design." *Microelectronics Reliability* 125 (2021): 114368.
3. Blackmore, Byron. "Automatic calibration of detailed IC package models." *2016 32<sup>nd</sup> Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM)*. IEEE, 2016.
4. Anthon, Alexander, *et al.* "Switching investigations on a SiC MOSFET in a TO-247 package." *IECON 2014-40<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2014.
5. Rodov, Vladimir, and Alexei L. Ankoudinov. "Super barrier rectifier—A new generation of power diode." *IEEE Transactions on Industry Applications* 44.1 (2008): 234-237.
6. Rybalka, S. B., *et al.* "Determination of dV/dt and dI/dt characteristics for high voltage 4H-SiC Schottky diodes with different types of metal-polymeric packages." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1679. No. 2. IOP Publishing, 2020.
7. Piumatti, Davide, *et al.* "Testing heatsink faults in power transistors by means of thermal model." *2020 IEEE Latin-American Test Symposium (LATS)*. IEEE, 2020.
8. Skarolek, Pavel, and Jiří Lettl. "Gan transistors cooling options comparison." *2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)*. IEEE, 2019.
9. TO 220, [https://fscdn.rohm.com/en/techdata\\_basic/diode/dimension/Dimension\\_TO-220AC-e.pdf](https://fscdn.rohm.com/en/techdata_basic/diode/dimension/Dimension_TO-220AC-e.pdf), dostęp: 8.10.2023
10. TO 247, <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/design-development/package/detail.TO-247.html>, dostęp 8.10.2023
11. TO 247, <https://www.infineon.com/s/en/product/packages/PG-TO247/PG-TO247-3-21/>, dostęp: 8.10.2023
12. TO 220, <https://www.infineon.com/cms/en/product/packages/PG-TO220/PG-TO220-3-1/>, dostęp 8.10.2023
13. Jeong, Haksan, *et al.* "Effect of epoxy mold compound and package dimensions on the thermomechanical properties of a fan-out package." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 31 (2020): 6835-6842.
14. Braun, Tanja, *et al.* "Fan-out wafer level packaging of GaN components for RF applications." *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. IEEE, 2020.
15. TO 247, [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TO-247-3\\_Advanced\\_Isolation-ApplicationNotes-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d4625fe367840160021aeb971416](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TO-247-3_Advanced_Isolation-ApplicationNotes-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d4625fe367840160021aeb971416), dostęp: 8.10.2023
16. PCB, [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Discrete\\_IGBT\\_in\\_TO-247PLUS-AN-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d46249cd10140149e0c7fe9d56c7](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Discrete_IGBT_in_TO-247PLUS-AN-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d46249cd10140149e0c7fe9d56c7), dostęp: 8.10.2023
17. Wu, Xiuqian, *et al.* "Improvement of inter layer dielectric crack for LQFP C90FG wafer technology devices in copper wire bonding process." *Microelectronics International* 39.1 (2022): 14-21.
18. Elangovan, Surya, J. Lin, and C. S. Heng. "Reliability characterization of Gallium Nitride (GaN) HEMT cascode switch for power electronics applications." *Sixteenth International Conference on Flow Dynamics*. 2020.
19. TP 90H180, <https://www.mouser.pl/new/transphorm/transphorm-tp90h180ps-fet/>, dostęp 8.10.2023
20. Chen, Rui, *et al.* "Research on the synergistic effect of total ionization and displacement dose in GaN HEMT using neutron and gamma-ray irradiation." *Nanomaterials* 12.13 (2022): 2126.
21. JESD 51, <https://www.jedec.org>, dostęp: 5.12.2022

22. Avenas, Yvan, Laurent Dupont, and Zoubir Khatir. "Temperature measurement of power semiconductor devices by thermo-sensitive electrical parameters—A review." *IEEE transactions on power electronics* 27.6 (2011): 3081-3092.
23. JESD 51-53, <https://www.jedec.org>, dostęp: 5.12.2022
24. Blackburn, David L. "A review of thermal characterization of power transistors." *Fourth Annual IEEE Semiconductor Thermal and Temperature Measurement Symposium*. IEEE, 1988.
25. Baliga, J. Modern Power Devices, John Wiley and Sons, Inc., 1987, <https://www.osti.gov/biblio/6719122> , dostęp 5.12.2022
26. Poppe, András, *et al.* "Multi-domain modelling of LEDs for supporting virtual prototyping of luminaires." *Energies* 12.10 (2019): 1909.
27. Khatir, Zoubir. "Junction temperature investigations based on a general semi-analytical formulation of forward voltage of power diodes." *IEEE transactions on electron devices* 59.6 (2012): 1716-1722.
28. Blackburn, David L. "Temperature measurements of semiconductor devices-a review." *Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37545)*. IEEE, 2004.
29. Sun, Qi-Jun, Xu Gao, and Sui-Dong Wang. "Understanding temperature dependence of threshold voltage in pentacene thin film transistors." *Journal of Applied Physics* 113.19 (2013).
30. Shockley, William. "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors." *Bell system technical journal* 28.3 (1949): 435-489.
31. Yang, E. S.; Yang, Y.F.; Hsu, C. C.; Ou, H. J.; Lo, H. N.; Temperature dependence of current gain of GaInP/GaAs heterojunction and heterostructure-emitter bipolar transistors, in *IEEE Transactions on Electron Devices* 1999, vol. 46, no. 2, pp. 320-323. doi: 10.1109/16.740896.
32. Barlini, Davide, *et al.* "Measurement of the transient junction temperature in MOSFET devices under operating conditions." *Microelectronics Reliability* 47.9-11 (2007): 1707-1712.
33. Threshold voltahe data analysis, <https://electronics.stackexchange.com/questions/333725/threshold-voltage-data-analysis>, dostęp: 5.12.2022
34. Yan, Dong, and D. Brian Ma. "A monolithic GaN power IC with on-chip gate driving, level shifting, and temperature sensing, achieving direct 48-V/1-V DC–DC conversion." *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 57.12 (2022): 3865-3876.
35. Soldati, Alessandro, *et al.* "Device-sensor assembly FEA modeling to support kalman-filter-based junction temperature monitoring." *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 7.3 (2019): 1736-1747.
36. Salem, Thomas E., Dimeji Ibitayo, and Bruce R. Geil. "A Technique for Die Surface Temperature Measurement of High-Voltage Power Electronic Components using Coated Thermocouple Probes." *2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. IEEE, 2006.
37. Weil, Edward D., and Sergei Levchik. "A review of current flame retardant systems for epoxy resins." *Journal of fire sciences* 22.1 (2004): 25-40.
38. Dziarski, K., Hulewicz, A., Dombek, G., & Drużyński, Ł. (2022). Indirect Thermographic Temperature Measurement of a Power-Rectifying Diode Die. *Energies*, 15(9), 3203.
39. Jeon, Jei Gyeong, *et al.* "High-Precision Ionic Thermocouples Fabricated Using Potassium Ferri/Ferrocyanide and Iron Perchlorate." *Advanced Electronic Materials* 8.5 (2022): 2100693.
40. Lima, Hugo V., *et al.* "Temperature assessment when milling AISI D2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation." *Applied Thermal Engineering* 143 (2018): 532-541.
41. Aszodi, G., *et al.* "High resolution thermal mapping of microcircuits using nematic liquid crystals." *Solid-State Electronics* 24.12 (1981): 1127-1133.

42. Popov, V. M.; Klimenko, A. S.; Pokanevich, A. P.; Gavrilyuk, I. I.; Moshel, N. V. Liquid-crystal thermography of hot spots on electronic components. *Russian Microelectronics* 2007, 36(6), 392-401. doi: 10.1134/S1063739707060066
43. Park, Jeong H., and Chin C. Lee. "A new configuration of nematic liquid crystal thermography with applications to GaN-based devices." *IEEE transactions on instrumentation and measurement* 55.1 (2006): 273-279.
44. Popov, V. M., *et al.* "Liquid-crystal thermography of hot spots on electronic components." *Russian Microelectronics* 36 (2007): 392-401.
45. Lee, Chin C., and Jeong Park. "Temperature measurement of visible light-emitting diodes using nematic liquid crystal thermography with laser illumination." *IEEE Photonics Technology Letters* 16.7 (2004): 1706-1708.
46. Burgess, David, and Peng Tan. "Improved sensitivity for hot spot detection using liquid crystals." *22nd International Reliability Physics Symposium*. IEEE, 1984.
47. Hiatt, John. "A method of detecting hot spots on semiconductors using liquid crystals." *19th International Reliability Physics Symposium*. IEEE, 1981.
48. Strona Internetowa kryształu termometrycznego, <https://www.led-professional.com/products/led-production-test-equipment/surface-thermography-liquid-crystals-reveal-hot-spots-in-electronic-devices>, dostęp: 22.04.2023,
49. Aldén, Marcus, *et al.* "Thermographic phosphors for thermometry: a survey of combustion applications." *Progress in energy and combustion science* 37.4 (2011): 422-461.
50. Brübach, Jan, *et al.* "On surface temperature measurements with thermographic phosphors: a review." *Progress in Energy and Combustion Science* 39.1 (2013): 37-60.
51. Zalety kamer termowizyjnych z LWIR SLS, online: [http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND\\_077/RND\\_077\\_US.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_077/RND_077_US.pdf), dostęp: 5.12.2022
52. Tran, Quang Huy, *et al.* "Effects of ambient temperature and relative humidity on subsurface defect detection in concrete structures by active thermal imaging." *Sensors* 17.8 (2017): 1718.
53. Schuss, Christian, *et al.* "Detecting defects in photovoltaic cells and panels with the help of time-resolved thermography under outdoor environmental conditions." *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. IEEE, 2020.
54. Chakraborty, Biswajit, and Billol Kumar Sinha. "Process-integrated steel ladle monitoring, based on infrared imaging—a robust approach to avoid ladle breakout." *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 17.3 (2020): 169-191.
55. Takahata, Tomoyuki. "Coaxiality evaluation of coaxial imaging system with concentric silicon-glass hybrid lens for thermal and color imaging." *Sensors* 20.20 (2020): 5753.
56. Chakraborty, Biswajit, and Billol Kumar Sinha. "Process-integrated steel ladle monitoring, based on infrared imaging—a robust approach to avoid ladle breakout." *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 17.3 (2020): 169-191.
57. Takahata, Tomoyuki. "Coaxiality evaluation of coaxial imaging system with concentric silicon-glass hybrid lens for thermal and color imaging." *Sensors* 20.20 (2020): 5753.
58. Wollack, Edward J., *et al.* "Infrared properties of high-purity silicon." *Optics Letters* 45.17 (2020): 4935-4938.
59. Singh, Jaspreet, and Ajat Shatru Arora. "Effectiveness of active dynamic and passive thermography in the detection of maxillary sinusitis." *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 18.4 (2021): 213-225.
60. Lancaster, P. E., *et al.* "Emissivity evaluation of human enamel and dentin." *Frontiers in Physiology* 13 (2022): 993674.
61. Flir manual, <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-exx-series-user-manual.pdf>, dostęp 8.10.2023

62. Minkina, Waldemar, and Daniel Klecha. "Atmospheric transmission coefficient modelling in the infrared for thermovision measurements." *Journal of Sensors and Sensor Systems* 5.1 (2016): 17-23.
63. Minkina, W., and S. Dudzik. "Simulation analysis of uncertainty of infrared camera measurement and processing path." *Measurement* 39.8 (2006): 758-763.
64. Minkina, W., and D. Klecha. "1.4-Modeling of Atmospheric Transmission Coefficient in Infrared for Thermovision Measurements." *Proceedings IRS<sup>2</sup> 2015* (2015): 903-907.
65. Więcek, B.: *Thermovision in infrared – basics and applications*, Measurement Automation Monitoring Publishing House, Warszawa, 372 pp., ISBN: 978-83-926319-7-2 (in Polish), 2011.
66. Minkina, Waldemar, and Sebastian Dudzik. *Infrared thermography: errors and uncertainties*. John Wiley & Sons, 2009.
67. transmitancja soczewki krzemowej, <https://www.reading.ac.uk/infrared/technical-library/cadmium-telluride-cdte/silicon-si>, dostęp: 8.10.2023,
68. Muniz, Pablo R., Shirley PN Cani, and Robson da S. Magalhaes. "Influence of field of view of thermal imagers and angle of view on temperature measurements by infrared thermovision." *IEEE Sensors Journal* 14.3 (2013): 729-733.
69. Dziarski, K., and A. Hulewicz. "Effect of unsharpness on the result of thermovision diagnostics of electronic components." *Proceedings of the 15th Quantitative InfraRed Thermography Conference, Porto, Portugal*. 2020.
70. Farzaneh, M., et al. "CCD-based thermoreflectance microscopy: principles and applications." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.14 (2009): 143001.
71. Wang, Dazheng, et al. "Thermal Analysis of High-Power Light-Emitting Diode Using Thermoreflectance Thermography." *2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. IEEE, 2021.
72. Raad, P. E., P. L. Komarov, and M. G. Burzo. "Technical brief: Thermo-reflectance thermography for submicron temperature measurements." *Electronics Cooling* 14.1 (2008): 28.
73. Blackburn, David L. "Temperature measurements of semiconductor devices—a review." *Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (IEEE Cat. No. 04CH37545)*. IEEE, 2004.
74. Kopeć, M., and B. Więcek. "AC temperature estimation of power electronic devices using 1D thermal modeling and IR thermography measurements." *Proceedings of the 15th Quantitative InfraRed Thermography Conference, Porto, Portugal*. 2020.
75. Bao, Li, et al. "Investigation and modelling of work roll temperature in induction heating by finite element method." *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 118.7 (2018): 735-743.
76. Ruminski, Jacek, et al. "Thermal parametric imaging in the evaluation of skin burn depth." *IEEE transactions on biomedical engineering* 54.2 (2007): 303-312.
77. Staton, David A., and Andrea Cavagnino. "Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models." *IEEE transactions on industrial electronics* 55.10 (2008): 3509-3516.
78. Ghahfarokhi, Payam Shams, et al. "Determination of forced convection coefficient over a flat side of coil." *2017 IEEE 58th International scientific conference on power and electrical engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. IEEE, 2017.
79. Yusuf, Aminu, and Sedat Ballikaya. "Thermal resistance analysis of trapezoidal concentrated photovoltaic–Thermoelectric systems." *Energy Conversion and Management* 250 (2021): 114908.
80. Santamaria-Holek, Iván, and Agustín Pérez-Madrid. "Scaling Planck's law: A unified approach to the Casimir effect and radiative heat-conductance in nanogaps." *Nanoscale Horizons* 7.5 (2022): 526-532.

81. Zampoli, V.; Jordan, P. M. Second-sound phenomena in type II conductors with Stefan–Boltzmann source. *Mechanics Research Communications* 2022, 126, 103998. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2022.103998>
82. Litwa, Mariusz. "Influence of angle of view on temperature measurements using thermovision camera." *IEEE Sensors Journal* 10.10 (2010): 1552-1554.
83. Ajmera, Sameer K., et al. "Amorphous silicon thin-films for uncooled infrared microbolometer sensors." *Infrared Technology and Applications XXXVI*. Vol. 7660. SPIE, 2010.
84. Yadav, PV Karthik, et al. "Advancements of uncooled infrared microbolometer materials: A review." *Sensors and Actuators A: Physical* 342 (2022): 113611.
85. Dufour, Denis, et al. "A bi-spectral microbolometer sensor for wildfire measurement." *Sensors* 21.11 (2021): 3690.
86. Optris Xi 400, [https://www.optris.global/optris-xi-400?gclid=Cj0KCQiAyracBhDoARIsACGFcS6QywUcVtRWJEML-YW59PMjbauQd65cIBKpFHuxnjYOj37Mq3LMuGsaAmvKEALw\\_wcB](https://www.optris.global/optris-xi-400?gclid=Cj0KCQiAyracBhDoARIsACGFcS6QywUcVtRWJEML-YW59PMjbauQd65cIBKpFHuxnjYOj37Mq3LMuGsaAmvKEALw_wcB), dostęp: 5.12.2022
87. Olson, Paolo, et al. "Development of a Low-Cost 6 DOF Brick Tracking System for Use in Advanced Gas-Cooled Reactor Model Tests." *Sensors* 22.3 (2022): 1110.
88. Krammer, Anna, et al. "VO2: Ge based thermochromic solar absorber coatings." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 240 (2022): 111680.
89. Kovilpalayam Palaniswamy, Dhanabalakrishnan, et al. "First principles study on electronic structure and optical properties of PMMA doped InSb–Mn alloy polymer matrix composite." *Advances in Materials Science and Engineering* 2022 (2022): 1-6.
90. Shimatani, Masaaki, et al. "Turbostratic stacked graphene-based high-responsivity mid-wavelength infrared detector using an enhanced photogating effect." *Optical Materials Express* 12.2 (2022): 458-467.
91. Delmas, M., et al. "HOT SWaP and HD detectors based on Type-II superlattices at IRnova." *Infrared Technology and Applications XLVIII*. Vol. 12107. SPIE, 2022.
92. Bhan, R. K., and Vikram Dhar. "Recent infrared detector technologies, applications, trends and development of HgCdTe based cooled infrared focal plane arrays and their characterization." *Opto-Electronics Review* 27.2 (2019): 174-193.
93. Gurga, Alexander R., et al. "Dual-band MWIR/LWIR focal plane arrays based on III-V strained-layer superlattices." *Infrared Technology and Applications XLIV*. Vol. 10624. SPIE, 2018.
94. Publikacja Polskiego Centrum Akredytacji, <https://www.pca.gov.pl>, dostęp 8.10.2023
95. Huang, Wei, and Zhongliang Jing. "Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion." *Pattern recognition letters* 28.4 (2007): 493-500.
96. Soldan, Samuel. "On extended depth of field to improve the quality of automated thermographic measurements in unknown environments." *Quantitative InfraRed Thermography Journal* 9.2 (2012): 135-150.
97. Dziarski, Krzysztof. "Selection of the Observation Angle in Thermography Temperature Measurements with the Use of a Macro Lens." *2021 13th International Conference on Measurement*. IEEE, 2021.
98. Strona internetowa programu Flir Tools, <https://support.flir.com/SwDownload/app/RssSWDownload.aspx?ID=1247>, dostęp: 8.10.2023
99. Dziarski, Krzysztof, Arkadiusz Hulewicz, and Grzegorz Dombek. "Lack of thermogram sharpness as component of thermographic temperature measurement uncertainty budget." *Sensors* 21.12 (2021): 4013.
100. Karta katalogowa kamery Flir E50, <https://www.flir.com/support/products/e50/>, 8.10.2023
101. Karta katalogowa obiektywu Close 2x [https://www.flir.com/products/t197214\\_close-up-2x-lens/?vertical=rd+science&segment=solutions](https://www.flir.com/products/t197214_close-up-2x-lens/?vertical=rd+science&segment=solutions), dostęp: 8.10.2023

102. Hulewicz, Arkadiusz, Krzysztof Dziarski, and Grzegorz Dombek. "The solution for the thermographic measurement of the temperature of a small object." *Sensors* 21.15 (2021): 5000.
103. Kawor, E. T., and S. Mattei. "Emissivity measurements for nexel velvet coating 811-21 between– 36 C and 82 C, 15 ECTP Proceedings." *High Temp. High Press* 31 (1999): 551-556.
104. Karta katalogowa czujnik Pt1000 smd, <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000181412DS01/karta-katalogowa-181412-platynowy-czujnik-temperatury-yageo-smd-1206-v-32207595-pt1000-50-do-130-c.pdf>, dostęp: 8.10.2023
105. Karta katalogowa kleju WLK 5, [https://www.roselectronic.com/pl/products/fischer-elektronik/wlk-5-1-80902?vat=1&gclid=CjwKCAjwzo2mBhAUEiwAf7wjklxS2Pp-yOhesIARTHq6wYzu7mVFbHSm9hUQi70\\_JdkFNK0hBNFOCxoCMvgQAvD\\_BwE](https://www.roselectronic.com/pl/products/fischer-elektronik/wlk-5-1-80902?vat=1&gclid=CjwKCAjwzo2mBhAUEiwAf7wjklxS2Pp-yOhesIARTHq6wYzu7mVFbHSm9hUQi70_JdkFNK0hBNFOCxoCMvgQAvD_BwE), dostęp: 8.10.2023
106. Publikacja Polskiego Centrum Akredytacji EA-4/02 M:2002 – kwiecień 2002, <https://www.pca.gov.pl/publikacje/dokumenty/ea-/>, dostęp 8.10.2023
107. Biuletyn GUM, [https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Biuletyn/Artykuly/3\\_2010/biuletyn\\_3-2010\\_str\\_\\_9-12.pdf](https://www.gum.gov.pl/ftp/pdf/Biuletyn/Artykuly/3_2010/biuletyn_3-2010_str__9-12.pdf), dostęp 8.10.2023
108. Karta katalogowa czujnika Pt1000-550, [https://www.tme.eu/Document/67cf717905f835bc5efcdcd56ca3a8e2/Pt1000-550\\_EN.pdf](https://www.tme.eu/Document/67cf717905f835bc5efcdcd56ca3a8e2/Pt1000-550_EN.pdf): 8.10.2023
109. Dziarski, Krzysztof, et al. "Unsharpness of thermograms in thermography diagnostics of electronic elements." *Electronics* 9.6 (2020): 897.
110. Faundez-Zanuy, Marcos, Jiří Mekyska, and Virginia Espinosa-Duro. "On the focusing of thermal images." *Pattern Recognition Letters* 32.11 (2011): 1548-1557.
111. Marinetti, Sergio, and Pier Giorgio Cesaratto. "Emissivity estimation for accurate quantitative thermography." *NDT & E International* 51 (2012): 127-134.
112. Schmid, Jonas, et al. "Improved in-situ calibration applied to infrared thermography under high angles of view." *Infrared Physics & Technology* 119 (2021): 103952.
113. Karta katalogowa radiatora RAD-DY-KY/3, [https://www.tme.eu/pl/details/rad-dy-ky\\_3/radiator/stonecold/?gclid=Cj0KCQjw1rqkBhCTARIsAAHz7K2zfbZTZkZKUOIoQ-ZSt8rjLUhw63YNErW3NBzr7tiDcUjurwHhpXAaAjKzEALw\\_wcB110](https://www.tme.eu/pl/details/rad-dy-ky_3/radiator/stonecold/?gclid=Cj0KCQjw1rqkBhCTARIsAAHz7K2zfbZTZkZKUOIoQ-ZSt8rjLUhw63YNErW3NBzr7tiDcUjurwHhpXAaAjKzEALw_wcB110), dostęp: 8.10.2023
114. Karta katalogowa radiatora SK104-25STC, <https://www.tme.eu/pl/details/sk104-25stc/radiator/fischer-elektronik/>, dostęp: 8.10.2023
115. Karta katalogowa radiatora SK104-50,8 STC, <https://www.tme.eu/pl/details/sk104-51stc/radiator/fischer-elektronik/sk-104-50-8-stc/>, dostęp: 8.10.2023
116. Karta katalogowa radiatora SK104-38 STC, <https://www.tme.eu/pl/details/sk104-38stc/radiator/fischer-elektronik/>, dostęp: 8.10.2023