

Stanisław KUCYPERA

## NUMERYCZNO-EMPIRYCZNA ANALIZA PRZEPIYU CIEPŁA W PROSTOPADŁOŚCIENNYCH KANAŁACH MODUŁOWYCH URZĄDZEŃ ELEKTRONICZNYCH

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono ogólną charakterystykę metod chłodzenia urządzeń elektronicznych. Opisano krótko geometrię analizowanego kanału. Opisano także numeryczną metodę obliczeń i schemat stanowiska do badań eksperymentalnych. Wykonano analizę wpływu niektórych parametrów pracy, np. rozkładu prędkości czynnika chłodzącego i generowanego strumienia ciepła na temperaturę złącz półprzewodnikowych. Podano wybrane wyniki analizy numerycznej i eksperymentalnej.

## NUMERICAL AND EMPIRICAL ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER WITHIN RECTANGULAR MODULE DUCTS OF ELECTRONICS EQUIPMENT

**Summary.** In this paper the general characterization of the cooling methods of the electronics equipment have been presented. The geometry of the analysed duct has been described. The numerical method of calculations and the schema of the measuring stand to the eksperimental reaserches have been described too. The influence of some parameters of the work eq. the distribution of the velocity and generated heat-flux on the semiconductor junctions temperature have been analysed. The chosen results of the numerical and eksperimental analysis have been given.

### 1. Wstęp

W budowanych współcześnie urządzeniach elektronicznych (w tym w aparaturze pomiarowej, wzmacniaczach, mikrokomputerach itp.) wykorzystuje się głównie przyrządy półprzewodnikowe, a w szczególności układy scalone. Układy te są montowane na płytkach modułowych. W związku ze zwiększeniem miniaturyzacji w elektronice istnieje konieczność upakowania coraz to większej liczby przyrządów półprzewodnikowych na płytkach modułowych urządzeń elektronicznych. Na skutek przepływu prądu elektrycznego i strat mocy elektrycznej

w czasie pracy urządzenia elektronicznego w jego elementach mocy wydziela się ciepło (tzw. ciepło Joule'a). W celu uniknięcia nadmiernej zwiększenia temperatury przyrządu, a w szczególności najbardziej czulego jego miejsca, tzn. obszaru czynnego półprzewodnika, czyli złącza półprzewodnikowego, ciepło wydzielane w przyrządzie półprzewodnikowym odprowadzane jest do jego układu chłodzenia. Każdy przyrząd półprzewodnikowy charakteryzuje się dopuszczalną temperaturą pracy obszaru czynnego. Jeżeli układ chłodzenia przyrządu półprzewodnikowego jest niewłaściwy, to może nastąpić przekroczenie dopuszczalnej temperatury obszaru czynnego, co w początkowej fazie wpływa na zmianę jego parametrów elektrycznych, a w ostateczności prowadzi do zniszczenia struktury półprzewodnikowej. Jest to równoznaczne z uszkodzeniem przyrządu półprzewodnikowego i całego urządzenia elektronicznego. Stąd też problem nagrzewania się złącz półprzewodnikowych pod wpływem rozpraszanej mocy elektrycznej w pracujących przyrządach półprzewodnikowych jest jednym z najistotniejszych czynników decydujących o trwałości i niezawodności działania urządzeń elektronicznych. Z danych literaturowych [1] wynika, że zwiększenie wartości temperatury obszaru czynnego półprzewodnika ze  $120^{\circ}\text{C}$  na  $150^{\circ}\text{C}$  może spowodować dziesięciokrotne skrócenie czasu pracy urządzenia elektronicznego. Dlatego ważnym problemem w projektowaniu urządzeń elektronicznych jest dobór odpowiedniego układu chłodzenia. Dobór ten musi opierać się na wnikliwie przeprowadzonych analizach cieplnych i przepływowych w urządzeniach elektronicznych. Stąd też analiza cieplna i przepływowa staje się jednym z ważnych problemów w projektowaniu, konstruowaniu i eksploatacji urządzeń elektronicznych. Określenie dopuszczalnych wartości mocy wydzielanych w przyrządach półprzewodnikowych oraz odpowiednich parametrów układów chłodzenia dokonuje się często na podstawie wyników pomiarów bądź uproszczonych modeli matematycznych [2,3]. Koszty i czas trwania pomiarów oraz trudności w zbadaniu wpływu większej liczby czynników na parametry pracy urządzenia elektronicznego w czasie pomiaru uniemożliwiają stosowanie na szeroką skalę badań eksperymentalnych. Dlatego coraz większego znaczenia nabiera modelowanie matematyczne zjawisk cieplnych, zachodzących w urządzeniach elektronicznych. Według autora niniejszej pracy najlepsze praktyczne efekty w analizie cieplno-przepływowej można osiągnąć stosując obie metody badań, tzn. analizę numeryczną i eksperymentalną. W przypadku stosowania tylko modelowania matematycznego, w celu oceny przydatności modelu, wyniki obliczeń uzyskane za pomocą modeli matematycznych należy zawsze zweryfikować eksperymentalnie. Wówczas takie modele umożliwiają badanie wpływu różnych parametrów na rozkład temperatury w przyrządzie, a także dobór cech konstrukcyjnych urządzenia już w fazie jego projektowania. Jak wspomniano wcześniej, jednym z ważnych czynników decydujących o nagrzewaniu się złącz, a tym samym o trwałości i niezawodności pracy urządzenia elektronicznego, jest sposób jego chłodzenia. W przypadku wymuszonego chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych znajdujących się w kanale modułowym modelowanie matematyczne umożliwia badanie wpływu różnych parametrów (np. rozkładu prędkości czy temperatury czynnika chłodzącego) na temperaturę obszaru czynnego półprzewodnika. W prezentowanej pracy połączono analizę obliczeniową i eksperymentalną. Używając programu obliczeniowego przeprowadzono między innymi symulację numeryczną rozkładu prędkości czynnika chłodzącego, przepływające

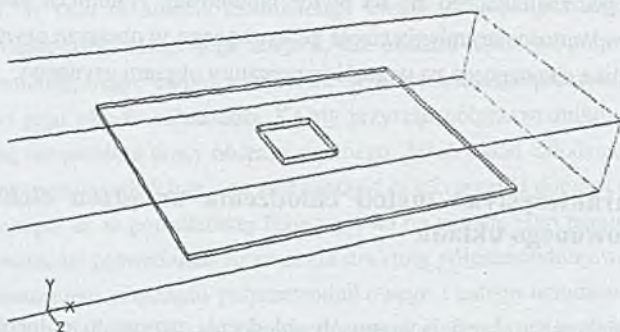
go wewnątrz kanału, oraz wykonano analizę wpływu tego rozkładu na temperaturę przyrządu półprzewodnikowego, znajdującego się na płytce modułowej. Natomiast eksperymentalnie analizowano wpływ wartości strumienia ciepła generowanego w obszarze czynnym, przy stałej prędkości czynnika chłodzącego na wartość temperatury obszaru czynnego.

## 2. Ogólna charakterystyka metod chłodzenia urządzeń elektronicznych i opis analizowanego układu

Podstawową wielkością określającą sposób chłodzenia przyrządu półprzewodnikowego jest strumień ciepła generowany w jego strukturze. W zależności od wartości strumienia ciepła generowanego w strukturze półprzewodnikowej stosowane są cztery podstawowe metody chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych:

- powietrzne (z wymuszonym bądź swobodnym przepływem czynnika chłodzącego),
- termoelektryczne,
- czyste chłodzenie cieczowe z wymuszonym przepływem,
- chłodzenie cieczowe połączone z przemianą fazową czynnika chłodzącego.

Dwie ostatnie metody wykorzystywane są do chłodzenia przyrządów, w których moc cieplna generowana w obszarze czynnym półprzewodnika wynosi od kilkudziesięciu do kilkuset watów. Dla mniejszych wartości mocy najtańszą i najczęściej spotykaną metodą chłodzenia jest chłodzenie powietrzem z wymuszonym bądź swobodnym przepływem czynnika chłodzącego. W przypadku chłodzenia powietrzem urządzenia elektroniczne mają kanały modułowe utworzone przez płytki modułowe i obudowę zewnętrzną urządzenia. W zależności od typu urządzenia elektronicznego kanały te na ogół są różnych wymiarów, tzn. mają różne wartości przekrojów poprzecznych jak i długości [4]5]. Urządzenia elektroniczne mogą mieć jeden lub kilka takich kanałów. W kanałach tych do płytek modułowych przymocowywane są elementy grzejne w postaci pojedynczych przyrządów półprzewodnikowych, tzn. diod, tranzystorów, tyrystorów, najczęściej zaś układów scalonych. Ciepło generowane w elementach mocy (grzejnych) montowanych na powierzchni płytek modułowych odprowadzane jest drogą konwekcji do czynnika chłodzącego, przepływającego wewnątrz kanału, bądź dodatkowo wymieniane jest przez promieniowanie między płytkami modułowymi i ścianami obudowy. W przypadku wymuszonego chłodzenia płytki modułowej istotny jest dobór prędkości przepływu czynnika chłodzącego, rozmieszczenia elementów grzejnych na płytce modułowej, a także względne wymiary elementów grzejnych i płytki modułowej. Uproszczony schemat poglądowy pojedynczego kanału modułowego pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat części kanału modułowego dla typowego urządzenia elektronicznego  
 Fig. 1. Sketch of a part of the modul duct for typical electronics equipment

### 3. Analiza numeryczna

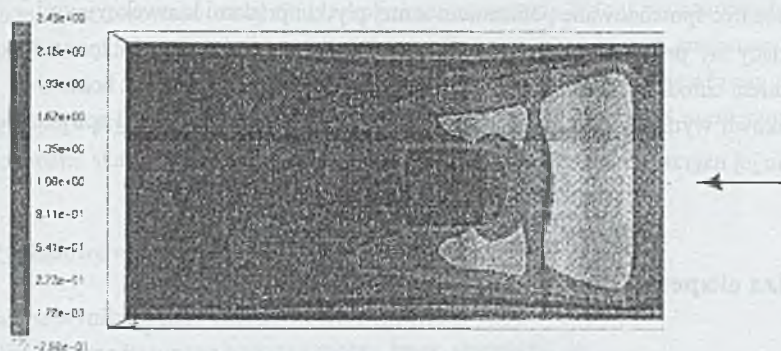
#### 3.1. Opis metody obliczeń i analizowanego układu

Analizę przepływu ciepła w kanałach modułowych przeprowadzono wykorzystując zakupiony przez Instytut Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej program obliczeniowy FLUENT. Program ten napisany jest w oparciu o metodę bilansów elementarnych i w zależności od wybranej opcji może być stosowany do rozwiązywania różnych problemów cieplnych i przepływowych. W prezentowanej pracy wybrano opcję, która umożliwia między innymi: 1 - rozpatrywanie trójwymiarowego pola temperatury w układzie kartezjańskim, 2 - analizę ustalonego lub nieustalonego pola temperatury, 3 - uwzględnienie występowania w analizowanym obszarze objętościowych źródeł ciepła o skończonych rozmiarach, 4 - uwzględnienie zmian parametrów termofizycznych materiałów z temperaturą, 5 - uwzględnienie przepływu ciepła od powierzchni zewnętrznych płytek modułowych do otoczenia drogą konwekcji wymuszonej i promieniowania, 6 - rozpatrywanie zmian temperatury i prędkości przepływu czynnika chłodzącego na wlocie do kanałów.

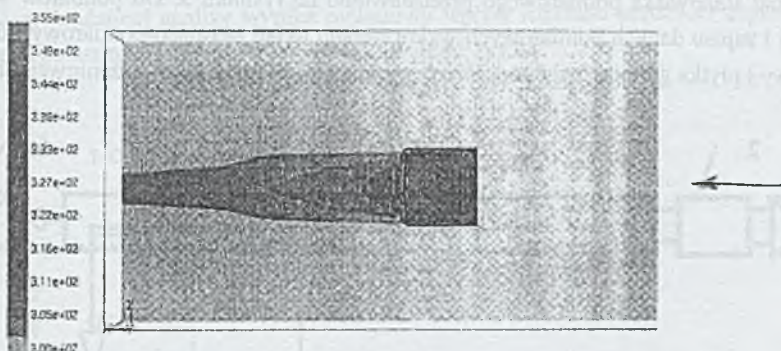
Wykorzystując opisaną opcję przeprowadzono analizę wpływu różnych parametrów cieplnych i przepływowych na rozkład temperatury w kanale modułowym. W symulacji numerycznej zamodelowano kanał modułowy (rys.1), który miał wymiary poprzeczne 150·40 mm<sup>2</sup>, z płytką modułową o grubości  $\delta = 2$  mm. Ze względu na konieczność dokładnej identyfikacji warunków obliczeniowych do modelowania wykorzystano, jako element grzejny, płytkę ceramiczną z cienką warstwą oporową o wymiarach 26·27 mm<sup>2</sup>. Płytkę zamontowana była 150 mm przed wylotem z kanału. W obliczeniach przedstawionych w pracy zadana była stała prędkość powietrza  $w=2$  m/s w odległości 500 mm przed płytką grzejną oraz stała moc cieplna  $P=5$  W.

### 3.2. Przykładowe wyniki analizy numerycznej

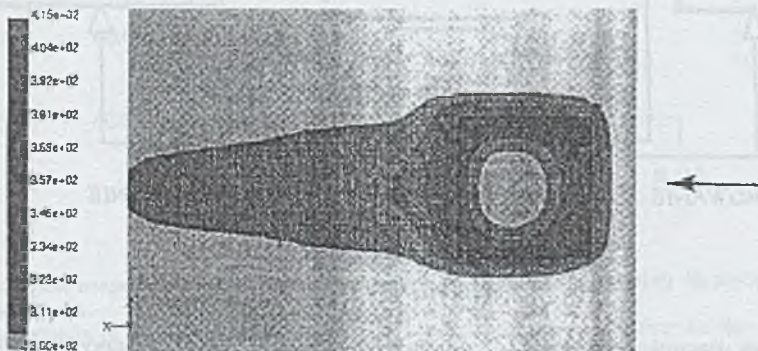
Wybrane wyniki analizy numerycznej przedstawiono na rys.(2-4).



Rys.2. Rozkład prędkości powietrza w kanale na wysokości 1 mm nad płytą grzejną  
 Fig.2. Velocity distribution of air in the duct 1 mm over the heating plate



Rys.3. Rozkład temperatury powietrza w kanale na wysokości 1 mm nad płytą grzejną  
 Fig.3. Temperature distribution of air in the duct 1 mm over the heating plate



Rys.4. Rozkład temperatury na płytce grzejnej i modułowej  
 Fig.4. Temperature distribution on the heating plate and modul plate

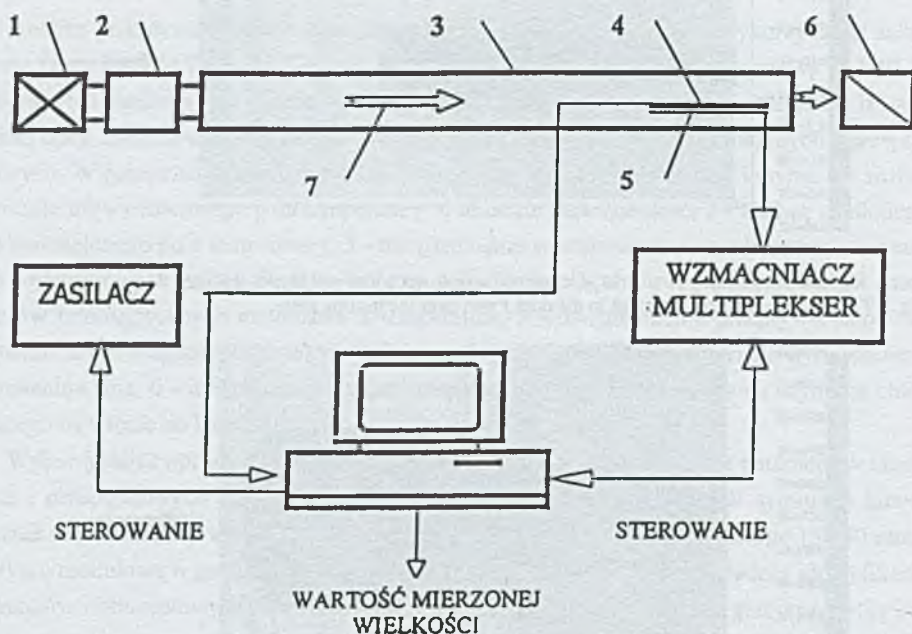
Przedstawione na rysunkach (2-4) rozkłady prędkości i temperatury nasuwają następujące spostrzeżenia:

1. Występujące na rys.2 zaburzenie wzdłużnego rozkładu prędkości w okolicach płytki grzejnej może być spowodowane położeniem samej płytki i prądami konwekcyjnymi.
2. Związujący się profil temperatury powietrza za płytką grzejną (rys.3) spowodowany jest zasysaniem chłodniejszych cząsteczek powietrza opływającego płytkę z boku.
3. Stosunkowo wyrównany rozkład temperatury płytki modułowej (rys.4) spowodowany jest głównie jej nagrzewaniem ciepłym powietrzem chłodzącym.

## 4. Analiza eksperymentalna

### 4.1. Opis stanowiska pomiarowego

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 5. Do pomiarów w części sterującej i zapisu danych pomiarowych wykorzystano układ sterująco-pomiarowy, [6]. kanał pomiarowy i płytkę grzejną były podobnych wymiarów jak w części obliczeniowej niniejszej



Rys.5. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 - dmuchawa, 2 - otometr, 3 - kanał pomiarowy, 4 - płytkę grzejną, 5 - termopara, 6 - anemometr, 7 - struga powietrza

Fig.5. Schema of a measurement stand: 1 - air blower, 2 - rotameter, 3 - measurement duct, 4 - hot plate, 5 - thermocouple, 6 - anemometer, 7 - air flux

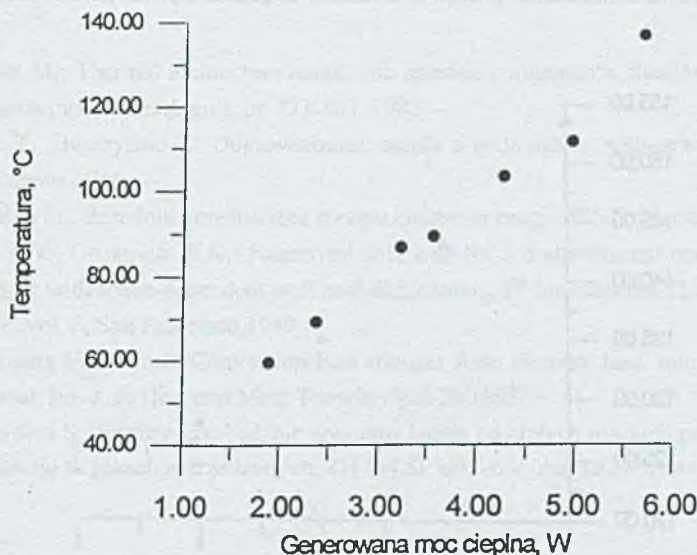
pracy. Płytkę grzejną omywana była strugą powietrza przepływającą w prostokątnym kanale z różną prędkością średnią. Powietrze tłoczono za pomocą dmuchaw o małej wydajności. Ze względu na potrzebę uzyskania ustalonego rozkładu prędkości powietrza przepływającego nad płytką grzejną zastosowano kanał długi, a płytkę umieszczoną była u wylotu kanału. Pomiar wydajności dmuchaw mierzono rotametrem, a prędkości strugi powietrza anemometrem oporowym. Natomiast temperaturę płytki grzejnej mierzono termoparą umieszczoną pomiędzy płytką grzejną i płytką z pleksi. Podobnie jak w [6] również tutaj przed pomiarami właściwymi dokonano skalowania termopar.

#### 4.2. Przykładowe wyniki analizy eksperymentalnej

Wybrane wyniki analizy eksperymentalnej przedstawiono na rys.(6-8).

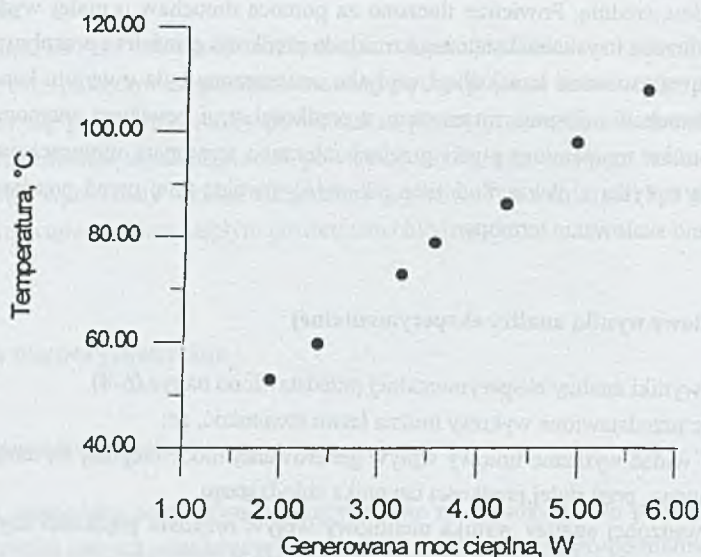
Analizując przedstawione wykresy można łatwo stwierdzić, że:

1. Na rys.6,7 widać wyraźnie liniowy wpływ generowanej mocy cieplnej na temperaturę obszaru czynnego, przy stałej prędkości czynnika chłodzącego.
2. Z przeprowadzonej analizy wynika nieliniowy wpływ rozkładu prędkości czynnika chłodzącego na wartość temperatury obszaru czynnego, rys.8.



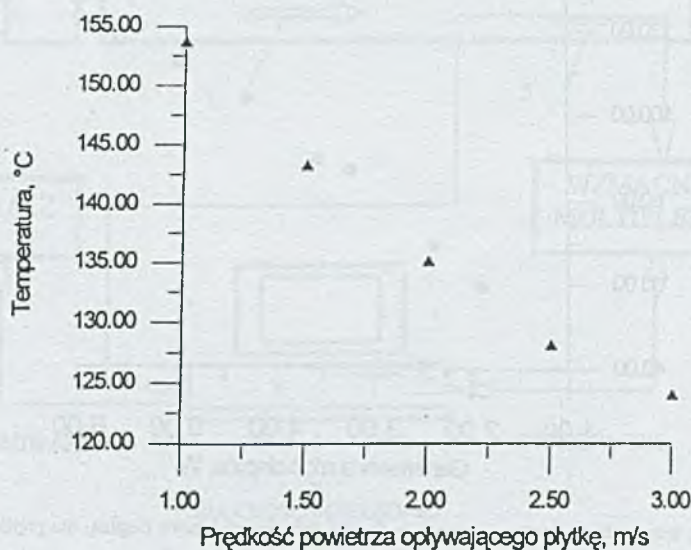
Rys.6. Zależność temperatury obszaru czynnego w funkcji generowanej mocy cieplnej dla prędkości powietrza  $w=1.9$  m/s

Fig.6. Temperature of the semiconductor junction as a function of generated power for the velocity of air  $w=1.9$  m/s



Rys.7. Zależność temperatury obszaru czynnego w funkcji generowanej mocy cieplnej dla prędkości powietrza  $w=5.2$  m/s

Fig.7. Temperature of the semiconductor junction as a function of generated power for the velocity of air  $w=5.2$  m/s



Rys.8. Zależność temperatury obszaru czynnego w funkcji prędkości przepływającego powietrza dla mocy generowanej  $P=5.7$  W

Fig.8. Temperature of the semiconductor junction as a function of air velocity for generated power  $P=5.7$  W



#### 4. Wnioski i uwagi końcowe

Na podstawie wykonanej analizy numerycznej i empirycznej można wyciągnąć następujące wnioski końcowe:

1. Z wykonanej analizy wynika wyraźny wpływ rozkładu prędkości czynnika chłodzącego na wartość temperatury obszaru czynnego płytki grzejnej.
2. W przeprowadzonych ciepłno-przepływowych analizach numerycznych wystąpiła asymetria w położeniu maksymalnej temperatury na płytce grzejnej. Asymetria ta nie pojawiła się w cieplnej analizie numerycznej ze stałym współczynnikiem wnikania ciepła od powierzchni płytki do otoczenia.

Dalszym zamierzeniem autora jest głównie wykonanie analizy wzajemnego oddziaływania ciepłno-przepływowego dla płytek grzejnych o różnych wydajnościach strumienia ciepła. Badania te są bardzo ważne dla elektroniki, gdyż w czasie pracy urządzenia elektronicznego przyrządy półprzewodnikowe oddziałują na siebie cieplnie bezpośrednio przez promieniowanie i w wyniku konwekcji poprzez czynnik chłodzący.

#### LITERATURA

1. Genet M.: Thermal architecture made with specific components. Session PII. Components manufacturin technologies, pp 773-803, 1982
2. Pele T., Boreczyński J.: Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych. Wkł, Warszawa 1986
3. Stępień St.: Poradnik konstruktora sprzętu elektronicznego. WNT, Warszawa 1981
4. Yeb L.T., Gringrich W.K.: Numerical solutions for a multi-channal counterflow heat exchanger with space-dependent wall heat dissipations, 8<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference, vol. 6, San Francisco 1989
5. Incropera F.P. i inni: Convection heat transfer from discrete heat sources in rectangular channal. Int. J. of Heat and Mass Transfer. Vol 29.1993
6. Kucypera S.: Empiryczne badanie wymiany ciepła od małych płaskich powierzchni znajdujących się w gazach rozrzedzonych. ZN Pol.Śl. ser. Automatyka (w druku).

Recenzent: Doc. dr inż. Antoni Guzik

## Abstract

In general the elements of electronics equipment, i.e. module plates together with semiconductor devices and external chassis create regular rectangular ducts, so called module ducts.

During the operation of the electronics equipment the heat is generated in the semiconductor devices. That heat is transferred to the cooling agent which flows along the duct. In the case the cooling system works improperly, the temperature within the semiconductor element (especially in the semiconductor junction) can arise above admissible level, what can damage semiconductor element and finally the whole equipment. To avoid mentioned effects the cooling system of the electronic system should be carefully designed taking into consideration heat and flow analysis.

Present paper shows the results of numerical modeling of the velocity distribution of the coolant within the duct. Influence of the velocity distribution on the temperature of the semiconductor device is analyzed.

The measuring stand is built and the influence of the generated heat flux on the semiconductor junction temperature is analyzed too.

Some chosen results of analysis are presented in fig. (2-4) and fig. (6-8).