

# APARATURA

## BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

### Badania eksperymentalne charakterystyk cieplnych radiatorów do chłodzenia mikroprocesorów

MACIEJ JAWORSKI

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY ENERGETYKI I LOTNICTWA,  
INSTYTUT TECHNIKI CIEPLNEJ

**Słowa kluczowe:** chłodzenie mikroprocesorów, radiatory, opór cieplny, materiały PCM

#### STRESZCZENIE

W pracy omówiono, istotne z punktu widzenia wymiany ciepła, parametry radiatorów wykorzystywanych do chłodzenia elementów elektronicznych, przede wszystkim mikroprocesorów. Przedstawiono proste stanowisko eksperymentalne pozwalające na pomiar oporu cieplnego radiatorów w warunkach konwekcji naturalnej i wymuszonej. Przybliżono zagadnienie zastosowania materiałów zmiennofazowych PCM (*Phase Change Materials*) w radiatorach do chłodzenia elektroniki. Zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych charakterystyk pracy dwóch radiatorów z wbudowanymi zasobnikami z PCM. Przeprowadzone badania były symulacją awarii zasadniczego układu chłodzenia procesorów.

#### Experimental investigation of thermal performance of heat sinks for electronics cooling

**Keywords:** electronics cooling, heat spreaders, thermal resistance, phase change materials

#### ABSTRACT

In the paper basic properties of heat sinks used in electronics cooling, important from the point of view of heat transfer phenomena, were presented. Simple experimental set-up for the measurement of thermal resistance of heat sinks was described. The unit allows to perform studies in both forced and free convective heat transfer conditions. The application of phase change materials (PCM) in the cooling of microprocessors was discussed. Two heat sinks with PCM incorporated in their structure were shown. Results of experimental investigation of thermal performance characteristics of these radiators were given and discussed in details. In the tests the thermal behavior of heat sinks with PCM in simulated failure of primary cooling system was analyzed.

## 1. WPROWADZENIE

Rozwój elektroniki, którego celem był wzrost funkcjonalności urządzeń elektronicznych, polegał na zwiększaniu upakowania tranzystorów w układach scalonych oraz zwiększaniu szybkości taktowania, czyli liczby elementarnych operacji wykonywanych w ciągu sekundy. Osiągnięciu założonego celu towarzyszył narastający problem o charakterze cieplnym. Warunkiem poprawnej pracy elementów półprzewodnikowych jest niedopuszczenie do wzrostu ich temperatury ponad dopuszczalny poziom (w zależności od wykonania od 85 do 120°C), powyżej którego półprzewodnik traci swoje właściwości. Każde przetączenie stanu logicznego na elementarnym poziomie układu scalonego jest związane z generacją ciepła. Duża liczba tranzystorów oraz duże szybkości taktowania prowadzą do wzrostu strumienia ciepła wydzielanego w mikroprocesorze do poziomu, przy którym konieczne jest jego intensywne chłodzenie, w przeciwnym razie nastąpi przegrzanie elementu. Ze względu na duże upakowanie tranzystorów gęstości strumienia ciepła ( $W/cm^2$ ) na powierzchni mikroprocesorów osiągają bardzo duże wartości, co wymaga specjalnych technik chłodzenia (prosty radiator z wentylatorem może być niewystarczający).

Problemy chłodzenia układów (urządzeń) elektronicznych występują na różnych poziomach, od dużych systemów komputerowych (w tym centrów obliczeniowych), poprzez pojedyncze komputery (poziom obwodu drukowanego z licznymi źródłami ciepła – procesorami, pamięciami) do pojedynczych elementów elektronicznych (mikroprocesorów). O skali problemu mogą świadczyć dane dotyczące kosztów energii niezbędnej do chłodzenia dużych centrów obliczeniowych (*Data Centers*), które są porównywalne z kosztami energii zużywanej przez komputery dla realizacji ich podstawowych funkcji, czyli przetwarzania danych (obliczeń).

Ze względu na różne skale problemu, szeroki zakres parametrów układów chłodzenia (wielkości strumieni ciepła, oraz gęstości strumieni ciepła) istnieje bardzo szerokie spektrum technik chłodzenia adresowanych do elementów elektronicznych. Przegląd metod chłodzenia z punktu widzenia wykorzystywanych w nich mechanizmów wymiany ciepła można znaleźć w publikacjach [1].

W ITC PW prowadzone są badania specjalnych radiatorów do chłodzenia elementów elek-

tronicznych, których szczególną cechą jest duża pojemność (bezwładność) cieplna, uzyskiwana dzięki wkomponowaniu materiałów zmiennofazowych PCM w radiator. Chłodzenie polega na pochłanianiu ciepła przez materiał PCM w czasie jego topnienia (klasyczny radiator ma za zadanie odprowadzić ciepło od źródła do otoczenia). Ponieważ proces ten jest skończony (ilość materiału PCM jest ograniczona) tego typu radiatorzy mają też ograniczone zastosowania głównie do takich urządzeń, ale nie tylko, które pracują cyklicznie. Dobrze zaprojektowany radiator z PCM pozwala odprowadzać duże strumienie ciepła, będąc elementem pasywnym, tzn. działanie jego nie jest wspomagane wentylatorami lub pompami. Zaletą tych rozwiązań jest ich duża pojemność cieplna, co oznacza zdolność do akumulacji ciepła w strukturze radiatora [2, 3, 4, 5, 6].

W pracy przedstawiono szczegółowo techniki eksperymentalne stosowane przy ocenie badanych radiatorów.

## 2. CHARAKTERYSTYKI RADIATORÓW

Podstawową wielkością charakteryzującą radiatorzy do chłodzenia procesorów jest opór cieplny definiowany jako stosunek różnicy między temperaturą powierzchni chłodzonego procesora a temperaturą otoczenia (powietrza) do strumie-

$$R = \frac{T_p - T_0}{Q}$$

nia odprowadzanego ciepła:

Znajomość oporu cieplnego konkretnego radiatora pozwala ocenić jego przydatność do chłodzenia danego elementu, jeżeli znany jest strumień ciepła wydzielany w czasie pracy. Temperatura powierzchni procesora wynika z ograniczenia temperatury pracy dla układów scalonych, zazwyczaj nie powinna przekraczać 85-90°C. Temperatura otoczenia, czyli powietrza w otoczeniu radiatora (nawiewanego na radiator) najczęściej nie przekracza 35°C.

Wartość oporu cieplnego radiatorów o tej samej strukturze zależy od szybkości przepływu powietrza, jeżeli w układzie zainstalowany jest wentylator. Natomiast jeżeli radiator działa w warunkach konwekcji naturalnej (bez wentylatora), opór cieplny zmienia się z obciążeniem – maleje ze wzrostem strumienia ciepła. Producenci układów chłodzenia podają dokładne charakterystyki radiatorów (wartość oporu cieplnego dla różnych

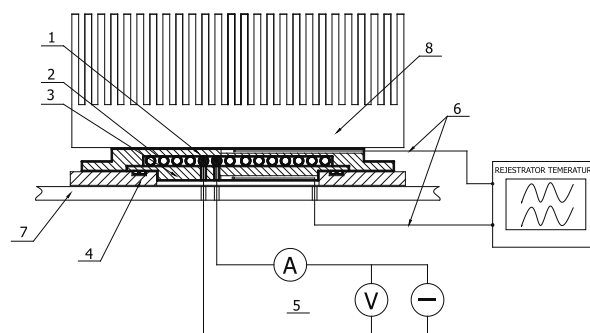
warunków pracy) w postaci wykresów. Nowe lub nietypowe radiatory wymagają wyznaczenia takich charakterystyk. Można je określić teoretycznie lub eksperymentalnie. Podejście teoretyczne polega na analizie procesów transportu ciepła przez radiator. Ze względu na złożoną budowę (strukturę) nowoczesnych radiatorów, oraz złożone mechanizmy wymiany ciepła, wymaga to zastosowania metod symulacji komputerowej. Metoda eksperymentalna wymaga mniej lub bardziej złożonego stanowiska pomiarowego, które jest modelem mikroprocesora i pozwala na pomiar temperatury w wybranych punktach radiatora w warunkach kontrolowanych obciążeń cieplnych.

W przypadku radiatorów pojemnościowych, oprócz oporu cieplnego (który pokazuje efektywność radiatora w stanach ustalonych) istotne znaczenie ma ich charakterystyka cieplna w stanach nieustalonych, np. zmiany temperatury kontaktu radiatora z mikroprocesorem w funkcji czasu dla różnych poziomów obciążenia cieplnego. Badania takich charakterystyk są znacznie prostsze na stanowiskach eksperymentalnych niż przy użyciu metod numerycznych.

### 3. STANOWISKO POMIAROWE

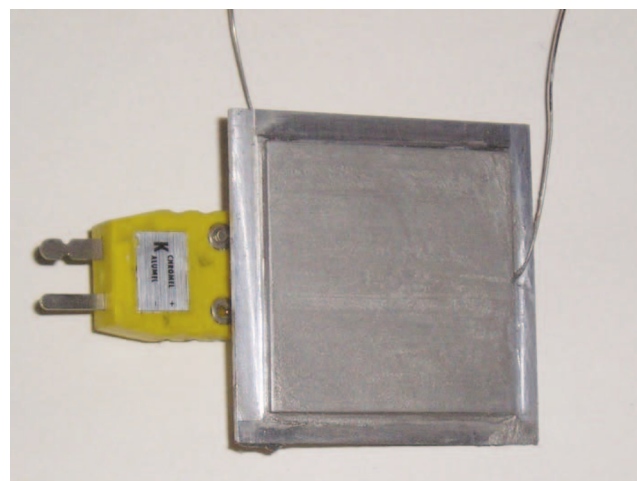
Stanowisko pomiarowe zostało zaprojektowane do badań charakterystyk cieplnych radiatorów przeznaczonych do chłodzenia mikroprocesorów. Wykonano je na bazie nieużywanego komputera PC. Mikroprocesor został zastąpiony specjalnie wykonanym elementem grzejnym, którego gabaryty są zbliżone do współczesnych procesorów. Pozostawiono pozostałe elementy komputera, włącznie z okablowaniem, aby zachować warunki zewnętrzne zbliżone do rzeczywistych – ma to istotne znaczenie szczególnie przy badaniu chłodzenia w warunkach konwekcji naturalnej.

Schemat stanowiska jest pokazany na Rysunku 1, natomiast na Rysunku 2 pokazano zdjęcie elementu grzejnego, który jest modelem cieplnym mikroprocesora. Element grzejny jest wykonany z duraluminium. Grzejnik wykonano z drutu oporowego w płaszczu z Inconelu o średnicy 1 mm (rezystancja 14,6  $\Omega$ ). W górnej i dolnej pokrywie grzejnika umieszczono termoelementy (typu K, płaszczowe, średnica 0,5 mm). Oprzyrządowanie stanowiska pozwala na ciągły pomiar temperatury górnej (jest to jednocześnie temperatura dolnej powierzchni badanego radiatora) i dolnej powierzchni, oraz mocy wydzielanej na grzałce



**Rysunek 1** Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – górna pokrywa grzejnika, 2 – grzejnik, 3 – dolna pokrywa grzejnika, 4 – slot w płycie głównej, 5 – układ zasilający prądem stałym wraz z miernikami, 6 – termoelementy, 7 – fragment płyty głównej komputera, 8 – radiator

**Figure 1** The scheme of an experimental set-up: 1 – top cover of a heater, 2 – heater, 3 – bottom cover of a heater, 4 – slot in a printed circuit board (PCB), 5 – DC supplier with volt and ampere meters, 6 – thermocouples, 7 – PCB, 8 – heat spreader

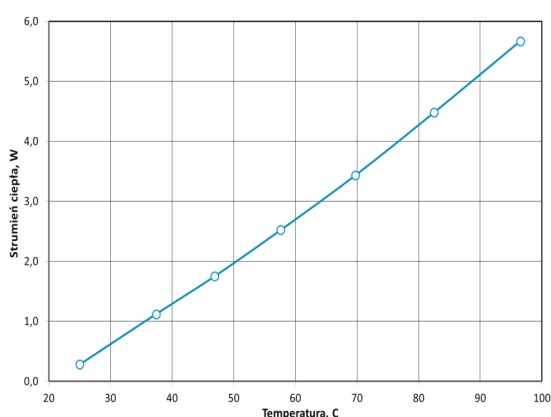


**Rysunek 2** Grzejnik elektryczny jako model mikroprocesora; po lewej wtyczka zasilania elektrycznego, w górnej części termoelementy płaszczowe do pomiaru temperatury górnej i dolnej powierzchni

**Figure 2** Electric heater as a model of microprocessor; electric plug (left) and thermocouples wires (top) are shown

przez pomiar napięcia i natężenia prądu. Przy badaniu charakterystyk radiatorów istotna jest informacja o strumieniu ciepła wnikałym do radiatora przez górną powierzchnię modelowego procesora. W grzejniku ciepło generowane w drucie oporowym (które można określić mierząc napięcie zasilające i natężenie prądu) jest odprowadzane do otoczenia nie tylko przez powierzchnię górną, ale także przez wszystkie pozostałe. Dlatego konieczne było przeprowadzenie kalibracji stanowiska, aby można było dokładnie wyznaczać strumień ciepła wnika-

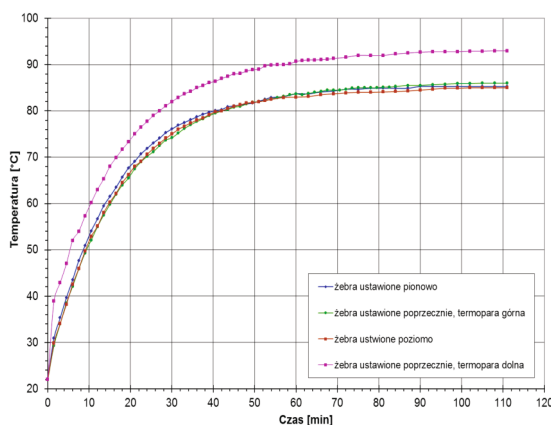
cy do radiatora. Kalibracja polegała na pomiarze strumienia ciepła odprowadzanego z grzejnika do otoczenia przy bardzo dobrze zaizolowanej cieplnie jego górnej powierzchni (pięciocentymetrowa warstwa kauczuku spienionego) – w tych warunkach prawie cały strumień ciepła był odprowadzany przez powierzchnię dolną i boczne. Pomiary wykonano przy różnych mocach grzejnika, rejestrując jednocześnie temperaturę dolnej powierzchni grzejnika. Wykres kalibracyjny pokazano na Rysunku 3. Przy wyznaczaniu oporu cieplnego radiatora strumień ciepła odprowadzany przez radiator wyznaczano jako różnicę całkowitej mocy grzejnika i mocy odczytanej z wykresu kalibracyjnego w funkcji mierzonej temperatury dolnej powierzchni grzejnika.



**Rysunek 3** Charakterystyka stanowiska badawczego – straty ciepła do otoczenia w funkcji temperatury dolnej powierzchni grzejnika

**Figure 3** Characteristic of an experimental set-up – heat losses as a function of a temperature of bottom cover

Przykładowe wyniki pomiarów oporu cieplnego radiatora pokazano na Rysunku 4 (jest to wynik rejestracji temperatury powierzchni grzejnika w czasie dochodzenia do stanu ustalonego).



**Rysunek 4** Zmiany temperatury grzejnika (modelu procesora) w procesie dochodzenia do stanu ustalonego

**Figure 4** Temporal variations of a heater's temperature during an approach to steady state

Przedmiotem badań był radiator z płaskimi żebrami działający w warunkach konwekcji naturalnej. W szczególności chodziło o sprawdzenie wpływu usytuowania żeber względem kierunku pola sił grawitacji (które są jednym z czynników wpływających na naturalną cyrkulację powietrza wokół radiatora). Teoretycznie w różnych konfiguracjach istnieją różne warunki dla cyrkulacji powietrza w szczelinach między żebrami. Jednakże dla tego konkretnego radiatora pomiary nie wykazały istotnych różnic jego charakterystyki cieplnej przy różnych jego pozycjach. W każdym przypadku w stanie ustalonym temperatura kontaktu grzejnik-radiator osiągała poziom 85-86°C (przy napięciu zasilania grzejnika 15 V, całkowita moc wynosiła 15,9 W). Różnica temperatury między podstawą radiatora a otoczeniem wynosiła 63-64 stopnie. Biorąc pod uwagę poprawkę z wykresu kalibracyjnego (dla temperatury dolnej powierzchni grzejnika 93°C, straty ciepła wynoszą 5,4 W) opór cieplny radiatora wynosi 6,0-6,1 K/W.

#### 4. BADANIE CHARAKTERYSTYK CIEPLNYCH RADIATORÓW O PODWYŻSZONEJ POJEMNOŚCI CIEPLNEJ

W przypadku radiatorów o podwyższonej pojemności cieplnej równie ważne znaczenie jak opór cieplny, ma ich charakterystyka cieplna w stanach nieustalonych. Zachowanie się tych radiatorów (tzn. dynamika zmian temperatury w kluczowych punktach tych elementów) w warunkach dużych zmian obciążenia cieplnego, jak również po dużych zmianach warunków wymiany ciepła z otoczeniem, stanowi informację o możliwości ich zastosowania w konkretnych przypadkach. Główne obszary zastosowań tego typu radiatorów to urządzenia elektroniczne pracujące cyklicznie (także telefony komórkowe), urządzenie jednorazowego użytku (np. układy sterowania rakiet i pocisków). Zwiększona pojemność cieplna radiatorów ma również znaczenie w stanach awaryjnych, np. awaria wentylatora znacznie pogarsza odprowadzanie ciepła do otoczenia, wtedy możliwość absorpcji ciepła w radiatorze ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa zarówno samego urządzenia, jak i przetwarzanych danych.

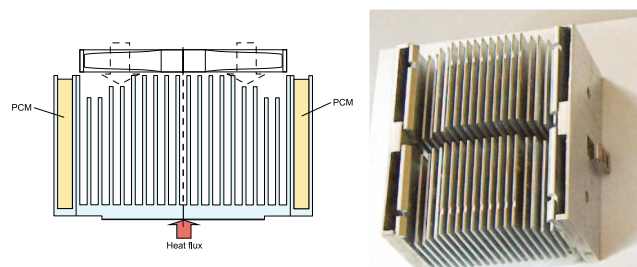
W dalszej części przedstawiono procedurę pomiarów (na opisanym wyżej stanowisku) charakterystyki radiatorów o podwyższonej pojemności cieplnej w warunkach awaryjnych z symulowaną awarią wentylatora.

#### 4.1 Radiatory z materiałem zmiennofazowym PCM

Szczegółowe informacje o sposobach zwiększenia pojemności cieplnej radiatorów przez zastosowanie materiału zmiennofazowego PCM można znaleźć m.in. w publikacjach [2, 5]. W tej pracy pokazano wyniki badań dwóch radiatorów, które powstały przez prostą modyfikację typowych konstrukcji. Na Rysunku 5 pokazano radiator z żebrami płaskimi, w którym zasobniki z PCM dołączono do powierzchni zewnętrznych żeber. Wielkość „kieszeni” pozwalała na użycie 13-14 g materiału PCM. Była to niewielka ilość w porównaniu z masą radiatora (238 g), jednakże biorąc pod uwagę pojemność cieplną PCM (która wynika głównie z dużego ciepła przemiany fazowej), uzyskano w ten sposób 42% przyrost pojemności (bezwładności) cieplnej układu [4, 7]. Radiator miał całkowitą powierzchnię żeber 926 cm<sup>2</sup> i w warunkach nominalnych współpracował z wentylatorem osiowym o średnicy 40 mm i mocy 1,2 W (zasilanie 12 V).

Na Rysunku 6 pokazano zdjęcie drugiego z badanych radiatorów. W tym przypadku użyto specjalnego zasobnika na materiał PCM, wykonanego z małego bloku aluminiowego (40x40x10 mm), w którym wywiercono pionowe otwory o średnicy 1 mm. W otworach można umieścić ok. 10 g materiału PCM. Element ten jest modelem struktury porowatej. Materiały porowate o odpowiedniej porowatości i wielkości porów są bardzo dobrymi zasobnikami na materiał PCM, ponieważ pozwalają na umieszczenie dużej ilości tego materiału, a także zapewniają efektywny transport ciepła od procesora do całej objętości PCM. Niestety z dobrze przewodzących metali (aluminium, miedź) trudno jest wykonać strukturę porowatą o odpowiednich parametrach. Dlatego w badaniach użyto takiego modelu (element wykonano na Wydziale Inżynierii Materiałowej PW).

Radiator został wykonany na bazie układu chłodzenia stosowanego w komputerach PC. Oryginalny radiator składał się z trzech segmentów żeber. Środkowy segment został wycięty (sfrezowany) i w to miejsce wstawiono opisany wyżej zasobnik z PCM. W tym rozwiązaniu materiał PCM jest bliżej źródła ciepła, które ma absorbować (w porównaniu do konstrukcji z Rysunku 5). Przepływ ciepła jest więc bardziej efektywny. Na zewnętrznych segmentach żeber zamontowano dwa wentylatory, pracujące w warunkach nominalnych.



**Rysunek 5** Schemat i zdjęcie radiatora do chłodzenia mikroprocesorów z zasobnikami zawierającymi materiał zmiennofazowy PCM

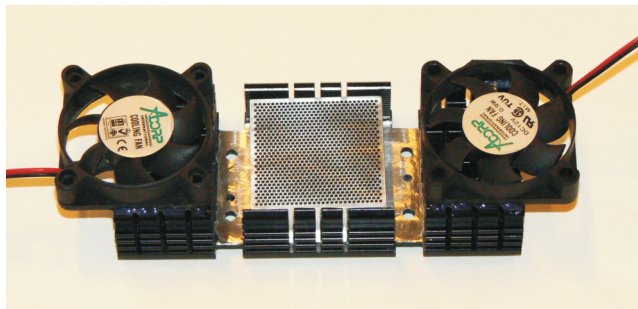
**Figure 5** The scheme and a photo of a heat spreader for electronics cooling with containers filled with phase change material (PCM)

Spośród różnych materiałów PCM stosowanych w układach chłodzenia elektroniki [2] wybrano kwas laurynowy (kwas dodekanowy, C<sub>12</sub>H<sub>24</sub>O<sub>2</sub>), o temperaturze topnienia 41,5°C, ciepłe topnienia 178 kJ/kg oraz ciepłe właściwym 2,34 i 2,17 kJ/(kg×K) (odpowiednio dla fazy stałej i ciekłej). Poza wysoką pojemnością cieplną najważniejszym kryterium wyboru materiału PCM jest jego temperatura topnienia, która powinna być znacząco niższa niż dopuszczalna temperatura dla mikroprocesora, ale jednocześnie na tyle wysoka, aby materiał nie topił się w warunkach pracy nominalnej – poziom optymalny zależy od usytuowania zasobnika z PCM w strukturze radiatora.

#### 4.3 Procedura pomiarowa

W trakcie badania rejestrowano temperatury w wybranych punktach radiatora (i modelu procesora) po wprowadzeniu zaburzenia cieplnego – w tym przypadku przez wyłączenie wentylatora. Prowadziło to do pogorszenia warunków wymiany ciepła do otoczenia (przejście od konwekcji wymuszonej do naturalnej) i w konsekwencji wzrostu temperatury radiatora, a przede wszystkim chłodzonego mikroprocesora. Rolą materiału PCM w takich sytuacjach jest ograniczenie tempa wzrostu temperatury w układzie.

Do pomiarów temperatury wykorzystywano termoelementy płaszczowe wbudowane w grzejnik elektryczny, oraz dodatkowe termoelementy umieszczone w różnych miejscach radiatora (termoelementy typu K, w osłonie teflonowej, o średnicy ok. 0,5 mm). Do rejestracji przebiegów temperatury wykorzystywano przetworniki analogowo-cyfrowe firmy National Instruments (NI PCI-6281 z modułem SCB-68, oprogramowanie LabView) lub rejestrator wielokanałowy firmy Molytec. Na Rysunku 7 pokazano radiator zamontowany na stanowisku pomiarowym.



**Rysunek 6** Radiator z "porowatym" zasobnikiem na materiał PCM

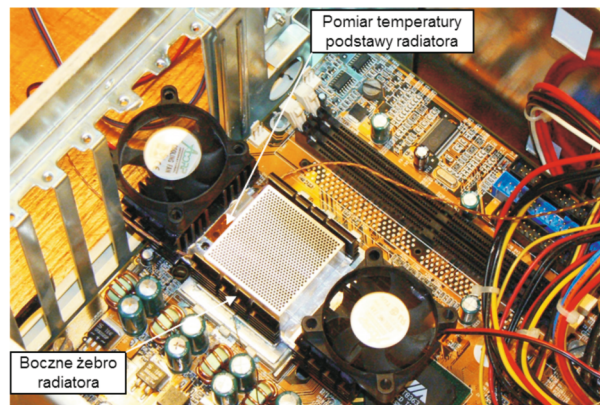
**Figure 6** Heat spreader with "porous" container filled with PCM

Warunki nominalne dla konkretnego radiatora ustalano (przez dobór mocy grzejnika-mikroprocesora) w taki sposób, aby materiał PCM w zasobniku miał temperaturę nieco poniżej temperatury topnienia (powinien być w stanie stałym). Dla kwasu laurynowego przyjęto maksymalną temperaturę w zasobniku równą 40°C.

### 4.3 Przykładowe wyniki pomiarów

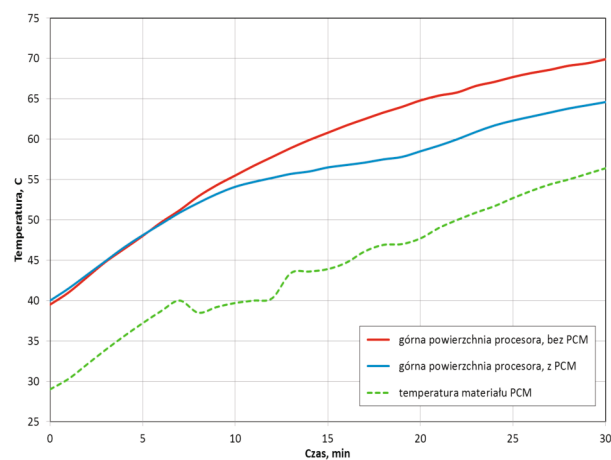
Na Rysunku 8 pokazano wyniki pomiarów zmian temperatury po zaburzeniu warunków odprowadzania ciepła dla radiatora pokazanego na Rysunku 5. W warunkach nominalnych (z włączonym wentylatorem) strumień ciepła odprowadzany przez radiator był równy 12,1 W. Temperatura na powierzchni grzejnika wynosiła ok. 40°C (zgodnie z założeniem). Pomiarzy wykonano dla radiatora z pustymi zasobnikami oraz po ich wypełnieniu kwasem laurynowym (masa PCM wynosiła 14 g). Porównując przebiegi czasowe krzywej czerwonej (pusty radiator) i niebieskiej (z PCM) widać znaczący wpływ pochłaniania ciepła przez materiał zmienno fazowy w izotermicznym procesie topnienia na zmniejszenie tempa narastania temperatury. Materiał PCM spowodował przesunięcie w czasie krzywej wzrostu temperatury o ok. 7 minut (powyżej temperatury 55°C).

Na Rysunku 9 przedstawiono analogiczne wyniki pomiarów dla radiatora z centralnym zasobnikiem z PCM. Podobnie jak w poprzednim przypadku pokazano zmiany w funkcji czasu temperatury powierzchni kontaktu grzejnik-radiator dla przypadku pustego zasobnika i zasobnika z materiałem PCM. Strumień ciepła odprowadzany do otoczenia w warunkach nominalnych wynosił 17 W. Widać znaczące – trwające około 3 minuty – zahamowanie wzrostu temperatury na powierzchni grzejnika-procesora, spowodowane topnieniem materiału PCM.



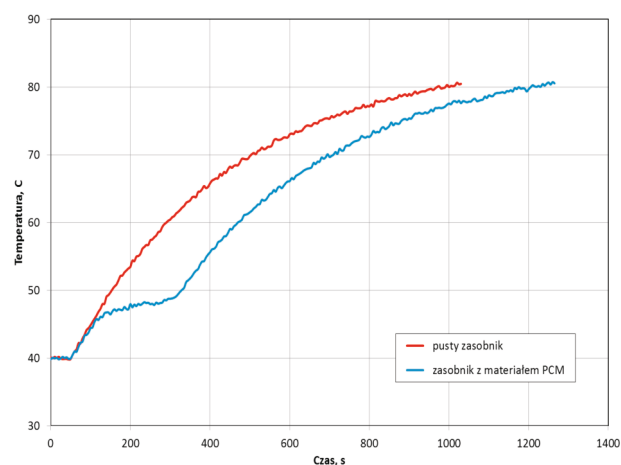
**Rysunek 7** Radiator z centralnym zasobnikiem z PCM na stanowisku pomiarowym. Pokazano dodatkowe termoelementy przyklejone do elementów radiatora

**Figure 7** Heat spreader with PCM container mounted in the experimental set-up. Additional thermocouples for detection of radiator's temperature are shown



**Rysunek 8** Charakterystyka pracy w zmiennych warunkach cieplnych radiatora z bocznymi zasobnikami z PCM

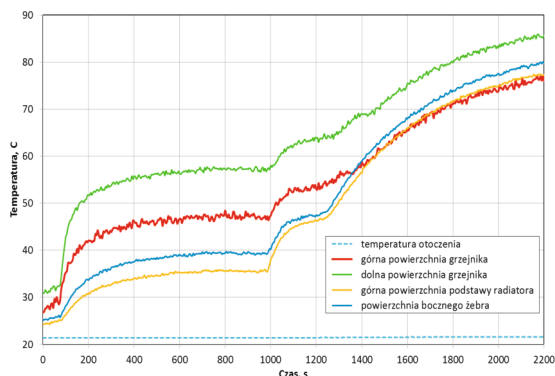
**Figure 8** Operational characteristic in transient thermal conditions of a heat spreader with PCM containers mounted to the sides



**Rysunek 9** Charakterystyka pracy w zmiennych warunkach cieplnych radiatora z centralnym zasobnikiem z PCM

**Figure 9** Operational characteristic in transient thermal conditions of a heat spreader with PCM container mounted to the central part

Na Rysunku 10 pokazano cały przebieg pomiaru – wskazania wszystkich termoelementów rozmieszczonych w różnych punktach układu – dla zasobnika wypełnionego materiałem PCM. W początkowym okresie – w tym przypadku do



**Rysunek 10** Zmiany temperatury w wybranych punktach układu w czasie badania charakterystyki radiatora w zmiennych warunkach cieplnych, pomiar z zasobnikiem wypełnionym PCM

**Figure 10** Temperature variations in selected points of a heat spreader during the test of its thermal behavior in transient conditions, „porous” block was filled with PCM

ok. 1000 sekund – ustalano poziom mocy nominalnej, przy której temperatura powierzchni grzejnika nie przekroczy założonych 40°C. Po uzyskaniu stanu ustalonego wyłączano wentylato-

ry kontynuując rejestrację temperatury. Pomiar kończono po przekroczeniu dopuszczalnej temperatury dla mikroprocesorów – w badaniach przyjęto, że jest to temperatura 80°C, mierzona na powierzchni kontaktu radiatora z grzejnikiem.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy, wybrane wyniki badań eksperymentalnych pokazują dużą skuteczność zastosowania materiałów zmiennofazowych PCM w układach chłodzenia elementów elektronicznych. Umieszczenie w strukturze radiatora stosunkowo niewielkiej ilości substancji (kilka procent udziału masowego) o dużym cieple przemiany fazowej daje bardzo duży przyrost jego pojemności cieplnej – nawet do 70% [5]. Powoduje to, że w stanach awaryjnych (np. po wyłączeniu wentylatora) narastanie temperatury procesora jest znacznie wolniejsze i pozwala na bezpieczne wyłączenie komputera bez utraty danych. Badania były realizowane w ramach działalności statutowej Politechniki Warszawskiej, a także w ramach Uczelnianego Programu Badawczego pt.: „Nowe materiały funkcjonalne do chłodziw układów elektronicznych”.

## LITERATURA

- [1] Jaworski M.: Techniki chłodzenia elementów elektronicznych. Artykuł przeglądowy. Chłodnictwo, Nr 12, 2007, str. 32-39; Nr 1-2, 2008, str. 50–52.
- [2] Jaworski M.: Zastosowanie materiałów zmiennofazowych (PCM) w układach chłodzenia elektroniki. Chłodnictwo, Nr 3, 2008, str. 42–46.
- [3] Domański R., Jaworski M., Serdyński M.: Numerical Analysis of Heat Transfer in PCM Containers Embedded in Heat Sinks for Electronics Cooling. HEAT 2008, Fifth Int. Conf. on Transport Phenomena In Multiphase Systems, Białystok, vol. 2, 167–174.
- [4] Domański R., Kołtyś J., Jaworski M.: Temperature Control of Electronics with the Use of Phase Change Materials (PCM) – Experimental Investigation. HEAT 2008, Fifth Int. Conf. on Transport Phenomena In Multiphase Systems, Białystok, vol. 2, 175–180.
- [5] Jaworski M.: Thermal performance of heat spreader for electronics cooling with incorporated phase change material, Applied Thermal Engineering, 35 (2012), 212–219.
- [6] Jaworski M.: Radiator do chłodzenia elementów elektronicznych, Patent nr P.372563, Urząd Patentowy RP, 2009.
- [7] Jaworski M., Bogusz P.: Badania eksperymentalne procesów chłodzenia elementów elektronicznych. Materiały Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy. Kraków 2004.