

UKŁAD POMIAROWY DO BADAŃ CHARAKTERYSTYK CHŁODZENIA RADIATORÓW Z WYKORZYSTANIEM POMIARÓW TERMOWIZYJNYCH

Daniel KLECHA¹, Waldemar MINKINA²

1. Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania
tel.: +48 696-390-963, e-mail: daniel.klecha@gmail.com
2. Politechnika Częstochowska, Instytut Elektroniki i Systemów Sterowania
tel.: (+4834) 32-50-819, +48 608-018-803, e-mail: minkina@el.pcz.czest.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodę pozwalającą na porównanie jakości chłodzenia wybranych typów radiatorów w warunkach konwekcji swobodnej z wykorzystaniem pomiarów termowizyjnych oraz autorskiego stanowiska badawczego. W tym celu zbudowano układ pomiarowy, który może być użyty do generowania identycznych temperatur pod czterema polami grzewczymi w tym samym czasie i w tych samych warunkach wymiany ciepła. Na obszarze pół grzewczych umieszczono badane radiatory. Odczyty wartości temperatury z analogowych czujników temperatury i termogramów zostały użyte do porównania, który radiator ma najniższą temperaturę na początku i na końcu pomiarów. Wyniki badań eksperymentalnych porównano z wynikami badań modelowych z wykorzystaniem środowiska programistycznego COMSOL Multiphysics[®]. Pozycje literaturowe w małym stopniu opisują podobną problematykę. Na podstawie wyników uzyskanych z przeprowadzonych pomiarów i badań modelowych, sformułowano wnioski dotyczące jakości chłodzenia wybranych typów radiatorów.

Słowa kluczowe: termografia, termowizja, radiatory, konwekcja naturalna, badania modelowe w COMSOL Multiphysics[®].

1. WSTĘP

Projektowanie radiatorów to bardzo skomplikowany, a zarazem ważny proces. Optymalny kształt radiatora pozwala ograniczyć jego wagę i wymiary [1, 2, 3, 4], co prowadzi do miniaturyzacji układów elektronicznych oraz do ograniczenia zapotrzebowania na dany metal, z którego radiator jest wykonany.

Podczas eksperymentu i badań modelowych zostały nałożone ograniczenia, dotyczące badań jedynie konwekcji naturalnej (swobodnej). W warunkach rzeczywistych, radiatory chłodzące elementy elektroniczne są zamknięte w obudowach, co generuje dodatkowe problemy do rozwiązania w trakcie projektowania. W literaturze jest wiele publikacji dotyczących konwekcji wymuszonej – taki rodzaj chłodzenia prowadzi do zmniejszenia rozmiaru radiatora. Cechą negatywną tego typu rozwiązań jest jednak zwiększone zapotrzebowanie na moc oraz generowanie dodatkowego hałasu. W pracy [5] obliczono optymalną relację pomiędzy grubością żeber radiatora oraz odstępami między nimi. W publikacji [6] przeprowadzono optymalizację wysokości żeber w zależności od ich kształtu. W artykule [7] przedstawiono wyniki badań różnego rodzaju radiatorów z włączoną oraz wyłączoną technologią PCM

(ang. Phase Change Material). W niniejszym artykule problem ten rozwiązano odmiennie, używając innych metod badawczych oraz rozbudowanego stanowiska badawczego, umożliwiającego jednoczesne badanie czterech typów radiatorów.

2. UKŁAD POMIAROWY

2.1. Opis układu

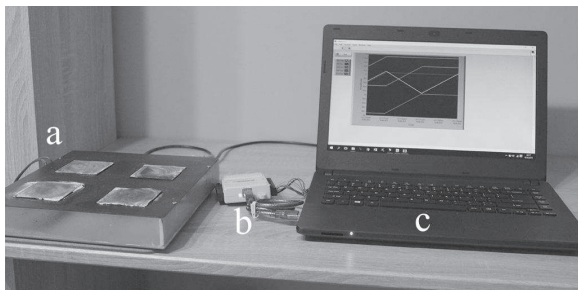
Układ pomiarowy (rys. 1) został opracowany tak, aby podgrzewać cztery pola w tym samym czasie i w tych samych warunkach grzewczych i wymiany ciepła. Istnieje tutaj możliwość zmiany maksymalnej temperatury płyty grzewczej. Układ nagrzewa się w zakresie temperatur $30 \div 115^{\circ}\text{C}$. Termostat zainstalowany pod płytą umożliwia osiągnięcie z góry założonej temperatury i utrzymanie jej na stałym poziomie. W celu uzyskania jednakowej temperatury na całej powierzchni układu, zastosowano grzałkę typu Heatbed MK3 marki RepRap, stosowaną w drukarkach 3D. Każde pole grzewcze ma zainstalowany niezależny analogowy czujnik temperatury typu LM335, którego sygnał wyjściowy jest odczytywany przez kartę pomiarową. Jako przewodniki ciepła zastosowano aluminium i miedź, z uwagi na ich dobre parametry w zakresie współczynnika wyrównywania temperatury a [m^2/s].

Maksymalna temperatura układu grzewczego jest uzyskiwana po około $15 \div 20$ minutach. Stabilizacja temperatury układu grzewczego następuje poprzez krótkie czasy załączania grzałki przez termostat – odpowiednie wykresy na monitorze komputera przedstawiają przebieg czasowy temperatury pół grzewczych stanowiska pomiarowego (rys. 1). Kiedy temperatura tych pół jest ustabilizowana, umieszczane są na nich radiatory i proces stabilizacji układu rozpoczyna się na nowo. Każde pole ma te same wymiary – kwadrat o boku 6 cm. Ryzyko oddziaływania cieplnego między radiatorami zostało zredukowane poprzez zapewnienie między nimi przestrzeni wynoszącej 4,5 cm (rys. 2).

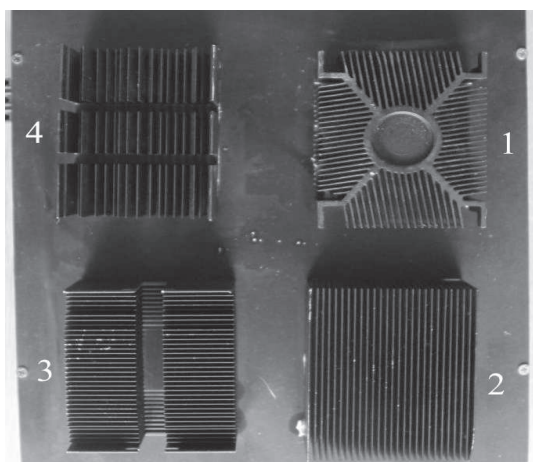
Cały proces grzania i stabilizacji temperatury jest rejestrowany z wykorzystaniem kamery termowizyjnej typu ThermaCAM PM 595 LW firmy FLIR (rys. 3 oraz rys. 4). Zmierzone za pomocą tej kamery różnice temperatur pomiędzy poszczególnymi polami grzewczymi wynoszą mniej niż 1°C (rys. 3).

Termogramy posłużyły do opracowania charakterystyki przebiegu zmian średniej temperatury radiatorów (rys. 5). Tendencja wzrostowa charakterystyk jest zgodna z oczekiwaniami.

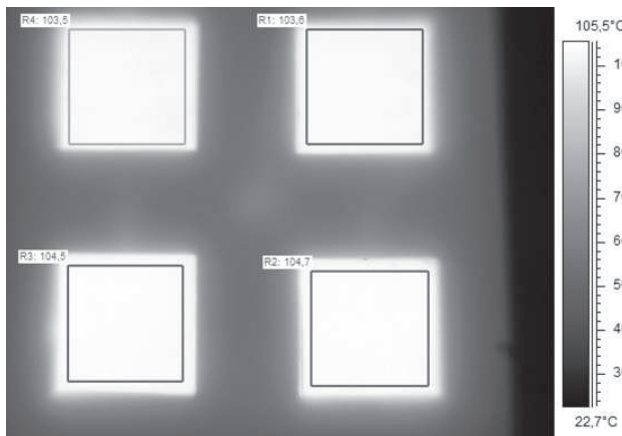
Do odczytu wartości temperatur z pięciu analogowych czujników, tj. czterech czujników pól grzewczych i jednego umieszczonego na środku głównej płyty grzewczej (który jest jednocześnie wykorzystywany przez termostat), zastosowano kartę pomiarową typu NI USB-6008 firmy National Instruments. Wyniki pomiarów odczytywane przez kartę wyświetlane są na wykresach oraz zapisywane do pliku, w celu późniejszej analizy z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania, opracowanego w środowisku programistycznym LabVIEW (rys. 6).



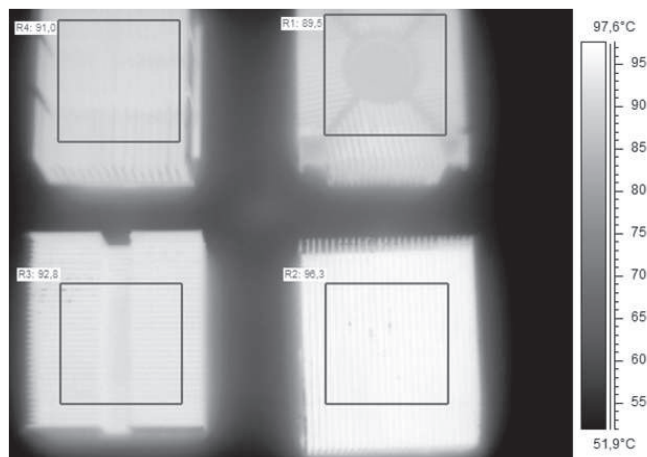
Rys. 1. Układ pomiarowy: a) płyta grzewcza; b) karta pomiarowa (NI USB-6008); c) laptop z przebiegami zmian temperatury



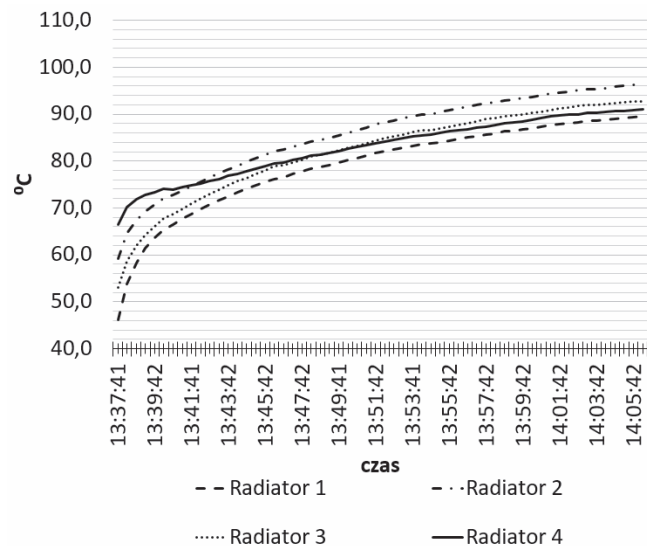
Rys. 2. Płyta grzewcza z zainstalowanymi radiatorami wykonanymi z aluminium i pomalowanymi wysokoemisyjną farbą żaroodporną



Rys. 3. Termogram przedstawiający układ grzewczy bez nałożonych radiatorów, po uzyskaniu stanu cieplnie ustalonego



Rys. 4. Termogram przedstawiający układ z radiatorami



Rys. 5. Charakterystyka przebiegu zmian średniej temperatury radiatorów odczytanej z termogramów

2.2. Warunki podczas eksperymentu

Eksperyment został przeprowadzony przy następujących warunkach: emisyjność powierzchni radiatorów $\epsilon_{ob} = 0,9$, odległość kamery od radiatorów $d = 0,6$ m, temperatura otoczenia i atmosfery $T_o \approx T_{am} = 21^\circ\text{C}$, wilgotność względna $\omega = 40\%$.

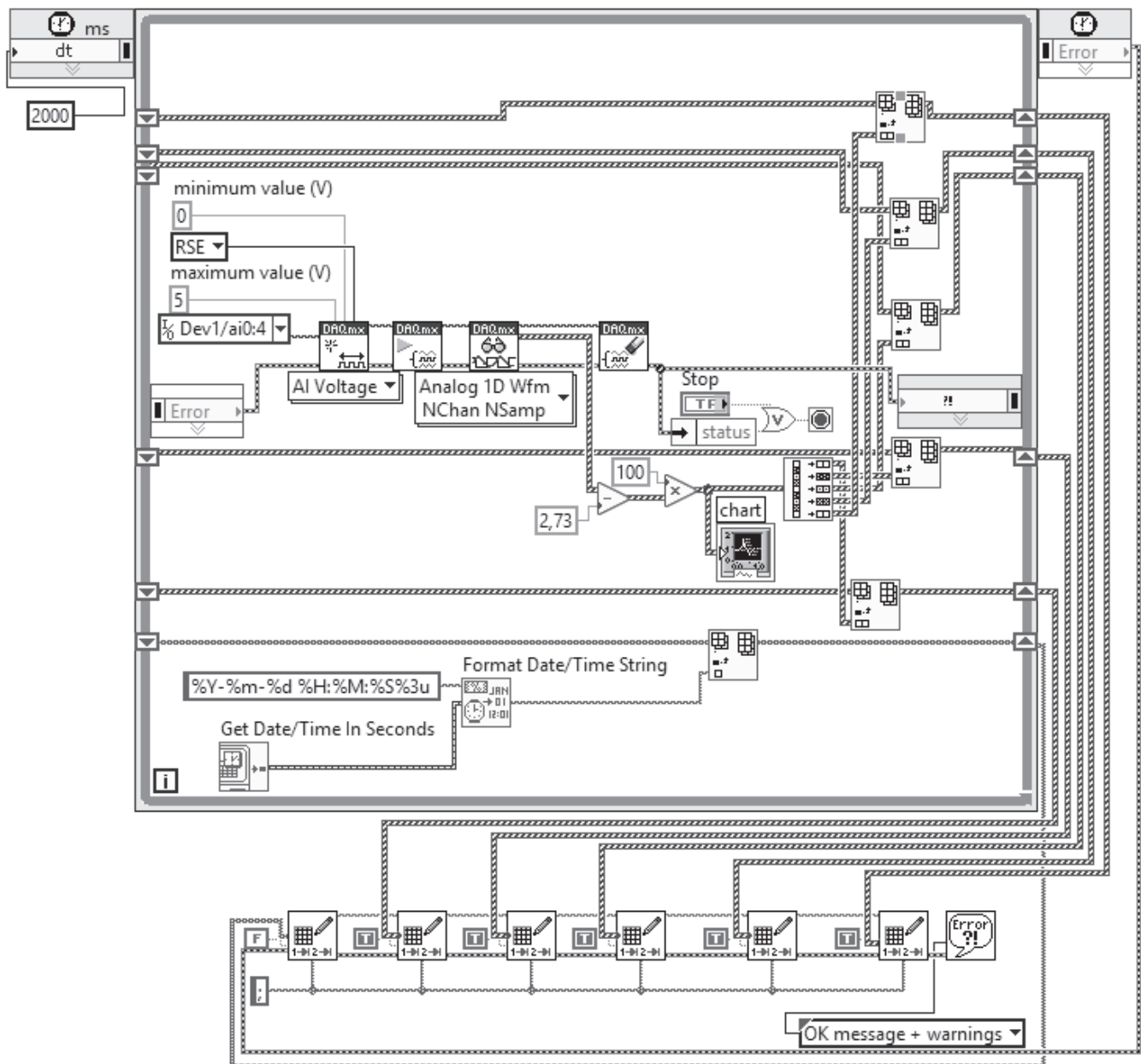
2.3. Analiza dokładności uzyskanych wyników

Wartość katalogowa błędu systematycznego dla kamery ThermaCAM PM 595 LW w warunkach laboratoryjnych wynosi $\pm 2^\circ\text{C}$ lub $\pm 2\%$. Dla mierzonego zakresu temperatur należy uwzględnić gorszy z tych błędów.

Przykładowo, dla radiatora o najniższej temperaturze, błąd względny pomiaru temperatury (tabela 2) obliczono za pomocą wzoru (1) [8].

$$\delta T = \frac{\Delta T}{T_{rz}} \cdot 100\% \approx \frac{2}{89,5} \cdot 100\% \approx 2,2\% \quad (1)$$

gdzie: ΔT – błąd bezwzględny, T_{rz} – wartość rzeczywista



Rys. 6. Schemat blokowy z programu LabVIEW do odczytu wskazań z czujników pomiarowych przez kartę NI USB-6008

Uwzględniono w tym przypadku jedynie błąd systematyczny kamery termowizyjnej. Nie wzięto pod uwagę błędów wnoszonych przez składowe wartości modelu pomiarowego kamery termowizyjnej [8], opisane w p. 2.2. Wynika to z faktu, że wartości temperaturowe poszczególnych radiatorów mierzone były w tych samych warunkach wymiany ciepła. W związku z tym wartość błędu pomiarowego dla każdego radiatora jest taka sama. Dla autorów interesujące było natomiast porównanie temperatur poszczególnych radiatorów i zaobserwowanie występujących pomiędzy nimi różnic.

3. BADANIA MODELOWE

Układ z eksperymentu (rys. 2) został odtworzony jako model (rys. 7 oraz rys. 8). Zastosowano w tym celu program COMSOL Multiphysics® [9]. Widok okna programu przedstawiono na rysunku 9.

Program COMSOL Multiphysics® przetwarza i rozwiązuje modele za pomocą najnowocześniejszych metod analizy numerycznej. W modułach programu stosowane są różne metody, w tym metoda elementów

skończonych, metoda objętości skończonych, metoda elementów brzegowych i metody śledzenia cząstek. Główny nacisk położony jest jednak na wykorzystanie metody elementów skończonych. W programie dostępnych jest wiele rodzajów elementów skończonych, a elementy integralne są automatycznie generowane przez oprogramowanie [9]. Podstawy teoretyczne wymiany ciepła, stosowane w badaniach modelowych w niniejszym artykule przedstawiono w [1, 10, 11, 12].

Do modelu układu wprowadzono wymiary geometryczne poszczególnych radiatorów użytych w eksperymencie, jak również parametry cieplne materiałów, z których radiatorzy zostały wykonane (tabela 1). Zakres wartości temperatury otrzymanej podczas badań modelowych był rozbieżny z wynikami otrzymanymi w trakcie badań eksperymentalnych. W oparciu o wyniki pomiaru temperatury radiatorów, uzyskane za pomocą dwóch opisanych metod, dokonano porównania, które przedstawiono w tabeli 2. Należy zauważyć, że wyniki badań modelowych wskazują jako najchłodniejszy radiator inny model niż wykazały to badania eksperymentalne. Ta sama sytuacja ma miejsce w przypadku radiatora

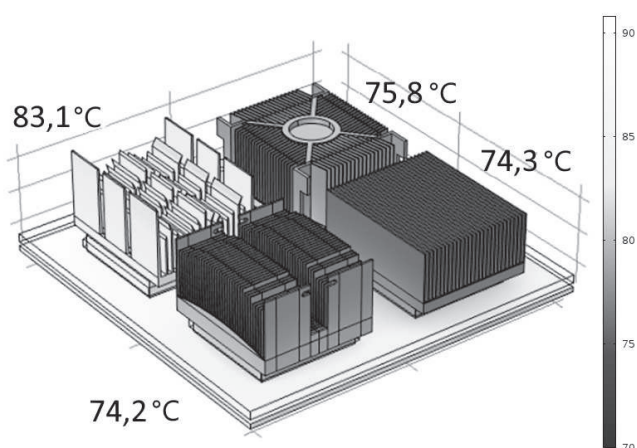
o najwyższej temperaturze. Przyczyny tego stanu rzeczy opisane zostały w dalszej części artykułu.

Tabela 1. Wagi i pola powierzchni radiatorów

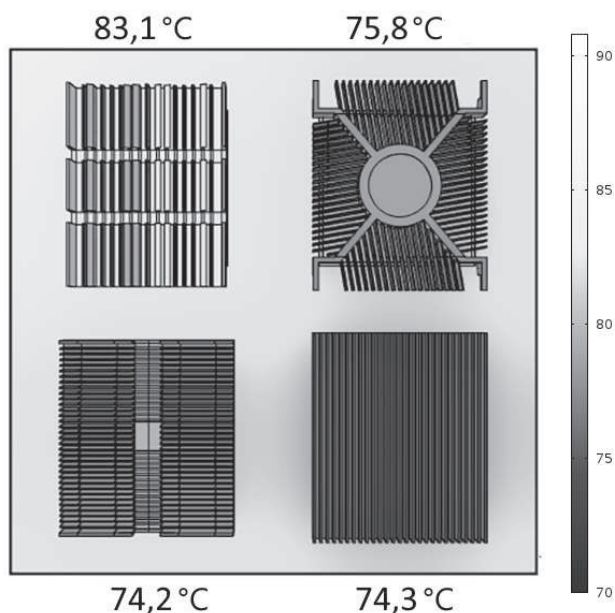
Numer radiatora	Waga, [kg]	Pole powierzchni, [m ²]
1	0,327	0,134
2	0,257	0,154
3	0,289	0,156
4	0,207	0,077

Tabela 2. Średnie wartości temperatur radiatorów

Numer radiatora	Temperatura uzyskana podczas eksperymentu, [°C]	Temperatura uzyskana podczas badań modelowych, [°C]
1	89,5	75,8
2	96,3	74,3
3	92,8	74,2
4	91,0	83,1



Rys. 7. Termogram 3D obliczony w programie COMSOL Multiphysics®



Rys. 8. Termogram 2D obliczony w programie COMSOL Multiphysics®

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W czasie pomiarów zaobserwowano, że radiatory były w stanie schłodzić układ szybciej niż grzałka była w stanie uzupełnić straty ciepła. Taki spadek temperatury jest akceptowalny, ponieważ warunki pracy dla wszystkich radiatorów były cały czas takie same, a interesujące były tylko różnice temperatur występujące między nimi. Problem ten mógłby zostać zminimalizowany poprzez wykorzystanie grzałki o wyższej mocy grzewczej. Grzałka zastosowana w układzie pracowała z wykorzystaniem pełnej mocy. Na chwilę obecną firma RepRap nie produkuje wydajniejszych grzałek.

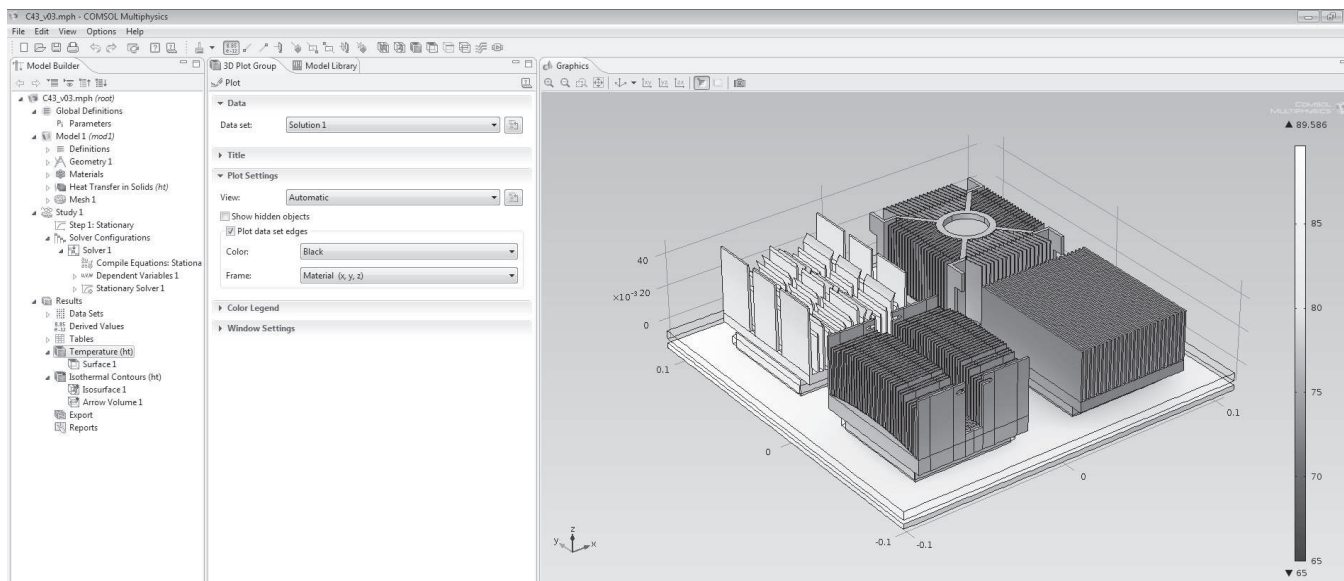
Różnice pomiędzy zdolnością odprowadzenia ciepła przez poszczególne radiatory były niewielkie, ale zauważalne, dlatego prowadząc dalsze szczegółowe badania, można spośród badanych radiatorów zoptymalizować i dobrać taki jego kształt, który najlepiej odprowadzi ciepło.

Można zaobserwować znaczne różnice wartości temperatur uzyskanych z eksperymentu i badań modelowych. Może to wynikać ze wspomnianego wyżej faktu, że układ podczas eksperymentu nie uzyskał stanu ustalonego. Z kolei wyniki badań modelowych obarczone są błędami wynikającymi z aproksymacji pola powierzchni radiatorów. Różnice te mogą być także spowodowane przez wprowadzenie pewnych uproszczeń dotyczących geometrii radiatora w przyjętym jego modelu. Należy zaznaczyć, że sama różnica temperatur między poszczególnymi polami grzewczymi była nie większa niż 1°C (rys. 3).

Podane w artykule wyniki badań są wynikami wstępnymi. Następnym krokiem będzie analiza innych typów i rodzajów radiatorów, różniących się kształtem, wagą i polem powierzchni wymiany ciepła. Planowane są również badania eksperymentalne i modelowe tych radiatorów umieszczonych na polach grzewczych w pozycji pionowej oraz prace nad stworzeniem dokładniejszego modelu radiatorów w środowisku COMSOL Multiphysics®

5. BIBLIOGRAFIA

1. Dulniew G. N.: Wymiana ciepła w urządzeniach elektronicznych i ich elementach, WN-T Warszawa 1967 r.
2. Więcek B., Lis M., Zwolenik S., Danych R., Wajman T.: Zastosowanie termowizji w badaniach nieniszczących i w mikroelektronice, Pomiary Automatyka Kontrola, 48 (2002) Nr 11, pp. 8-13.
3. Felczak M.: Analiza i projektowanie elementów systemu chłodzenia układów elektronicznych w warunkach konwekcji wymuszonej, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2007.
4. Świątczak T.: Badania właściwości termicznych układów elektronicznych przy użyciu metod termografii aktywnej, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, Łódź 2011.
5. Bar-Cohen A., Iyengar M., Kraus A.D.: Design of optimum plate-fin natural convective heat sinks, Journal of Electronic Packaging 125(2) June 2003, DOI: 10.1115/1.1568361.
6. Nafar M., Tavassoli M.: An analysis for optimization of heat transfer for various heat sink cross-section and length, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(12): 1685-1682, 2011 ISSN 1991-8178.



Rys. 9. Widok okna programu w środowisku COMSOL Multiphysics®

7. Kadbhane S.V., Palande D. D: Experimental study of natural convective heat transfer from vertical rectangular fin array at different angle of inclination, International Journal of Current Engineering and Technology E-ISSN 2277-4106, P-ISSN 2347-5161.
8. Minkina W., Dudzik S.: Infrared thermography – errors and uncertainties, John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2009, ISBN 978-0-470-74718-6.
9. Introduction to COMSOL Multiphysics® Users Guide, © 1998–2015 COMSOL.
10. Wark K.: Thermodynamics, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988, ISBN 0-07-068286-0.
11. Daund V. S, Walunj A. A., Palande D. D.: Review of natural convective heat transfer from rectangular vertical plate fins, International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, Volume No.02, Issue No. 07, July 2014.
12. Das D., Dwivedi A., Gupta S.: Optimum design parameters for heat transfer from triangular fin array within a rectangular enclosure, Asian Journal of Engineering and Applied Technology, ISSN 2249-068X Vol. 2 No. 2, 2013, pp. 47-51.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy pragną podziękować Akademickiemu Centrum Komputerowemu ACK CYFRONET AG-H za umożliwienie wykonania obliczeń w środowisku programistycznym COMSOL Multiphysics® Modeling Software na komputerze dużej mocy.

THE MEASUREMENT SYSTEM FOR RESEARCH ON CHARACTERISTIC OF COOLING OF RADIATORS USING INFRARED THERMOGRAPHY

The aim of this paper is to discuss method to compare cooling parameter in selected radiators. In this purpose measurement system was created which can be used to generate identical temperature under four radiators in the same time and conditions. Readings from analog sensors and thermograms were used to compare which radiator has the lowest temperature at the beginning and at the end of the measurement. Paper describes method to compare radiators using measurements from sensors and thermograms which is supplement to the theoretical calculations. Literature positions discuss this method slightly. Method is given capabilities to analyse whole process of cooling and deduce additional conclusions. Differences between temperatures of the radiators are noticeable and can be used to select the most performance radiator. The model research was compared with calculations form COMSOL Multiphysics®. The coolest radiator was different than this from experiment. This is the initial research. Next stage of the work will be carried out extensive research with the other radiators which will contain different shapes, weights and surface areas.

Keywords: thermography, thermovision, radiators, natural convection, calculations with COMSOL Multiphysics® software.

