

Wiesław ŁYSKAWIŃSKI\*, Wojciech SZELAĞ\*, Damian GRZEŚKO\*

## ANALIZA PRACY UKŁADU CHŁODZĄCO-GRZEW CZEGO Z OGNIWEM PELTIERA

W artykule przedstawiono opracowany układ chłodząco-grzewczy z ogniwem Peltiera, w których strona gorąca ogniwa była chłodzona na dwa sposoby: przy pomocy bloku wodnego i przy wykorzystaniu radiatora z wentylatorem. Opracowano modele cieplne układu i wdrożono do obliczeń oprogramowanie do wyznaczania parametrów modułów Peltiera oraz wartości temperatur w wybranych punktach układu. Porównano otrzymane wyniki obliczeń z rezultatami badań eksperymentalnych uzyskanych na zbudowanym stanowisku pomiarowym. Na tej podstawie sformułowano wnioski i przedstawiono propozycje rozwiązań poprawiających właściwości funkcjonalne badanego układu.

SŁOWA KLUCZOWE: moduł Peltiera, układ chłodząco-grzewczy, model cieplny, analiza, badania.

### 1. WSTĘP

Ogniwa Peltiera są elementami termoelektrycznymi, w których dzięki wykorzystaniu zjawiska Peltiera, możliwe jest jednoczesne pochłanianie lub wydzielanie energii cieplnej na przeciwległych powierzchniach modułu. Wykonane są z dwóch płytek ceramicznych, pomiędzy którymi umieszcza się naprzemiennie półprzewodniki (z tellurku bizmutu -  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ) typu "n" oraz "p" połączone szeregowo za pomocą blaszek miedzianych [1, 8]. W ogniwach Peltiera występuje ponadto zjawisko Seebecka związane z wytwarzaniem siły elektromotorycznej w złączu dwóch różnych metali lub półprzewodników znajdujących się w odmiennych temperaturach [4, 11]. Umożliwia ono wykorzystanie ogniw do wytwarzania energii elektrycznej z dostarczonej energii cieplnej (ciepła odpadowego np. w hutach, rafineriach, cementowniach, spalarniach śmieci, pojazdach samochodowych, statkach) lub konwersji energii z naturalnych źródeł (np. energii słonecznej, geotermalnej) [7, 12]. Moduły Peltiera stosuje się w gospodarstwach domowych [6, 11], medycynie, wojsku [7] czy w badaniach przestrzeni kosmicznej [14]. Wykorzystywane są one także w pompach ciepła, w osuszaczach powietrza czy w układach chłodzących [2, 9], np. procesorów, diod laserowych, pojazdów. Niewątpliwymi zaletami ogniw Peltiera jest ich długa ży-

---

\* Politechnika Poznańska

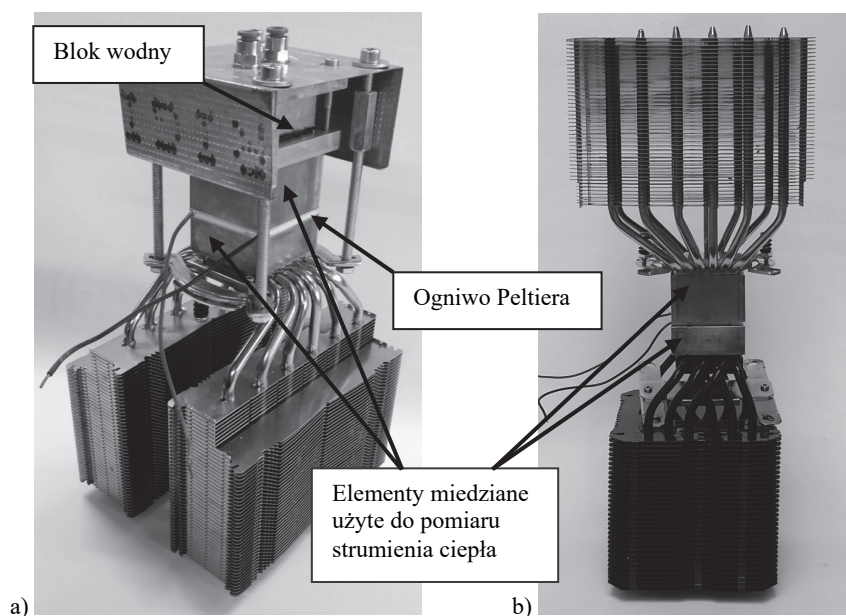
wotność, odporność na wstrząsy, zmianę pozycji pracy, a także brak czynnika chłodzącego, który stosowany jest w typowych układach chłodzenia. Niezwykle ciekawym zastosowaniem modułów Peltiera, w którym wykorzystuje zarówno zdolności grzewcze jak i chłodnicze ogniw, jest termicznie regulowana odzież [13]. Ułatwia ona utrzymanie stałej temperatury i jest bardzo dużym udogodnieniem dla ludzi przemierzających się między kontynentami, na których występują duże różnice temperatur lub osób uprawiających sport. W medycynie odzież ta może wspomagać leczenie zapalenia czy urazów stawów, łokcia tenisisty, migreny, itp.

W celu zbadania zdolności chłodzących oraz grzewczych ogniw Peltiera zaprojektowano i zbudowano stanowisko pomiarowe oraz wykonano badania pozwalające na wyznaczenie optymalnych warunków pracy ogniw. Opracowano oprogramowanie do wyznaczania ich parametrów w określonych warunkach pracy.

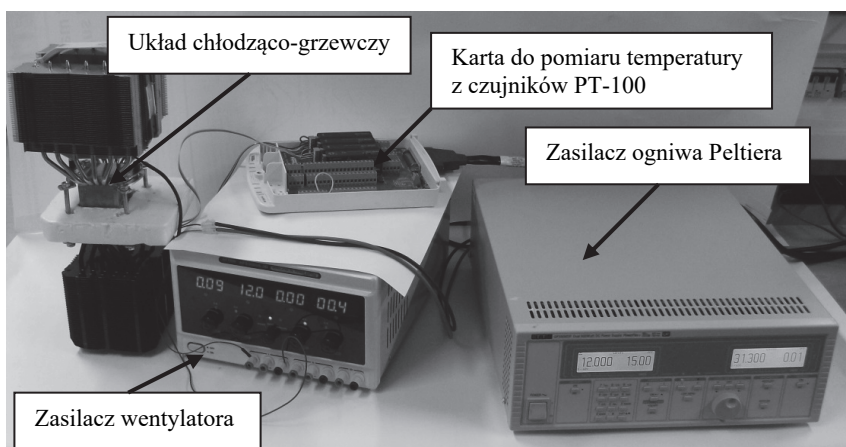
## 2. KONCEPCJA I BUDOWA UKŁADU

Przed przystąpieniem do opracowania układu chłodząco-grzewczego, określono stawiane przed nim wymagania. Najważniejszym z nich była mała bezwładność cieplna. Szybka reakcja cieplną uzyskuje się przez maksymalne skrócenie i zmniejszenie pojemności cieplnej drogi przepływu ciepła z powierzchni ogniwa Peltiera do radiatora. Ponadto, należy dążyć do uzyskania jak najmniejszego stosunku masy radiatora odbierającego energię cieplną z ogniwa, do jego mocy. Na stanowisku w celu dokonania pomiaru mocy cieplnych, pobieranej i oddawanej przez ogniwo umieszczono pomiędzy ogniwnem a radiatorem lub blokiem wodnym, dodatkowe bloki miedziane. Na obu powierzchniach tych elementów mających bezpośredni kontakt ze źródłem i odbiornikiem ciepła zostały, przy użyciu pasty termoprzewodzącej, przymocowane rezystancyjne czujniki temperatury typu PT-100. Czujniki te podłączono do karty pomiarowej współpracującej z dedykowanym oprogramowaniem pozwalającym na odczyt i rejestrację temperatur. Pomiar temperatur na powierzchniach tych dodatkowych bloków miedzianych umożliwia wyznaczenie strumieni cieplnych. Widok opisywanego układu z blokiem wodnym oraz radiatorem odbierającym ciepło z gorącej strony ogniwa Peltiera przedstawiono na rys. 1.

Docelowo urządzenie powinno pracować autonomicznie, stąd po wykonaniu pomiarów w tym układzie, zamieniono blok wodny na radiator (rys. 1b) o zwartej konstrukcji i małej rezystancji termicznej ( $0,11 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ). Wykorzystano radiatory stosowane w sprzęcie komputerowym do chłodzenia procesorów. Widok kompletnego stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Układ chłodzenia z: a) radiatorem i blokiem wodnym, b) dwoma radiatorami



Rys. 2. Stanowisko pomiarowe do badania układów chłodzenia

### 3. OPROGRAMOWANIE DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW UKŁADU I TEMPERATURY

Korzystając z równań opisujących zjawiska występujące w ogniwie Peltiera [5, 8], napisano w języku C# (Visual Studio 2017) oprogramowanie do analizy

i wyznaczania parametrów układu grzewczo-chłodzącego. Oprogramowanie umożliwia obliczenie mocy cieplnej oddawanej po stronie gorącej ogniwa Peltiera i mocy cieplnej pochłanianej przez ogniwo po stronie zimnej. Wielkości te określa się dla zadanej geometrii układu, parametrów ogniwa i radiatorów oraz mocy dostarczonej. Ponadto za pomocą zaimplementowanych w programie równań modeli cieplnych można wyznaczyć temperatury wybranych podzespołów układu. Na podstawie obwodowego modelu zjawisk [5] i parametrów modułu Peltiera można określić:

- moc chłodzącą ogniwa

$$P_c = 2n \left[ k_s I T_1 - \frac{I^2 \rho}{2G} - \lambda_p (T_2 - T_1) G \right] \quad (1)$$

- moc oddawaną przez ogniwo

$$P_c = 2n \left[ k_s I T_1 + \frac{I^2 \rho}{2G} - \lambda_p (T_2 - T_1) G \right] \quad (2)$$

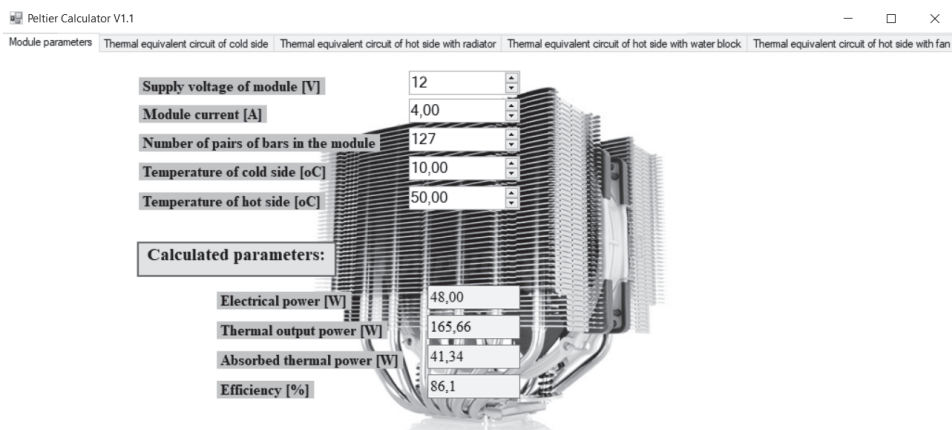
gdzie:  $I$  – natężenie prądu elektrycznego,  $T_2, T_1$  – temperatury odpowiednio gorącej i zimnej powierzchni ogniwa,  $G$  – współczynnik geometryczny ogniwa definiowany jako stosunek jego powierzchni do wysokości,  $n$  – liczba par półprzewodnikowych kolumn w całym ogniwie  $k_s$  – współczynnik Seebeck’a,  $\lambda_p$  – przewodność cieplna właściwa,  $\rho$  – rezystywność. Trzy ostatnie parametry zmieniają swoje wartości w funkcji temperatury. Wartości tych parametrów dla ogniw wykonanych z tellurku bizmutu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry materiałowe tellurku bizmutu stosowanego w ogniwach Peltiera.

$T$ [K]	$\rho$ [ $10^{-3}\Omega\text{cm}$ ]	$\lambda_p$ [W/(mK)]	$k_s$ [ $10^{-3}\text{V/K}$ ]
273	0,92	1,61	0,194
300	1,01	1,51	0,202
325	1,15	1,53	0,207
350	1,28	1,55	0,210
375	1,48	1,58	0,208

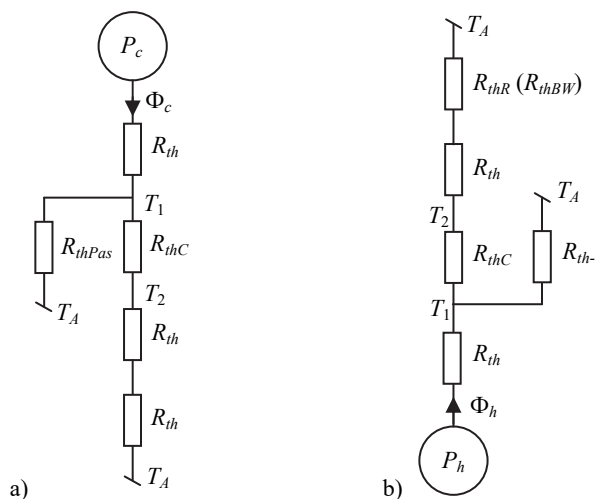
Widok interfejsu programu przedstawiono na rysunku 3. Na ekranie komputera widoczne są parametry wprowadzane i obliczane dla analizowanego układu. Uzyskane wartości mocy cieplnej przy zadanej różnicy temperatur na module Peltiera pozwalają na określenie wymaganej powierzchni i zdolności oddawania ciepła radiatorów montowanych po ciepłej i zimnej stronie ogniwa. Na tej podstawie można dobrać z katalogu typ radiatora.

Na podstawie rezystancji modułu i zadanych temperatur obliczana jest jego rezystywność oraz określa się przewodność cieplną i współczynnik Seebeck’a.



Rys. 3. Formularz główny programu do analizy układu z ogniwnem Peltiera

Oprogramowanie umożliwia również wyznaczenie temperatur w wybranych miejscach układu. Wykorzystuje się do tego celu obwodowy model cieplny układu. Opracowano zastępcze schematy cieplne torów: strona zimna ogniwa Peltiera – radiator pochłaniający ciepło (rys. 4a) oraz strona gorąca ogniwa Peltiera – radiator rozpraszający ciepło (ew. blok wodny) (rys. 4b).



Rys. 4. Model cieplny toru: a) zimna strona ogniwa Peltiera – radiator pochłaniający ciepło  
b) gorąca strona ogniwa Peltiera – radiator rozpraszający ciepło (blok wodny)

Na rysunku 4 wprowadzono oznaczenia:  $P_c$ ,  $P_h$  – moce cieplne odpowiednio strony zimnej i gorącej,  $R_{thP}$ ,  $R_{thCu}$ ,  $R_{thR}$ ,  $R_{thBW}$ ,  $R_{thPas}$  – rezystancje termiczne odpowiednio pasty termoprzewodzącej  $0,015 \div 0,1$  K/W, bloku miedzianego,

radiatora, bloku wodnego (obliczona na podstawie jego wymiarów geometrycznych i przewodności cieplnej aluminium), pasożytnicza gałęzi równoległej uwzględniająca izolację bocznych ścianek bloku miedzianego,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_A$  – temperatury odpowiednio na powierzchni ogniwa Peltiera, radiatora pochłaniającego / rozpraszającego ciepło (bloku wodnego), otoczenia.

Rezystancja termiczna elementu zależy od przewodności cieplnej materiału  $\lambda_p$ , jego powierzchni  $S$  i długości  $l$ :

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda_p S} \quad (3)$$

Rezystancje termiczne radiatorów są niekiedy podane w ich dokumentacji technicznej lub można je wyznaczyć na podstawie wymiarów powierzchni rozpraszającej ciepło.

W celu udokładnienia modeli cieplnych, do gałęzi głównej rezystancji cieplnych (rys. 4), dodano gałąź równoległą z rezystancją pasożytniczą uwzględniającą niedostatecznie zaizolowanie ścianek bocznych bloku miedzianego. Przez tę dodatkową rezystancję termiczną odpływa część strumienia cieplnego.

W celu uwzględnienia stopnia odizolowania bloków miedzianych od otoczenia, przy wyznaczeniu wartości rezystancji pasożytniczej w modelu cieplnym, zastosowano dodatkowy współczynnik korekcyjny. Wartość tego współczynnika zmienia się w zakresie od 10, dla słabo izolowanego bloku od strony gorącej ogniwa, do 26, dla lepiej izolowanego bloku miedzianego od strony zimnej ogniwa.

Przy zastosowaniu w układzie chłodzenia wentylatora o regulowanej prędkości przepływu powietrza, ilość przyjmowanej mocy cieplnej przez radiator nie jest stała [10] i wynika ze wzoru:

$$P = h_{vp} A_R \Delta T \quad (4)$$

gdzie:  $h_{vp}$  – współczynnik konwekcji przy prędkości powietrza  $v_p$ ,  $A_R$  – powierzchnia radiatora,  $\Delta T$  – różnica pomiędzy średnią temperaturą radiatora i otoczenia.

Współczynnik przyjmowania ciepła przez radiator, w zależności od prędkości przepływającego powietrza  $v_p$ , opisuje zależność:

$$h_{vp} = h \left( 1 + k_{vp} \sqrt{v_p} \right) \quad (5)$$

gdzie:  $h$  – wartość współczynnika konwekcji naturalnej dla materiału, z którego wykonano radiator,  $k_{vp}$  – współczynnik charakteryzujący intensywność chłodzenia powierzchni.

Stąd opór przyjmowania ciepła przez radiator obliczany jest z zależności:

$$R_{thR} = \frac{\Delta T}{P} \quad (6)$$

Jako temperaturę otoczenia przyjęto temperaturę pomieszczenia, w którym wykonywano pomiary lub temperaturę wewnątrz izolowanej komory od strony zimnej ogniwa.

#### 4. BADANIE UKŁADU CHŁODZĄCO-GRZEW CZEGO Z OGNIWAMI PELTIERA

Badania zostały wykonywane dla trzech ogniw Peltiera TEC-127085, TES1-24106, TEC1-12726. W czasie pomiarów chłodzony radiator umieszczono w komorze termicznej wykonanej z polistyrenu ekstrudowanego o przewodności cieplnej około 0,034 W/mK. Zastosowany materiał ma lepsze właściwości izolacyjne od tradycyjnego styropianu, jednocześnie charakteryzując się znacznie wyższą wytrzymałością mechaniczną i łatwością obróbki. Wykonano badania pobierania ciepła ze schładzanej komory układu przez radiator (bez wymuszonej cyrkulacji powietrza). Następnie sprawdzono możliwości układu do lokalnej poprawy komfortu termicznego, wydmuchując schłodzone w komorze powietrze za pomocą wentylatora (rys. 5). W układzie wentylatorowym powietrze z pomieszczenia było zasysane przez rurę o średnicy 100 mm, która następnie, przy wejściu do komory, zmieniała kształt na prostokątny, o wymiarach 55x110 mm. Taki zabieg miał na celu skierowanie możliwie największej ilości strumienia powietrza na radiator. Na wyjściu z komory, również umieszczono rurę o średnicy 100 mm i zmiennym kształcie przekroju, przedłużając ją dodatkowo rurą o długości 1000 mm. Na wylocie rury umieszczono wentylator, o regulowanej prędkości obrotowej, w celu wymuszenia ciągłego przepływu powietrza przez układ. Przy pomocy termopary mierzono temperaturę na wyjściu układu, natomiast jako temperaturę wejściową, przyjęto zmierzoną temperaturę otoczenia. Sposób umieszczenia układu w zaizolowanej termicznie komorze oraz rury doprowadzającą i odprowadzającą pokazano na rys. 5. Bloki miedziane były dodatkowo izolowane cieplnie w celu minimalnej utraty strumienia ciepła na drodze ogniwo Peltiera – radiator. Komorę od góry zamknięto pokrywą wykonaną z materiału o małej przewodności cieplnej.

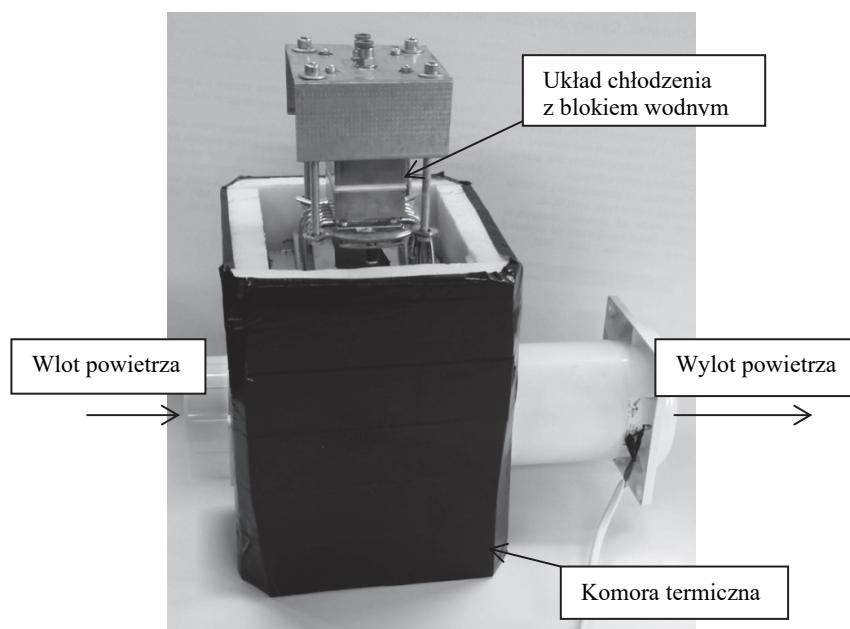
Mierząc temperatury po obu stronach bloków miedzianych, za pomocą czujników PT-100, wyznaczono wartość strumienia cieplnego dla strony zimnej i gorącej ogniwa. Korzystano przy tym z zależności:

$$\Phi = \frac{\lambda A \Delta T}{d} \quad (7)$$

gdzie:  $\lambda$  – przewodność cieplna właściwa bloku miedzianego (375 W/mK),  $A$  – powierzchnia,  $\Delta T$  – różnica temperatur po obu stronach bloku,  $d$  – grubość. Wartości strumieni cieplnych dla stanów pracy ustalonych, uzyskane z pomiarów i obliczone za pomocą przedstawionego wyżej modelu cieplnego zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Strumienie ciepłne i sprawności ogniwa TEC-127085 uzyskane z pomiarów i obliczeń.

		Wartości zmierzone				Wartości obliczone			
$U$ [V]	$I$ [A]	$\Phi_c$ [W]	$\Phi_h$ [W]	$\eta_c$ [%]	$\eta_h$ [%]	$\Phi_c$ [W]	$\Phi_h$ [W]	$\eta_c$ [%]	$\eta_h$ [%]
8	4,47	41,3	178,1	115,5	498	39,4	157,5	110,3	440
10	5,84	42,7	289,7	73,1	496	35,5	216,7	60,8	371
12	7,21	38,7	428,5	44,7	495	29,1	282,4	33,7	327
14	8,37	31,5	578,9	26,9	494	20,8	347,6	17,7	297



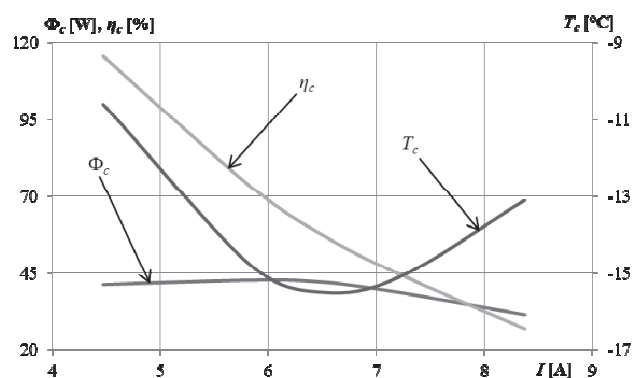
Rys. 5. Układu chłodzenia w komorze izolacyjnej z wymuszonym przepływem powietrza

Można zauważyć, że wartości strumienia ciepłnego zmierzone i obliczone po stronie zimnej ogniwa  $\Phi_c$  dla napięć zasilania  $U=8$  V i  $U=10$  V osiągają wartości zbliżone, natomiast wartości strumienia ciepłnego po stronie gorącej  $\Phi_h$  obarczone są znacznym błędem. Spowodowane jest to słabą izolacją termiczną elementu miedzianego od strony bloku wodnego. Ścianki boczne elementów miedzianych, przez które przenika część strumienia ciepłnego do otoczenia, mogą powodować istotny wzrost różnicy temperatur zmierzonych na tych elementach. Ponadto układ chłodzący był skręcony śrubami metalowymi łączącymi dwa radiatory (zimny i ciepły), co dodatkowo wpływało na zmniejszenie różnicy temperatur. Dosyc szczegółowymi



mogą wydawać się pomiary, dla których sprawność ogniwa przekraczała 100%. Dla małych wartości prądów w ogniwie Peltiera, takie wyniki uzyskano zarówno w układzie pomiarowym jak i z obliczeń wykonanych z pomocą opracowanego oprogramowania. Autorzy innych prac [3, 8] otrzymują w tym zakresie podobne wyniki.

Na podstawie uzyskanych wartości strumieni po stronie zimnej i gorącej ogniwa, wyznaczono sprawności chłodzącą  $\eta_c$  i grzewczą  $\eta_h$  ogniwa (tabela 2). Definiuje się je odpowiednio jako stosunek wartości strumienia cieplnego pochłoniętego lub strumienia cieplnego oddanego do mocy elektrycznej dostarczonej. Wybrane wyniki pomiarów dla układu chłodzącego z ogniwem TEC-127085 przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Charakterystyka temperatury  $T_c$ , sprawności  $\eta_c$  i strumienia cieplnego  $\Phi_c$  w funkcji prądu dla ogniwa TEC-127085 i układu z blokiem wodnym

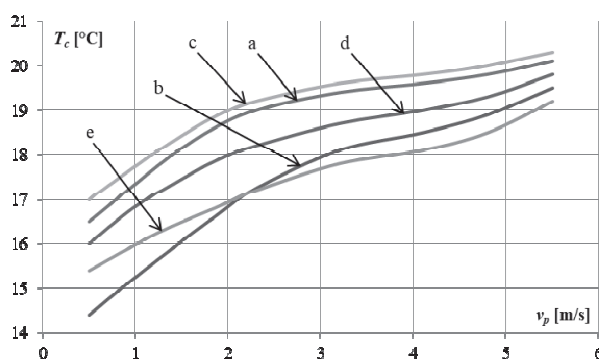
W tabeli 3 zestawiono zmierzone  $T_m$  i wyznaczone  $T_w$  za pomocą oprogramowania wartości temperatur na powierzchni ogniwa Peltiera, dla wybranych wartości napięć  $U$  i prądów  $I$  zasilających ogniwo.

W modelu cieplnym dla gorącej strony ogniwa nie uwzględniono rezystancji termicznej wody. Przez to temperatura podstawy bloku wodnego od strony zbiornika wody nie jest równa temperaturze wody, która została przyjęta jako temperatura otoczenia. Powoduje to większe rozbieżności uzyskanych temperatur, szczególnie przy bardzo dużych wartościach strumienia cieplnego wydzielanego na gorącej stronie ogniwa, kiedy to przepływająca woda nie jest w stanie odebrać całego ciepła z podstawy bloku wodnego. W celu zwiększenia dokładności opracowanego modelu cieplnego należałoby rozważyć uwzględnienie w oprogramowaniu przewodności cieplnej wody.

Podobne badania wykonano dla dwóch pozostałych ogniw Peltiera. Przeprowadzono również badania układu przy wymuszonym przepływie powietrza przez komorę termiczną (rys. 5). Zmierzone temperatury  $T_p$  powietrza wydmuchiwane przez rurę wylotową dla badanych ogniw w funkcji prędkości przepływu powietrza  $v_p$  przedstawiono na rys. 7.

Tabela 3. Temperatura na powierzchni ogniwa Peltiera TEC-127085 -  $T_m$  zmierzona i  $T_w$  obliczona, przy chłodzeniu gorącej strony ogniwa blokiem wodnym ( $T_{BW}$ ,  $T_K$  – temperatury odpowiednio bloku wodnego, komory).

Strona gorąca				
$U$ [V]	$I$ [A]	$T_{BW}$ [°C]	$T_m$ [°C]	$T_w$ [°C]
8	4,47	19	28,7	29,13
10	5,84	22	34,8	34,11
12	7,20	28	42,6	42,12
14	8,37	35	51,2	50,92
Strona zimna				
$U$ [V]	$I$ [A]	$T_K$ [°C]	$T_m$ [°C]	$T_w$ [°C]
8	4,47	-1	-10,7	-9,71
10	5,84	-7	-14,5	-14,95
12	7,20	-8,5	-14,9	-14,93
14	8,37	-8,5	-13	-13,08



Rys. 7. Porównanie wydajności chłodzenia powietrza wydmuchiwane z komory przy chłodzeniu gorącej strony ogniwa za pomocą bloku wodnego (dla ogniw: a – TEC-127085; b – TES1-24106) lub radiatora (dla ogniw: c – TEC-127085; d – TEC1-12726; e – TES1-24106)

## 5. WNIOSKI

Można zauważyć, że przy zastosowaniu do chłodzenia strony gorącej ogniwa bloku wodnego, przy jednakowych warunków zewnętrznych, uzyskano niższe temperatury na wylocie układu, niż w przypadku chłodzenia ogniwa radiatorem. Jest to spowodowane małą rezystancją termiczną aluminiowej podstawy bloku wodnego, która wynosi 0,031 °C/W i temperaturą wody chłodzącej przepływającej przez blok wodny niższą niż temperatura otoczenia. Zauważono, że występujące różnice temperatury wody chłodzącej podczas wykonywania pomiarów dla kolejnych ogniw miały wpływ na wyznaczane parametry układu.

Podczas zwiększania prędkości przepływu powietrza przez komorę termiczną dla układu z radiatorem, różnica temperatur między wyjściem a wejściem układu zmniejszała się. Przy chłodzeniu gorącej strony ogniwa za pomocą bloku wodnego, najlepszą wydajność chłodzącą uzyskano dla ogniwa TES1-24106, pracującego przy napięciu zasilania 21 V. W przypadku ogniw chłodzonych przy pomocy radiatora z wentylatorem najlepszy wynik osiągnięto dla ogniwa TEC1-12726. Najmniejszą sprawność chłodzenia układu uzyskano przy chłodzeniu ogniwa TEC-127085 radiatorem z wentylatorem.

Zbudowane stanowisko badawcze można łatwo modyfikować oraz rozszerzać jego możliwości i wykorzystać je do badania autonomicznego układu do lokalnej poprawy komfortu termicznego. W układzie autonomicznym przez dodanie układu regulacji i interfejsu użytkownika będzie można zadawać i kontrolować parametry komfortu termicznego w niewielkiej odległości od wylotu powietrza z układu. Ponadto poprzez sterowanie parametrami elektrycznymi ogniwa Peltiera oraz prędkością obrotową wentylatora będzie można uzyskać zadaną temperaturę powietrza wylotowego (dla danych warunków otoczenia) przy minimalizowaniu strat mocy w układzie. Należy podkreślić, że zbudowane urządzenie może pracować zarówno jako układ chłodzący jak i, po dodaniu wentylatora na radiatorze rozpraszającym ciepło, jako układ grzewczy. Warto zauważyć, że sprawność grzewcza ogniwa Peltiera przekracza 100%, co w połączeniu z wysokimi temperaturami na radiatorze, powinno zapewnić uzyskanie zadowalających efektów grzewczych.

Wykonane badania potwierdzają przydatność ogniwa Peltiera w systemach do poprawy komfortu cieplnego (miejscowej redukcji temperatury). Wydajność rozważanego układu rośnie wraz ze wzrostem ciepła odbieranego z ogniwa. Bardzo duży wpływ na temperaturę powietrza na wylocie układu ma wydajność wentylatora po stronie zimnej. Badany układ charakteryzuje się stosunkowo wysoką dynamiką. Po około 30 s uzyskano wyraźną zmianę temperatury powietrza wylotowego. Wydajność układu można zwiększyć przez zastosowanie ogniwa Peltiera o większej mocy lub wykorzystanie kilku ogniwa o mniejszej mocy. Po stronie chłodnej moc cieplna radiatora może być dwukrotnie mniejsza niż radiatora po stronie ciepłej. Na zdolność oddawania czy przejmowania strumienia ciepła przez radiator ma duży wpływ prędkość obrotowa zamontowanego na nim wentylatora.

## LITERATURA

- [1] Goldsmid J., Introduction to Thermoelectricity, Springer, 2009.
- [2] Jaworski M., Bednarczyk M., Czachor M., Experimental investigation of thermoelectric generator (TEG) with PCM module, Applied Thermal Engineering, Vol. 96, pp. 527–533, 2016.

- [3] Kaushik S.C., Manikandan S., Ranjana H., Energy and exergy analysis of thermoelectric heat pump system, *Journal of Electronic Materials*, Vol. 45, Issue 7, pp. 3400–3409, July 2016.
- [4] Lee S., *Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells*, Wiley, 2010.
- [5] Łyskawiński W., Kurzawa M., Szeląg W., Analiza pracy wentylatorowego układu chłodzenia z ogniwem Peltiera, *Poznań University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, s. 301-311, nr 89/2017.
- [6] Manikandan S., Kaushik S.C., Thermodynamic studies and maximum power point tracking in thermoelectric generator–thermoelectric cooler combined system, *Cryogenics – Elsevier*, Vol. 67, pp. 52–62, 04/2015.
- [7] Markowski P., *Właściwości termoelektryczne kompozytów grubowarstwowych*, Politechnika Wrocławska, 2008.
- [8] Patel J., Patel M., Patel J., Modi H., Improvement in the cop of thermoelectric cooler, *International Journal of Scientific & Technological Research*, Vol. 5, Issue 05, May 2016, pp. 73-76.
- [9] Pniewski R., Kowalik R., Sadowski E., Wykorzystanie ogniw Peltiera w układach chłodzących pojazdów autobusowych, *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*, s.1083-1086, nr 6/2016.
- [10] Raj E., [www.dsod.p.lodz.pl](http://www.dsod.p.lodz.pl) 2 2014. [Online]. Available: [http://www.dsod.p.lodz.pl/materials/ZT\\_H2\\_01.pdf](http://www.dsod.p.lodz.pl/materials/ZT_H2_01.pdf).
- [11] Rowe D.M., *Thermoelectrics Handbook – Macro to Nano*, Taylor and Francis, CRC Press 2006.
- [12] Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B., A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews – Elsevier*, Vol. 65, pp. 698–726, November 2016.
- [13] Vistakula K. K., Apparel with integral heating and cooling device, Patent US8397518 B1, 2012.
- [14] Yang J., Caillat T., *Thermoelectric Materials for Space and Automotive Power Generation*, *MRS Bulletin (Harvesting Energy through Thermoelectrics: Power Generation and Cooling)*, Vol. 31, Issue 3, p. 224–229, March 2006.

#### ANALYSIS OF OPERATION OF COOLING-HEATING SYSTEMS WITH PELTIER MODULE

The paper presents a developed cooling and heating system with a Peltier module. The heat side of the Peltier module was cooled in two ways: by means of a water block and by using a radiator with a fan. Algorithm and software for analysis of the cooling-heating system with the Peltier module were developed. The software were used to calculate parameters of the Peltier module, efficiency and temperature values at selected points of the system. The obtained results of calculations were compared with the results of experimental tests obtained on the built measuring stand. On this basis, the conclusions were formulated and the proposals for solutions improving the functional properties of the tested system were presented.

*(Received: 14.02.2018, revised: 10.03.2018)*