

doi:10.15199/48.2022.04.28

System do oceny mikrogeneratorów termoelektrycznych w szerokim zakresie temperatury

Streszczenie. W artykule przedstawiono system pomiarowy, który umożliwia charakteryzowanie mikrogeneratorów termoelektrycznych przy gradiencie temperatury poczynając od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pozwala to na badanie mikrogeneratorów pod kątem zastosowań w ekstremalnych warunkach, gdzie dostęp do energii elektrycznej jest ograniczony.

Abstract. The paper presents a measurement system that enables the characterization of thermoelectric microgenerators at a temperature gradient starting from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. This allows the testing of microgenerators for applications in extreme conditions where access to electricity is limited. (**System for characterization of thermoelectric microgenerators over a wide temperature range**)

Słowa kluczowe: pozyskiwanie energii; pomiary termoelektryczne; zjawisko Seebecka

Keywords: energy harvesting; thermoelectric measurements; Seebeck effect

Wstęp

Dzisiejszy rynek elektroniki jest coraz bardziej zdominowany przez układy niskonapięciowe. Jest to związane między innymi ze wzrostem zainteresowania Internetem rzeczy, Przemysłem 4.0 i urządzeniami inteligentnymi [1, 2]. Zastosowanie układów niskonapięciowych wynika z obniżania kosztów energetycznych przy zbieraniu olbrzymich ilości danych, często w trudno dostępnych miejscach, gdzie nie ma możliwości podłączenia układu do zasilania sieciowego [3]. Warto nadmienić, że wszystkie te obszary wymagają coraz większej liczby czujników i mikrosystemów, które coraz rzadziej są podłączone na stałe do zasilania, a ich podstawowym źródłem energii jest akumulator wyposażony w układ pozyskujący energię elektryczną z otoczenia.

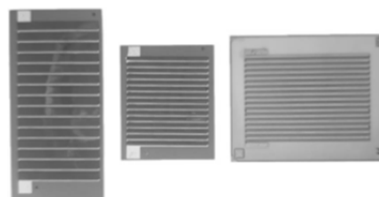
Aktualnie na całym świecie bada się alternatywne źródła energii w celu uzyskania jak najwydajniejszych „Energy harvesterów”, które pozwalają na konwersję alternatywnych typów energii w energię elektryczną [3-5]. Można wyróżnić kilka najważniejszych typów przetwarzanych energii:

- przetwarzanie energii słonecznej na elektryczną (np. panele fotowoltaiczne);
- przetwarzanie energii mechanicznej na elektryczną (np. generatory piezoelektryczne);
- przetwarzanie energii magnetycznej na elektryczną (np. mikrogeneratory elektromagnetyczne);
- przetwarzanie energii termicznej na elektryczną (np. mikrogeneratory termoelektryczne).

W pracach prowadzonych na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów skupiono się nad możliwościami pozyskiwania energii z wykorzystaniem metalicznych planarnych mikrogeneratorów termoelektrycznych realizowanych technikami warstwowymi [6-8]. Sam mikrogenerator termoelektryczny to struktura składająca się z wielu termopar (często określana mianem termostosu), połączonych ze sobą szeregowo w celu wzmocnienia efektu termoelektrycznego. Podczas ogrzewania jednej części struktury oraz chłodzenia drugiej w obwodzie jest generowana siła termoelektryczna zgodnie ze zjawiskiem Seebecka. Samo zjawisko Seebecka dotyczy powstawania siły elektromotorycznej (termoelektrycznej) w obwodzie złożonym z dwóch różnych przewodników przy pojawieniu się gradientu temperatury między złączami [9].

W ramach badań nad pozyskiwaniem energii elektrycznej z energii termicznej przy wykorzystaniu mikrogeneratorów termoelektrycznych, wykonano specjalny system pomiarowy. Cechował się on unikalnym sposobem

generacji gradientu temperatury, który umożliwił znaczne schłodzenie jednej części struktury (do około $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) oraz podgrzanie drugiej (do około $200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Wartości nastaw były regulowane, a samo stanowisko pozwalało zwiększać odpowiednio narost/spadek temperatur w czasie o wybrany krok. Pozwalało to na prowadzenie badań pod kątem potencjalnego zasilania drobnych układów czujnikowych nawet w bardzo trudnych warunkach, gdzie nie można pozyskać energii w sposób tradycyjny.



Rys.1. Przykłady planarnych mikrogeneratorów termoelektrycznych.

Jako parametr podstawowy, określający jakość i przydatność danej struktury termoelektrycznej przyjęto wartość współczynnika Seebecka wyznaczonego dla jednej termopary. Takie podejście pozwala na określenie wydajności nie tylko całego mikrogeneratorsa ale materiałów zastosowanych do jego wykonania. Pozwala to na skalowalność projektu i przy dobraniu dwóch materiałów o najlepszych parametrach można w prosty sposób wykonać najefektywniejszy mikrogenerator, zwielfokrotniając liczbę termopar na podłożu. Współczynnik Seebecka jest parametrem definiującym stosunek generowanej siły termoelektrycznej do gradientu temperatury i jest silnie powiązany z samym zjawiskiem Seebecka. W obwodzie składającym się z dwóch połączonych ze sobą materiałów w momencie powstania gradientu temperatury między złączami (rys. 2), jest generowana siła termoelektryczna [9].

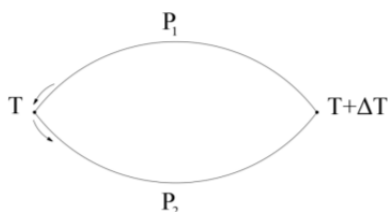
Wartość współczynnika Seebecka można określić wykonując pomiar wygenerowanej siły termoelektrycznej w obwodzie oraz różnicę temperatur między złączami. Jednostką jest wolt na kelwin lub wolt na stopień Celsjusza [10].

$$(1) \quad \alpha = \frac{E}{\Delta T} \left[\frac{\text{V}}{\text{K}} \right] \text{ lub } \left[\frac{\text{V}}{^{\circ}\text{C}} \right]$$

gdzie E – siła elektromotoryczna (termoelektryczna), ΔT – gradient temperatury.

Podczas pomiarów struktur, generowano gradient między złączami mikrogeneratorsa. Następnie w trakcie narostu, wykonywano serię pomiarów napięcia, rezystancji

oraz temperatur. Na tej podstawie wyznaczano średnią wartość z pomiarów, określając regresję liniową napięcia od gradientu, a następnie wynik dzielono przez liczbę termopar.

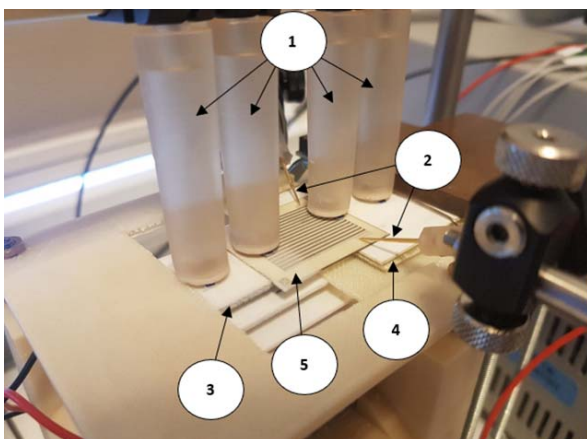


Rys. 2. Obwód z dwóch przewodników przy gradiencie temperatury między złączami [3].

System pomiarowy

System pomiarowy, zaprojektowany na potrzeby pomiarów mikrogeneratorów termoelektrycznych, składał się z trzech części, które razem pozwalały na wykonywanie precyzyjnych pomiarów. Cały układ zbudowano zgodnie z konwencją układu mechatronicznego. Zawierał on część wykonawczą, czujnikową oraz sterowania [11-13] Projekt podzielono na:

- moduł mechaniczny – mechaniczna struktura stanowiska pomiarowego;
- moduł sterowania – układ elektroniczny umożliwiający sterowanie elementami generującymi gradient temperatury;
- moduł akwizycji – moduł sprzęgający komputer z rejestratorem danych oraz modułem sterowania w celu zapewnienia sterowania i akwizycji danych z poziomu komputera.

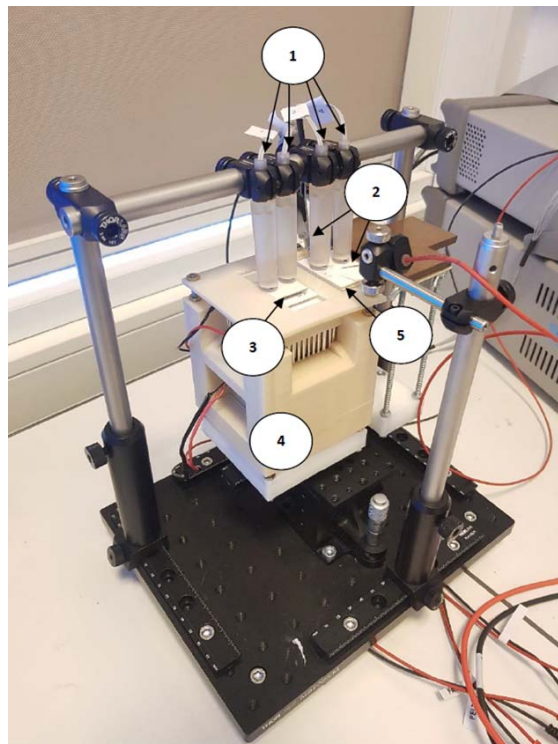


Rys. 3. Metoda pomiarowa: 1 – czujniki temperatury; 2 – sondy pomiarowe do pomiaru siły termoelektrycznej oraz rezystancji; 3 – ogniwo Peltiera; 4 – grzejnik; 5 – struktura mikrogenerators.

Zadaniem całego układu było wygenerowanie gradientu między złączami mikrogenerators i następnie pomiar siły termoelektrycznej, rezystancji oraz temperatury w różnych punktach struktury. Cały układ miał charakteryzować się prostą konstrukcją oraz intuicyjną obsługą w celu umożliwienia jak najszybszego testowania wytworzonych mikrogeneratorów termoelektrycznych. W założeniach projektu określono, że jedna część mikrogenerators powinna znajdować się na elemencie chłodzącym (tę rolę pełni ogniwo Peltiera), natomiast druga - na elemencie grzejnym (grzejniku grubowarstwowym). Następnie mikrogenerator powinien być dociśnięty od góry za pomocą czujników temperatury do ogniwa Peltiera oraz grzejnika. Sondy pomiarowe do pomiaru napięcia oraz rezystancji w ostatnim kroku powinny być dociśnięte do pól kontaktowych struktury.

Moduł mechaniczny

Konstrukcja mechaniczna miała za zadanie odpowiednie zgranie elementów generujących gradient temperatury, sond pomiarowych oraz czujników temperatury. Do generacji gradientu po stronie zimnej wykorzystano czterostopniowe ogniwo Peltiera Ecogen TB-4-(127-71-31-17)-1,65 [14]. Natomiast do uzyskania strony gorącej stanowiska, wykonano grzejnik grubowarstwowo na bazie przewodzącej pasty palladowo-srebrowej ESL 96378.



Rys. 4. Moduł mechaniczny: 1 – czujniki Pt1000; 2 – sondy pomiarowe; 3 – ogniwo Peltiera; 4 – obudowa integrująca część chłodzącą (ogniwo Peltiera z radiatorem i wentylatorem); 5 – grzejnik grubowarstwowo.

W założeniu mikrogenerator termoelektryczny powinien być ułożony między ogniwnem Peltiera oraz grzejnikiem, a następnie dociśnięty od góry czujnikami Pt1000. Docisk ten realizowała śruba mikrometryczna, która umożliwiała takie precyzyjne podniesienie całego stanowiska w górę, aby nie uszkodzić mikrogenerators. W ostatnim kroku do pól kontaktowych należało z dwóch stron dociśnąć ostrzowe sondy pomiarowe do pomiaru siły termoelektrycznej oraz rezystancji struktury.

Moduł sterowania

Moduł sterowania odpowiadał za generowanie gradientu temperatury. Pozwalał on na równoczesne lub osobne zasilanie ogniwa Peltiera oraz grzejnika grubowarstwowego. Na podstawie specjalnie przygotowanej ramki danych, którą sterownik otrzymywał z komputera za pośrednictwem portu szeregowego można było wybrać wiele nastaw. Wszystkie wybieralne parametry miały za zadaniem umożliwić wyznaczenie charakterystyk mikrogenerators w różnych warunkach i przy odmiennych warunkach powstawania gradientu temperatury. Do układu można było dostarczyć ramkę z takimi parametrami wybieralnymi jak:

- włączenie lub wyłączenie ogniwa/grzejnika;
- początkowa wartość napięcia podawanego na ogniwo/grzejnik;
- końcowa wartość napięcia podawanego na ogniwo/grzejnik;

- krok narostu napięcia podawanego na ogniwo/grzejnik;
- czas narostu napięcia podawanego na ogniwo/grzejnik.

Układ na podstawie otrzymanej ramki danych podawał napięcie startowe na ogniwo oraz grzejnik. Następnie zwiększał podawane napięcie o wybrany krok z odczekaniem między narostami o wybrany czas. Po osiągnięciu nastawy docelowej wartość ta była utrzymywana do końca cyklu pomiarowego.

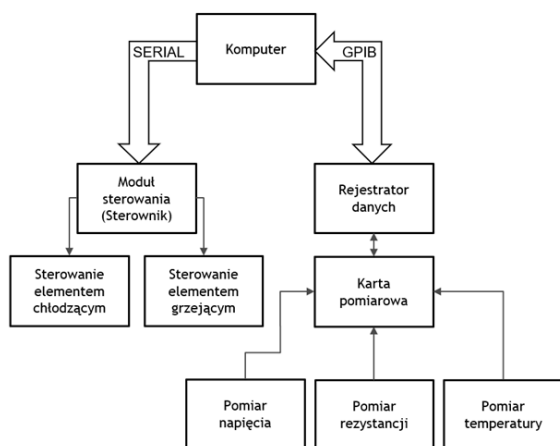
Ze względu na stosunkowo duży prąd pobierany przez ogniwo Peltiera i grzejnik oraz celem zapewnienia bezpieczeństwa pracy, układ sterownika umieszczono w polimerowej obudowie, zapewniającej wysoki poziom izolacji. Na rysunku 5 po lewej stronie można zauważyć gniazda bananowe, do których należało podłączyć kolejno grzejnik grubowarstwowy, ogniwo Peltiera, wentylator chłodzący ogniwo oraz zasilacz laboratoryjny. Po prawej stronie natomiast widać złącza mini USB, odpowiedzialne za komunikację z komputerem. Opisana wcześniej ramka danych była wysyłana z komputera. Dlatego do poprawnego działania należało zapewnić połączenie przewodowe między urządzeniami.



Rys. 5. Tył sterownika z wejściami na złącza bananowe i przewód mini USB.

Układ sterowania zaprojektowano i wykonano jako system dedykowany do pracy ze stanowiskiem, przy czym za jego część logiczną odpowiadał odpowiednio oprogramowany mikrokontroler Atmega32 [15-18].

Sposób wymiany danych w module akwizycji



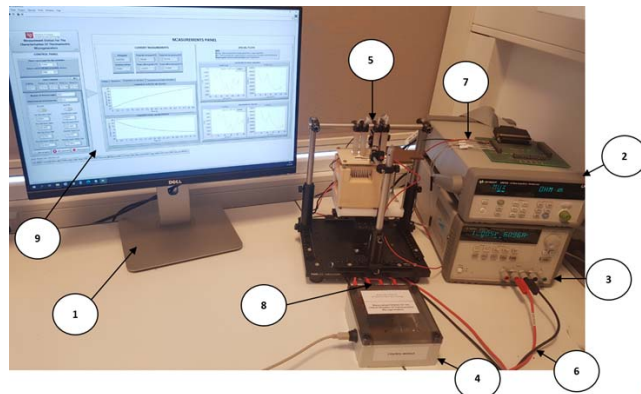
Rys. 6. Działanie modułu akwizycji danych.

Moduł akwizycji

Moduł akwizycji danych łączył wszystkie części stanowiska razem oraz zapewniał pełną funkcjonalność systemu i realizację ściśle określonych zadań. Zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 6 moduł akwizycji zawierał specjalnie napisaną aplikację graficzną na komputerze do sterowania całym systemem w programie LabView [19]. Na podstawie wyborów operatora została przygotowywana ramka danych dla sterownika i wysyłana przy pomocy portu szeregowego. Dzięki temu sterownik odpowiednio załączał ogniwo Peltiera i element grzejny.

Następnie, po zakończeniu wysyłania ramki, komputer nawiązywał komunikację z rejestratorem danych z wykorzystaniem magistrali GPIB (w stanowisku użyto rejestrator danych Keysight 34972A z kartą pomiarową Keysight 34901A [20]). Program wysyłał kolejne komendy SCPI odpowiedzialne za pomiar napięcia, rezystancji oraz temperatur. Następnie odbierał wszystkie dane, zapisywał je do pliku i wyznaczał charakterystyki w czasie rzeczywistym w celu kontrolowania procesu charakteryzowania mikrogeneratora.

Cały system pomiarowy zaprezentowano na rys. 7 i jest on kompletną implementacją powyższego schematu wraz ze wszystkimi modułami.



Rys. 7. System pomiarowy.

Na rysunku 7 można wyróżnić następujące elementy: 1 – komputer klasy PC z monitorem; 2 – rejestrator danych; 3 – zasilacz laboratoryjny; 4 – sterownik systemu pomiarowego; 5 – konstrukcja mechaniczna systemu pomiarowego; 6 – przewody zasilania dla modułu sterowania; 7 – przewody pomiarowe; 8 – przewody dla ogniwa, grzejnika, wentylatora; 9 – oprogramowanie komputerowe, do sterowania całym stanowiskiem.

Przy maksymalnym obciążeniu układ pozwalał na wygenerowanie gradientu temperatury wynoszącego około 210 °C między stroną gorącą i zimną (ogniwo Peltiera -49,4 °C, natomiast grzejnik 159,7 °C przy pomiarach w temperaturze pokojowej).

Pomiary

W ramach pomiarów na stanowisku przygotowano serię testów mających na celu scharakteryzowanie określonego mikrogeneratora. Podczas zmiany temperatury między złączami zimnymi i gorącymi mikrogenerators, rejestrowano siłę termoelektryczną, rezystancję oraz aktualne wskazania temperatury.

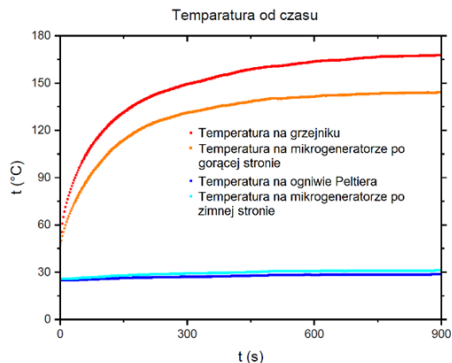


Rys. 8. Proces charakteryzowania mikrogenerators.

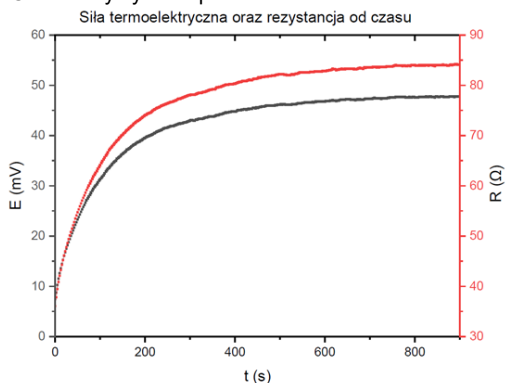
Do prezentacji wybrano mikrogenerators składający się z 15 termopar, gdzie każda z nich została wykonana z niklu oraz srebra [21]. Strukturę przygotowano w technologii

grubowarstwowej, gdzie w procesie sitodruku naniesiono obie pasty i kolejno je wypalano. Jako podłoże wykorzystano ceramikę LTCC. Końcowa struktura miała wymiary 20x25 mm² i rezystancję w temperaturze pokojowej (21 °C) około 26,7 Ω.

Pierwszy test polegał na grzaniu struktury z jednej strony z pełną mocą przez 15 minut, przy zachowaniu temperatury pokojowej z drugiej strony. Pozwoliło to na uzyskanie wyników pokazanych na rys. 9 i 10.

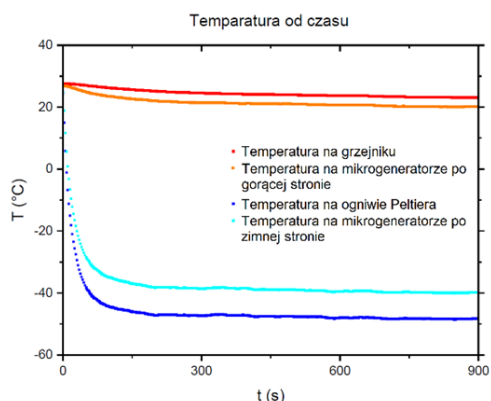


Rys. 9. Charakterystyki temperatur od czasu.



Rys. 10. Charakterystyki siły termoelektrycznej oraz rezystancji od czasu.

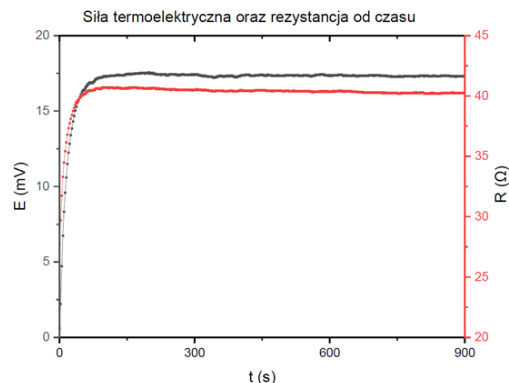
Drugi test, w przeciwieństwie do poprzedniego, polegał na chłodzeniu jednej strony z maksymalną mocą przez 15 minut przy zachowaniu temperatury pokojowej po drugiej stronie mikrogeneratore. W wyniku pomiarów uzyskano wyniki widoczne na rys. 11 i 12.



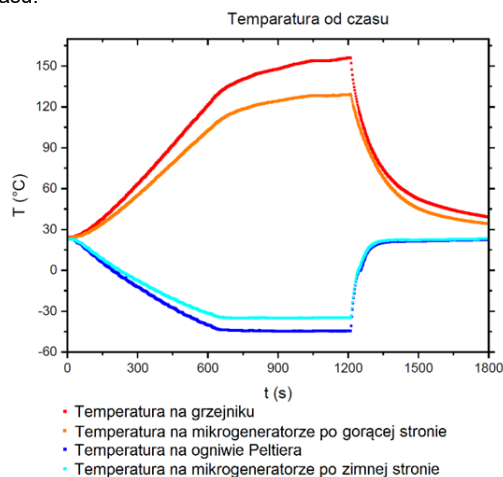
Rys. 11. Charakterystyki temperatur od czasu.

Ostatni test polegał na równoczesnym grzaniu jednej strony struktury i chłodzeniu drugiej przy czym podawane napięcie było zwiększane stopniowo od 0% do 100% o 5% co 30 sekund. Cały proces charakteryzowania trwał 30 minut przy czym przez pierwsze 20 minut stoliki pomiarowe były z jednej strony podgrzewane, a z drugiej chłodzone. Natomiast podczas końcowych dziesięciu minut następował

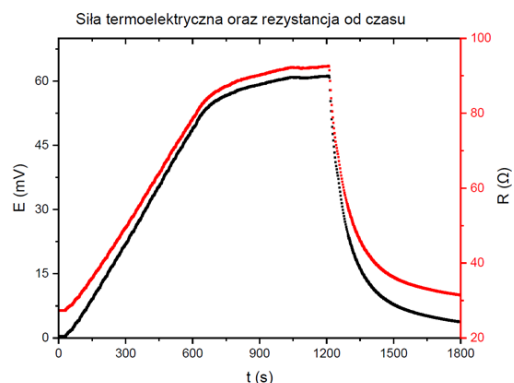
powrót struktury do temperatury pokojowej (rys. 13, 14 i 15). Pozwoliło to na wyznaczenie współczynnika Seebecka dla całego mikrogeneratore.



Rys. 12. Charakterystyki siły termoelektrycznej oraz rezystancji od czasu.



Rys. 13. Charakterystyki temperatur od czasu.

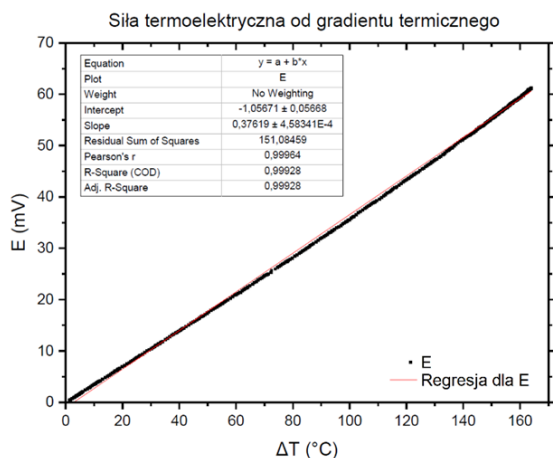


Rys. 14. Charakterystyki siły termoelektrycznej oraz rezystancji od czasu.

Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć, że pierwszy z testów pozwolił na uzyskanie maksymalnego gradientu na poziomie 112,9 °C przy pomiarze temperatury na strukturze (pomiar na elementach wykonawczych 144,2 °C) co pozwoliło na wygenerowanie siły termoelektrycznej o wartości 47,7 mV. Drugi z pomiarów, gdzie jedynie chłodzono strukturę, doprowadził do wygenerowania gradientu o wartości 60,1 °C (gradient mierzony między elementami wykonawczymi 68,7 °C), który doprowadził do powstania siły termoelektrycznej na poziomie 17,3 mV.

Ostatni pomiar umożliwił pełną ocenę prezentowanego mikrogeneratore przy maksymalnym gradientie na strukturze wynoszącym 164,1 °C (gradient mierzony na

elementach wykonawczych 204,1 °C). Wytworzona w tych warunkach siła termoelektryczna była równa 61,2 mV. Na podstawie wyników tego testu wyznaczono współczynnik Seebecka dla całego mikrogeneratorsa, który wyniósł 0,376 mV/K co przy 15 termoparach dało 25,07 µV/K na pojedynczą termoparę.



Rys. 15. Charakterystyka siły termoelektrycznej od gradientu.

Wnioski

Mikrogeneratory termoelektryczne mają duży potencjał na wykorzystanie komercyjne jako elementy umożliwiające zasilanie drobnych układów elektronicznych, szczególnie w miejscach, gdzie nie dociera energia słoneczna, a co za tym idzie nie może być wykorzystana. Na podstawie zaprezentowanych wyników można zauważyć, że aby mikrogenerator wygenerował odpowiednią energię elektryczną, należy zapewnić odpowiedni gradient temperatury. Z drugiej strony jest bardzo dużo sytuacji, w których gradient ten jest specyfiką danego miejsca i nie trzeba go specjalnie generować. Pierwszym teoretycznym zastosowaniem może być wykorzystanie w kosmosie, gdzie podczas misji załogowych powstaje naturalny i bardzo duży gradient temperatury między wnętrzem rakiety a przestrzenią kosmiczną. Przy odpowiedniej implementacji można mówić o zasilaniu matryc czujnikowych, które przy zaniku światła słonecznego mogą być zasilone z układu akumulującego energię elektryczną powstałą w wyniku konwersji termoelektrycznej. Taka implementacja, mając swoje ograniczenia, mogłaby być przeznaczona do wysyłania danych diagnostycznych (z odpowiednio niską częstotliwością).

Zaprezentowane stanowisko pozwala na szybkie testowanie struktur. W momencie wykonania nowego mikrogeneratorsa proces charakteryzowania, w którym uzyskujemy wygenerowane napięcie oraz współczynnik Seebecka trwa od 15 do 20 minut. Co istotne charakterystyki czasowe, generowane w czasie rzeczywistym są w stanie poinformować operatora o nieprawidłowościach. Wykonanie termopar z konkretnych metali może powodować niestabilną pracę mikrogeneratorsa. Warto zauważyć, że już na tym etapie, dzięki równoczesnym pomiarom generowanej siły termoelektrycznej oraz rezystancji wewnętrznej mikrogeneratorsa, opracowany system umożliwia wyznaczenie mocy mikrogeneratorsa. Następnym etapem rozwoju systemu jest uzyskanie jeszcze niższej temperatury po stronie zimnej (prawdopodobnie do tego celu nie wystarczy już samo ogniwo Peltiera) oraz eksperymentalne wyznaczenie różniczkowego współczynnika Seebecka.

Autorzy: mgr inż. Szymon Wójcik, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw, E-mail: szymon.wojcik@pwr.edu.pl; dr inż. Mirosław Gierczak, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wroclaw, E-mail: miroslaw.gierczak@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] T. Masuhara; The Future of Power Electronics, Chips, vol. 2 (2020), s.21-50.
- [2] S. Kumar, P. Tiwari, M. Zymbler; Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review, Journal of Big Data, 2019.
- [3] R. Bogue; Energy harvesting: a review of recent developments, Sensor Review, vol.35 (2015), no.1, s.1-5.
- [4] W. Wang, V. Cionca, N. Wang, M. Hayes, B. O'Flynn, C. O'Mathuna; Thermoelectric energy harvesting for building energy management wireless sensor networks, Int. Journal of Distributed Sensor Networks, vol.2013 (2013), art. 232438.
- [5] N. Jaziri, A. Boughamoura, J. Müller, B. Mezghani, F. Tounsi, M. Ismail; A comprehensive review of thermoelectric generators: technologies and common applications, Energy Reports, vol.6 (2020), Suppl.7, s.264-287.
- [6] P. Markowski, A. Dziedzic; Planar and three-dimensional thick-film thermoelectric microgenerators, Microelectronics Reliability, vol.48 (2008), s.890-896.
- [7] P. Markowski, E. Prociów, A. Dziedzic; Mixed thick/thin-film thermocouples for thermoelectric microgenerators and laser power sensor, Optica Applicata, vol.39 (2009), s.681-690.
- [8] M. Gierczak, J. Prazmowska-Czajka, A. Dziedzic; Thermoelectric mixed thick-/thin film microgenerators based on constantan/silver, Materials, vol.11 (2018), 115 (9 s.).
- [9] D.M. Rowe; CRC Handbook of Thermoelectrics, CRC Press, Boca Raton, 1995.
- [10] T. Fukui; Functionality of nanostructures and their characteristic evaluation, Nanoparticle Technology Handbook, 2008, s. 301-303.
- [11] K. Falkowski; Wprowadzenie do mechatroniki, Of. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2010.
- [12] W.M. Zhao, X.X. Zhu, C.Z. Yang; Construction of mechatronics engineering talents cultivation based on local economy, Advanced Materials Research, vols 591-593 (2012), s.2306-2309.
- [13] V. Giurgiutiu, J. Lyons, D. Rocheleau, W. Liu; Mechatronics/microcontroller education for mechanical engineering students at the University of South Carolina, Mechatronics, vol.15 (2005), s.1025-1035.
- [14] Strona internetowa <http://ecogenthermoelectric.com/tb-4-127-71-31-17-1-65> (dostęp 21-10-2021)
- [15] M. Bis, Linux w systemach embedded, Wyd. BTC, 2011.
- [16] T. Francuz; Język C dla mikrokontrolerów AVR, Wyd. Helion, 2011
- [17] M. Kardaś; Mikrokontrolery AVR – podstawy programowania, Wyd. Atnel, 2013.
- [18] ATmega 328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash, nota katalogowa firmy Atmel.
- [19] C.Elliott, V. Vijayakumar, W. Zink, National Instruments LabVIEW: A programming environment for laboratory automation and measurement, J. of the Association for Laboratory Automation, vol.12 (2007), s.17-24.
- [20] Keysight 34970A/34972A Command Reference, nota katalogowa firmy Keysight Technologies.
- [21] P. Markowski; Thermoelectric energy harvester fabricated in thick-film/LTCC technology, Microelectronics International, vol.31 (2014), no.3. s.176-185.