

Modelowanie modułów termoelektrycznych w programie SPICE - przegląd

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań dwóch literaturowych modeli modułów termoelektrycznych dedykowanych dla programu SPICE. Przedstawiono topologię oraz równania opisujące te modele. Pokazano także wyniki weryfikacji ich dokładności poprzez porównanie wyników pomiarów i obliczeń wykonanych w programie SPICE. Niezbędne wartości parametrów wyznaczono w oparciu o dane producenta.

Abstract. In the paper results of research of two published in literature SPICE models of thermoelectric modules have been presented. Topology and equations describing these models, as well as results of experimental verification of their accuracy, based on comparison of results of SPICE calculation and measurements have been discussed. Required models parameters values have been calculated using manufacturer data. (*Modelling of Thermoelectric Modules in SPICE – a Review.*)

Słowa kluczowe: SPICE, modelowanie, moduł termoelektryczny (TEM), moduł Peltiera-Seebecka, pompa ciepła Peltiera (TEC), generator termoelektryczny (TEG).

Keywords: SPICE, modelling, Thermoelectric Modules (TEM), Peltier-Seebeck Module, Thermoelectric Cooler (TEC), Thermoelectric Generator (TEG).

Wprowadzenie

Ważnym problemem we współczesnej elektronice jest, z jednej strony sprawne odprowadzanie ciepła z elementów elektronicznych, z drugiej zaś wytwarzanie energii przy wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii, lub np. ciepła wydzielanego w wyniku strat energii w procesach fizycznych [1-6]. Interesującymi elementami elektronicznymi, łączącymi te dwie grupy zagadnień są moduły termoelektryczne [1, 3, 7, 8]. Moduły te można zastosować do wytwarzania energii elektrycznej, jak też do chłodzenia lub ogrzewania [1, 7, 8]. Wraz ze wzrostem zainteresowania modułami termoelektrycznymi, rośnie także zapotrzebowanie na narzędzia wspomagające projektowanie, oraz analizę właściwości układów wykorzystujących takie moduły.

Wygodnym i szeroko stosowanym narzędziem są programy komputerowe, a wśród nich ważną grupą są programy do analizy układów elektronicznych takie, jak np. program SPICE. Programy takie umożliwiają analizę zarówno właściwości elektrycznych, jak i cieplnych elementów i układów elektronicznych [9].

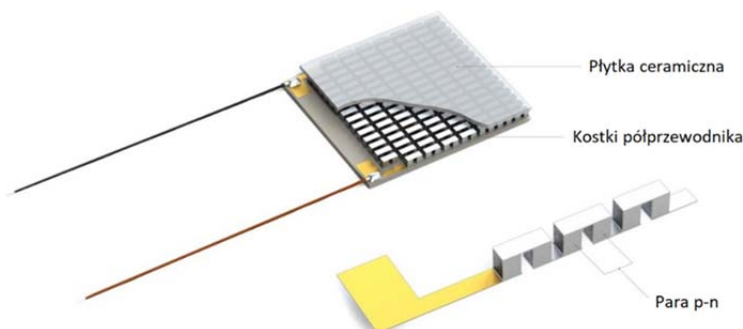
Opracowano wiele modeli modułów termoelektrycznych, w tym także modeli dedykowanych dla programu SPICE.

Modele te posiadają różną strukturę obwodową, a także różnią się opisującymi je równaniami [1-8, 10-16]. Wobec różnorodności dostępnych modeli istotny jest wybór takich, które będą właściwe do wybranego zastosowania. Ważne są także przejrzyste metody wyznaczania parametrów.

Celem pracy jest porównanie właściwości dwóch wybranych literaturowych modeli modułów termoelektrycznych dla programu SPICE oraz ocena dokładności tych modeli.

Budowa i opis działania modułów termoelektrycznych

Moduły termoelektryczne są elementami elektronicznymi zbudowanymi z matrycy ułożonych naprzemiennie kostek półprzewodnikowych typu n i p , połączonych szeregowo metalowymi ścieżkami nadrukowanymi na płytce ceramicznej stanowiącej zewnętrzną obudowę modułu. Powstałe w ten sposób złącza termopar $n-p$ są połączone do jednej strony modułu, zaś złącza termopar $p-n$ do drugiej. Ceramiczna obudowa pełni rolę elementu sprzęgającego termicznie złącza po każdej stronie modułu. Budowę modułu termoelektrycznego przedstawiono na rys. 1 [17, 18].



Rys.1. Budowa modułu termoelektrycznego

Półprzewodnikiem wykorzystywanym do produkcji modułów termoelektrycznych, jest najczęściej odpowiednio domieszkowany tellurek bizmutu (Bi_2Te_3), natomiast obudowy wykonuje się z tlenku glinu (Al_2O_3) lub azotku glinu (AlN) [17, 19-22]. Tellurek bizmutu stosuje się z uwagi na jego korzystne właściwości termoelektryczne i małą przerwę energetyczną ($E_{gBiTe} = 0,16 eV$), w porównaniu np. do krzemu ($E_{gSi} = 1,1 eV$), aby uzyskać duży prąd wsteczny spolaryzowanych zaporowo złączy powstających w wyniku połączenia materiałów typu p i n . Tlenek glinu oraz azotek glinu stosuje się z uwagi na ich korzystne właściwości cieplne.

Moduły termoelektryczne (Thermoelectric Module – TEM) mogą pełnić rolę pompy ciepła (Thermoelectric Cooler – TEC), działającej w oparciu o zjawisko Peltiera, lub generatora termoelektrycznego (Thermoelectric Generator – TEG), działającego w oparciu o zjawisko Seebecka [1, 7, 8]. Pozostałe zjawiska, jakie zachodzą w modułach termoelektrycznych to zjawisko Thomsona, wydzielanie ciepła Joule'a oraz przewodzenie ciepła zgodnie z prawem Fouriera [1, 7, 8, 14].

Zjawisko Peltiera polega na wydzielaniu lub pochłanianiu energii pod wpływem przepływu prądu elektrycznego przez złącza dwóch metali lub półprzewodników typu n i p . W obwodzie zawierającym oba typy złączy, tzn. $n-p$ i $p-n$, w wyniku pochłaniania energii na jednych i wydzielania energii na drugich, powstaje pomiędzy tymi złączami różnica temperatur. W przypadku zastosowania półprzewodników, ochłodzeniu ulega złącze, w którym zachodzi generacja nośników ładunku, zaś ogrzaniu złącze, w którym zachodzi ich rekombinacja. Po zmianie kierunku przepływu prądu następuje zamiana wydzielania i pochłaniania ciepła w złączach. Wykorzystanie półprzewodników pozwala na uzyskanie znacznie większej różnicy temperatur między złączami (rzędu kilkudziesięciu kelwinów), niż w przypadku metali (rzędu 1 K).

Z kolei, zjawisko Seebecka polega na powstawaniu różnicy potencjałów w obwodzie zawierającym dwa metale lub półprzewodniki, gdy ich złącza znajdują się w różnych temperaturach [22].

Dodatkowo, wśród zjawisk fizycznych leżących u podstaw działania modułów termoelektrycznych należy wymienić zjawisko Thomsona, polegające na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła podczas przepływu prądu elektrycznego w jednorodnym przewodniku, w którym istnieje gradient temperatury, oraz zjawisko Joule'a, które polega na wydzielaniu ciepła podczas przepływu prądu przez przewodnik o właściwej mu rezystywności. Zjawiska Peltiera, Seebecka i Joule'a wymagają uwzględnienia w analizie i modelowaniu modułów termoelektrycznych, zaś zjawisko Thomsona, z uwagi na jego niewielki udział w ogólnym bilansie energii pochłanianej i wydzielanej w modułach termoelektrycznych jest zwykle pomijane [7, 8, 10, 14].

Przegląd modeli

W literaturze opisano wiele modeli modułów termoelektrycznych [1-8, 10-16, 19, 20, 23, 24]. Wśród nich wyróżnić należy modele analityczne, modele materiałowe/mikroskopowe, narzędzia udostępniane przez producentów modułów oraz modele obwodowe dla programów do analizy układów elektronicznych.

Modele analityczne są to równania uwzględniające zjawiska fizyczne zachodzące w modułach termoelektrycznych, rozwiązywane przy pomocy programów takich, jak np. Matlab, czy Mathematica [2, 14]. W modelach materiałowych/mikroskopowych, równania fizyczne rozwiązuje się numerycznie, przy zastosowaniu metody elementu skończonego i oprogramowania takiego,

jak np. ANSYS Workbench, czy COMSOL Multiphysics. W wyniku modelowania otrzymuje się dwu, lub trójwymiarowe rozkłady m.in. temperatury i potencjału elektrycznego [23, 24].

Przykładem narzędzi udostępnianych przez producentów modułów termoelektrycznych jest program firmy Kryoterm [19] i program TECCad firmy RMT [20], pozwalające obliczać i analizować szereg charakterystyk modułów wytwarzanych przez tych producentów, jak również dobierać moduły pod kątem określonych wymagań. Istotną grupą modeli modułów termoelektrycznych są zastępcze modele obwodowe dla programów do analizy układów elektronicznych, takich jak SPICE (Cadence PSpice, Synopsys HSpice, Intusoft IsSpice, czy Linear Technology LTSpice/SwCAD). Modele takie tworzy się wykorzystując analogię między zmiennymi charakteryzującymi zjawiska termiczne i elektryczne [9].

Ze względu na sposób modelowania, modele obwodowe można podzielić na modele o stałych skupionych oraz o stałych rozłożonych. Z kolei, z uwagi na sposób wykorzystania modułu, na modele modułów termoelektrycznych pracujących jako generator termoelektryczny (TEG) lub pompa ciepła (TEC) oraz takie, które uwzględniają oba wymienione sposoby wykorzystania modułu termoelektrycznego.

Modele obwodowe mają istotne znaczenie, ponieważ pozwalają na analizowanie przy wykorzystaniu jednego środowiska, zarówno właściwości elektrycznych, jak i cieplnych układów elektronicznych, zbudowanych z elementów, dla których istnieją już modele dobrze opisane w literaturze i szeroko akceptowane.

Wśród modeli obwodowych modułów termoelektrycznych opisanych w literaturze najliczniejszą grupę stanowią modele generatorów termoelektrycznych (TEG) [2, 4, 6, 10-12, 16]. W pracach [1, 3, 7, 15] zaproponowano modele modułów pracujących jako pompa ciepła (TEC). Z kolei, w pracach [5, 8, 13, 14] opisano modele uwzględniające oba tryby pracy modułów termoelektrycznych. Większość modeli obwodowych to modele skupione, w których nie uwzględnia się przestrzennego rozkładu temperatury w strukturze modułu, składające się z dwóch sprzężonych ze sobą obwodów – modelującego właściwości elektryczne oraz modelującego właściwości cieplne [9].

Alternatywnym podejściem, uwzględniającym rozkład temperatury w strukturze i jej wpływ na parametry modułu, jest wykorzystanie modeli o stałych rozłożonych. Modele takie zaproponowano m.in. w pracach [4, 7, 8, 14, 16]. W pracach [1, 3, 6, 7, 8, 10, 13, 15] zaproponowano modele skupione, w których pominięto zależność parametrów modułów – współczynnika Seebecka α_m , rezystancji elektrycznej R_m i współczynnika przewodności ciepłej λ_m od temperatury pracy modułu a w obliczeniach stosuje się stałe wartości tych parametrów, wyznaczone dla określonej temperatury, najczęściej 300 K.

Modele, w których uzależniono wartości parametrów od temperatury pracy modułu zaproponowano w pracach [4, 5, 11, 12, 14]. W pracy [11] wskazano na istotny wpływ temperatury na wartości parametrów oraz opisano model generatora termoelektrycznego uwzględniający temperaturowe zależności parametrów modułu wyznaczone niezależnie dla strony zimnej (T_c) i gorącej (T_h). Z kolei, w pracy [12] wykazano istotny wpływ temperatury na parametry modułów termoelektrycznych, a także przedyskutowano i porównano 3 modele generatora termoelektrycznego (TEG) – model o parametrach niezależnych od temperatury pracy, model uwzględniający wpływ średniej temperatury między obiema stronami modułu $T_m = (T_h + T_c)/2$, oraz model z pracy [11].

W pracy [5] zaproponowano model TEM uwzględniający wpływ temperatury pracy na parametry modułów, a także ich pasożytnicze indukcyjności i pojemności, co ma szczególne znaczenie w przypadku modułów współpracujących z przetwornicami o częstotliwości przełączania powyżej 1MHz. W pracy [2] zaproponowano model części elektrycznej TEG uwzględniający wpływ rezystancji termicznej kontaktów, a także zależność rezystancji elektrycznej modułu od prądu obciążenia. W pracy [6] zaproponowano model TEG uwzględniający udział rezystancji termicznej kontaktów oraz udział rezystancji kontaktów, odpowiednio w całkowitej rezystancji termicznej modułu oraz w rezystancji elektrycznej modułu. Model skopiony generatora termoelektrycznego uwzględniający zjawisko Thomsona zaproponowano w pracy [10], a model o stałych rozłożonych w pracy [16].

Moduły termoelektryczne można modelować, przyjmując w analizie warunki dla stanu ustalonego (model statyczny), albo uwzględniając właściwości dynamiczne (model dynamiczny). W pracach [1, 3, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 16] uwzględniono ciepłe właściwości dynamiczne modułów poprzez wykorzystanie kondensatorów modelujących pojemność cieplną.

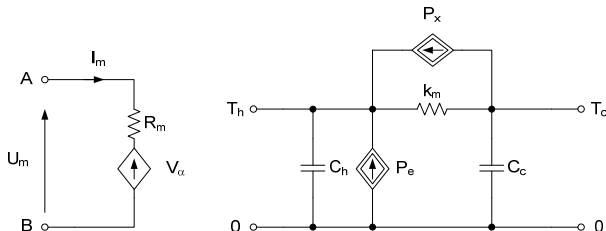
Wybrane modele

W następujących rozdziałach opisano dwa literaturowe modele modułów termoelektrycznych zaproponowane w pracach [1, 13]. Wybrane do badań modele są obwodowymi, skupionymi modelami elektrotermicznymi dla programu SPICE i uwzględniają dynamiczne właściwości ciepłe modułów termoelektrycznych. Oba modele zostały utworzone w oparciu o wspomnianą wcześniej analogię między wielkościami termicznymi i elektrycznymi oraz składają się z dwóch sprzężonych ze sobą obwodów, modelujących odpowiednio właściwości elektryczne i termiczne modułu. Modele te są także opisane tym samym zbiorem parametrów, do których należą – współczynnik Seebecka modułu α_m , rezystancja elektryczna R_{em} , rezystancja termiczna R_{thm} , pojemność cieplna strony zimnej C_h i pojemność cieplna strony gorącej C_c . Wartości parametrów tych modeli nie zależą od punktu pracy, ani od temperatury.

W obu modelach wybranych do badań i opisanych w następujących dwóch rozdziałach zaciski elektryczne modułu oznaczono literami A oraz B , U_m oznacza napięcie przyłożone do tych zacisków a I_m to prąd płynący przez moduł. Temperatury obu stron modułu są reprezentowane przez napięcia w węzłach T_h oraz T_c .

Model Chaveza

Rysunek 2 przedstawia reprezentację obwodową modelu modułu termoelektrycznego dla pracy w trybie pompy ciepła zaproponowanego w pracy [1].



Rys.2. Reprezentacja obwodowa modelu z pracy [1]

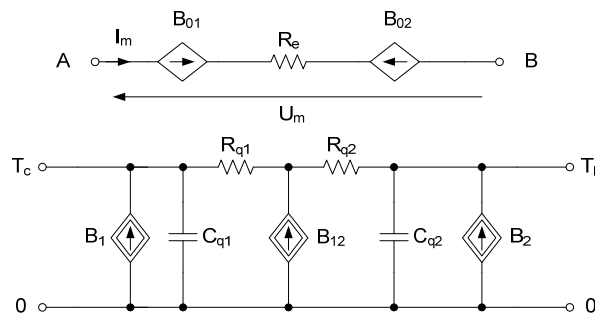
Właściwości elektryczne modułu zostały opisane za pomocą źródła napięciowego sterowanego napięciem $V_\alpha = \alpha_m \cdot (T_h - T_c)$ oraz rezystora R_m . V_α reprezentuje potencjał

termoelektryczny generowany wskutek zjawiska Seebecka, a R_m rezystancję elektryczną modułu.

Z kolei, właściwości termiczne modułu zostały zamodelowane przy wykorzystaniu dwóch źródeł prądowych sterowanych napięciem $P_e = \alpha_m \cdot (T_h - T_c) \cdot I + I^2 \cdot R_m$ oraz $P_x = \alpha_m \cdot T_c \cdot I - I^2 \cdot R_m / 2$, rezystora k_m oraz kondensatorów C_c i C_h . Źródło prądowe P_e modeluje moc wydzielaną w module w postaci ciepła, przy czym czynnik $\alpha_m \cdot (T_h - T_c) \cdot I$ opisuje różnicę ciepła pochłanianego i wydzielanego na złączach strony zimnej oraz gorącej na skutek zjawiska Peltiera, a czynnik $I^2 R_m$ reprezentuje ciepło Joule'a wydzielane na rezystancji modułu R_m . Źródło P_x modeluje ciepło pochłaniane po stronie zimnej modułu na skutek zjawiska Peltiera, pomniejszone o połowę ciepła Joule'a wydzielanego na rezystancji R_m . Rezystor k_m o rezystancji odpowiadającej rezystancji termicznej modułu, modeluje przewodzenie ciepła, a kondensatory C_h i C_c – pojemność termiczną każdej ze stron modułu.

Model Kubova

Drugim z wybranych do badań modeli jest model z pracy [13]. Autorzy cytowanej pracy wskazują, że model można wykorzystać w przypadku pracy modułu w charakterze pompy ciepła Peltiera, jak również generatora termoelektrycznego. Reprezentację obwodową tego modelu przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Reprezentacja obwodowa modelu z pracy [13]

Część elektryczna modelu składa się z dwóch źródeł napięcia sterowanych napięciem $B_{01} = \alpha_m \cdot T_c$ i $B_{02} = \alpha_m \cdot T_h$ reprezentujących potencjał Seebecka generowany odpowiednio na złączach strony zimnej i gorącej oraz rezystora R_e modelującego rezystancję elektryczną modułu.

Model termiczny składa się z trzech źródeł prądowych sterowanych napięciem $B_1 = U_{B01} \cdot I_m$, $B_2 = U_{B02} \cdot I_m$ i $B_{12} = U_{Re} \cdot I_{B02}$, rezystorów R_{q1} i R_{q2} , oraz kondensatorów C_{q1} i C_{q2} . Źródła B_1 , B_2 modelują odpowiednio – ciepło pochłanianie na złączach strony zimnej modułu oraz ciepło wydzielane na złączach strony gorącej, a źródło B_{12} ciepło Joule'a wydzielane na rezystancji elektrycznej modułu R_e . Rezystory R_{q1} i R_{q2} modelują rezystancję termiczną modułu, a kondensatory C_{q1} i C_{q2} pojemność termiczną obu stron modułu.

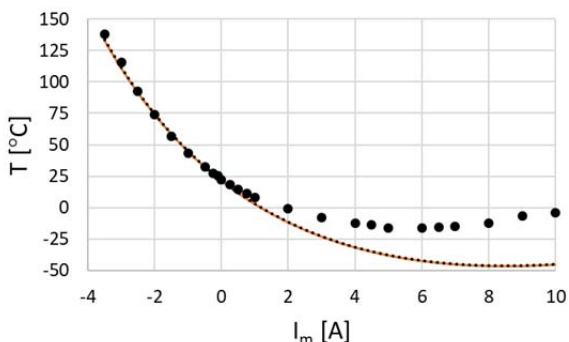
Wyniki pomiarów i obliczeń

Aby ocenić dokładność opisanych w pracy modeli wybrano do testów moduł termoelektryczny Stonecold TEC1-01708 [25], oraz wykonano pomiary i obliczenia w programie SPICE jego wybranych charakterystyk. Moduł ten charakteryzuje się wymiarami $15 \times 15 \times 3,7$ mm. Półprzewodnikiem, z którego wykonane są termopary jest $BiSn$. Maksymalne napięcie i prąd pracy wynoszą $U_{max} = 2V$ oraz $I_{max} = 8,5A$. Rezystancja elektryczna $R_m = 0,24\Omega$, maksymalna różnica temperatur wynosi $\Delta T_{max} = 68^\circ C$, a maksymalna temperatura pracy $T_{max} = 138^\circ C$.

Na podstawie danych producenta, w oparciu o równania zaproponowane w pracy [7], wyznaczono wartości parametrów badanych modeli oraz wykonano obliczenia charakterystyk wybranego do badań modułu w programie SPICE.

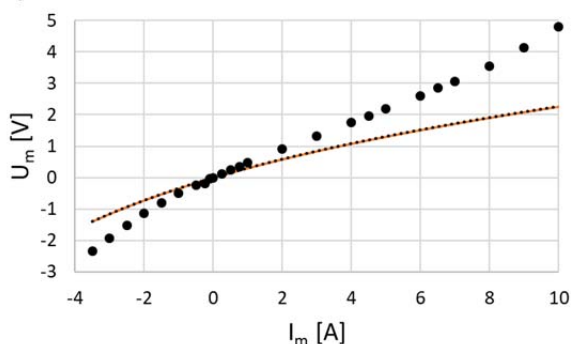
W obliczeniach wykorzystano następujące wartości parametrów modeli: $\alpha_m = U_{max}/T_h = 6,79 \text{ mV/K}$, $R_{thm} = (\Delta T_{max}/(U_{max} \cdot I_{max})) \cdot (2T_h/(T_h - \Delta T_{max})) = 10,4 \text{ K/W}$, $R_{em} = (U_{max}/I_{max}) \cdot ((T_h - \Delta T_{max})/T_h) = 0,181 \text{ } \Omega$

W celu wykonania pomiarów badany moduł umieszczono na bloku wodnym cieczowego, przepływowego systemu chłodzenia. Uzyskano w ten sposób stałą temperaturę strony modułu przylegającej do bloku wodnego (strona dolna). Pomiary wykonano dla obu polaryzacji napięcia zasilania, odpowiadających chłodzeniu oraz grzaniu strony górnej modułu. Wyniki badań zebrano na rysunkach 4 i 5, na których punkty oznaczają wyniki pomiarów, linie ciągłe wyniki obliczeń wykonanych za pomocą modelu z pracy [13], a linie kreskowe – wyniki obliczeń wykonanych za pomocą modelu z pracy [1].



Rys.4. Zależność temperatury górnej strony modułu od prądu zasilania

Rysunek 4 przedstawia porównanie zmierzonej i obliczonej zależności temperatury strony górnej (T) od prądu modułu $T=f(I_m)$, a rysunek 5 charakterystykę napięciowo-prądową $U_m=f(I_m)$. Na rysunkach polaryzacja dodatnia odpowiada chłodzeniu, zaś ujemna grzaniu górnej strony modułu.



Rys.5. Charakterystyka napięciowo-prądowa modułu

Jak wynika z rysunków 4 i 5, zarówno zmierzone, jak i obliczone charakterystyki mają charakter nieliniowy. Wyniki obliczeń uzyskane przy wykorzystaniu wybranych modeli pokrywają się w całym badanym zakresie, natomiast istotnie odbiegają od wyników pomiarów.

Dobrą zgodność wyników pomiarów i obliczeń uzyskano jedynie na charakterystyce $T=f(I_m)$ przy polaryzacji odpowiadającej grzaniu. W pozostałym zakresie, z obliczeń uzyskuje się temperaturę zaniżoną w odniesieniu do wyników pomiarów, a otrzymane wartości różnią się nawet o 40 °C.

Obliczone wartości parametrów zaciskowych modułu – prądu I_m i napięcia zasilania U_m , także różnią się od wartości zmierzonych. Z obliczeń uzyskano wartości napięcia zasilającego zaniżone nawet o 47 % przy polaryzacji odpowiadającej chłodzeniu oraz o 59 % dla polaryzacji odpowiadającej grzaniu.

Podsumowanie

W pracy opisano budowę i zasadę działania modułów termoelektrycznych, dokonano przeglądu modeli literaturowych oraz podzielono je na grupy. Szczegółowo opisano dwa wybrane do badań modele dedykowane dla programu SPICE, a także dokonano oceny dokładności tych modeli porównując wyniki obliczeń wykonanych przy ich wykorzystaniu z wynikami pomiarów. Badania przeprowadzono dla pracy modułu w charakterze pompy ciepła Peltiera, zarówno dla polaryzacji dodatniej, jak i ujemnej na zaciskach zasilających.

Z przeprowadzonych badań wynika, że w wybranym układzie testowym wartości parametrów zaciskowych i temperatury wybranego do badań modułu uzyskane z obliczeń i pomiarów istotnie się różnią. W badanym zakresie, temperatura modułu uzyskana z obliczeń była nawet 12-krotnie niższa od temperatury uzyskanej z pomiarów, a napięcie na zaciskach zasilających było niższe nawet o 47 % przy polaryzacji odpowiadającej chłodzeniu oraz nawet o 59 % przy polaryzacji odpowiadającej grzaniu. Dobrą zgodność pomiarów i obliczeń uzyskano jedynie dla temperatury górnej strony modułu przy polaryzacji odpowiadającej grzaniu.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że celowe jest opracowanie nowego modelu modułu termoelektrycznego, który zapewni lepszą zgodność wyników obliczeń i pomiarów.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Posobkiewicz, e-mail: k.posobkiewicz@we.umg.edu.pl; prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, e-mail: k.gorecki@we.umg.edu.pl; Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia.

LITERATURA

- [1] Chavez J.A., Ortega J.A., Salazar J., Turo A., Garcia M.J., SPICE model of thermoelectric elements including thermal effects, *Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2 (2000), 1019-1023
- [2] Siouane S., Jovanović S., Poure P., Equivalent electrical circuit of thermoelectric generators under constant heat flow, *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering* (2016)
- [3] Alaoui C., Peltier Thermoelectric Modules Modelling and Evaluation, *International Journal of Engineering*, 5 (2011), No 1, 114-121
- [4] Chen M., Rosendahl L.A., Condra T.J., Pedersen J.K., Numerical Modelling of Thermoelectric Generators With Varying Material Properties in a Circuit Simulator, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (2009), No 1, 112-124
- [5] Cernaianu M.O., Gontean A., High-accuracy thermoelectrical module model for energy-harvesting systems, *IET Circuits, Devices & Systems*, 7 (2013), No 3, 114-123
- [6] Dousti M.J., Petraglia A., Pedram M., Accurate electrothermal modelling of thermoelectric generators, *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition* (2015), 1603-1606
- [7] Lineykin S.B., Ben-Yaakov S., PSPIICE-Compatible Equivalent Circuit of Thermoelectric Cooler, *36th IEEE Power Electronics Specialists Conference* (2005), 608-612
- [8] Lineykin S., Ben-Yaakov S., Modelling and analysis of thermoelectric modules, *20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 3 (2005), 505-512
- [9] Janke W., Zjawiska termiczne w elementach i układach półprzewodnikowych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1992

- [10] Laird I., Lu D.D.C., SPICE steady state modelling of thermoelectric generators involving the Thomson effect, *37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (2011)
- [11] Mirocha A., Dziurdzia P., Improved electrothermal model of the thermoelectric generator implemented in SPICE, *International Conference on Signals and Electronic Systems* (2008), 317-320
- [12] Dziurdzia P., Mirocha A., From constant to temperature dependent parameters based electrothermal models of TEG, *16th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems* (2009), Łódź, 555-559
- [13] Kubov V.I., Dymytrov Y.Y., Kubova R.M., LTspice-model of thermoelectric Peltier-Seebeck element, *36th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology* (2016), 47-51
- [14] Mitrani D., Salazar J., Turo A., Garcia M.J., Chavez J.A., Lumped and distributed parameter SPICE models of TE devices considering temperature dependent material properties, *13th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems* (2007), 202-206
- [15] Chimchavee W., Khedari J., Hirunlabh J., An electro-thermal model of thermoelectric modules in heat pump and cooling mode (CHIM model), *20th International Conference on Thermoelectrics* (2001), 458-461
- [16] Rodriguez A., Vian J.G., Astrain D., Martinez A., Computational model and test bench for thermoelectric power generation, for thermoelectric parameters dependent on the temperature, *25th International Conference on Thermoelectrics* (2006) 300-304
- [17] www.tec-microsystems.com
- [18] Posobkiewicz K., Górecki K., Wybrane komponenty układów chłodzenia przyrządów półprzewodnikowych, *Elektronika* (2020), nr 6, 11-18
- [19] <http://kryothermtec.com>
- [20] www.rmtltd.ru
- [21] www.semicon.com.pl
- [22] Królicka A., Hruban A., Mirowska A., Nowoczesne materiały termoelektryczne – przegląd literatury, *Materiały Elektroniczne*, 40 (2012), nr 4, 19-34
- [23] Yushmanov S.P., Gritter L.T., Crompton J.S., Koppenhoefer K.C., Multiphysics Analysis of Thermoelectric Phenomena, *COMSOL Conference* (2011), Boston
- [24] Korotkov A., Loboda V., Feldhoff A., Groeneveld D., Simulation of thermoelectric generators and its results experimental verification, *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems* (2017)
- [25] <https://www.tme.com/us/en-us/details/pm-15x15-9.5/peltier-modules/stonecold/tec1-01708/#>