



## Przełącznik energoelektroniczny do współpracy z generatorami termoelektrycznymi

**Mirosław Mrozek, Andrzej Majcher, Mirosław Neska**

Sieć Badawcza Łukasiewicz,  
Instytut Technologii Eksploatacji Zakład Automatyki i Systemów Sterowania  
e-mail: miroslaw.mrozek@itee.lukasiewicz.gov.pl

### Streszczenie

W artykule przedstawiono autorski przełącznik DC-AC „on-grid” do zamiany energii prądu stałego na energię prądu przemiennego o wysokim współczynniku mocy PF. Przełącznik ten przystosowany jest do współpracy z ogniwami termoelektrycznymi – posiada szeroki zakres napięcia wejściowego oraz zaimplementowany algorytm wyznaczania punktu mocy maksymalnej MPP (*Maximum Power Point*). Zostały przedstawione przebiegi generowanego prądu przemiennego, oddawanego do publicznej sieci elektroenergetycznej. Podano warunki konieczne do zwiększenia efektywności uzysku energii elektrycznej.

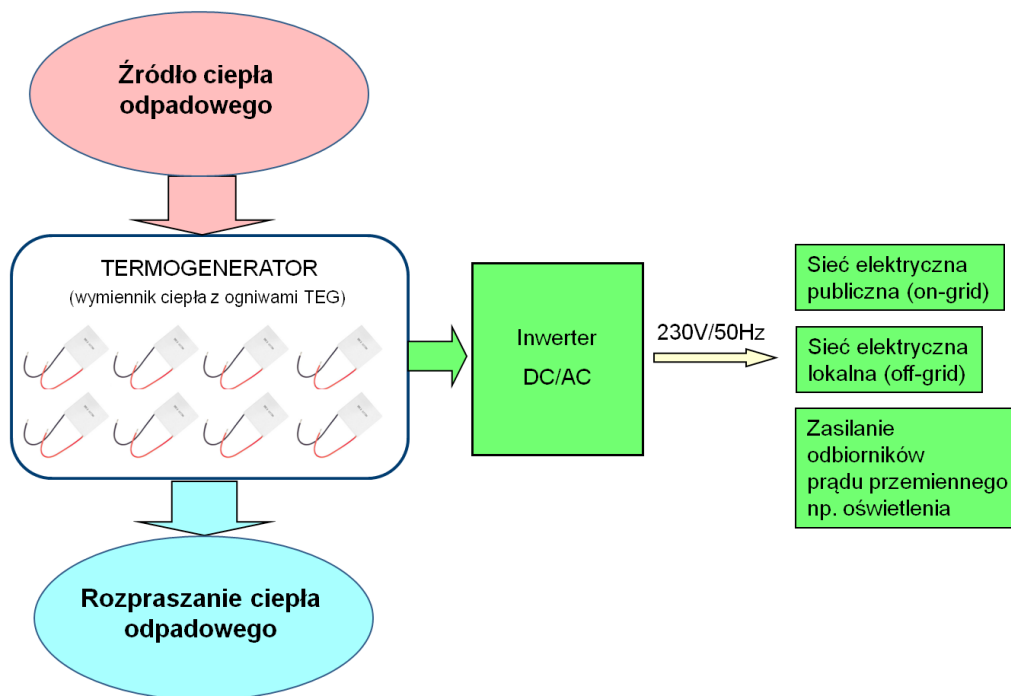
Słowa kluczowe: produkcja energii elektrycznej, przełącznik energoelektroniczny, generatory termoelektryczne TEG, ogniwa termoelektryczne, termoogniwa

## 1. Wprowadzenie

Do bezpośredniej konwersji energii cieplnej w energię elektryczną wykorzystuje się generatory termoelektryczne TEG [1–3]. Nie posiadają one części ruchomych oraz cieczy roboczych, uruchamiają się bezzwłocznie, mogą

pracować w każdej pozycji, cechują się wysoką żywotnością (20–30 lat), mogą pracować w szerokim zakresie temperatur. Postęp technologiczny oraz spadek cen powoduje, że uzasadnione ekonomicznie i technicznie staje się stosowanie termoogniw do wytwarzania energii elektrycznej także z ciepła niskotemperaturowego [8] (rys. 1).

W ogniwach termoelektrycznych występują zjawiska termoelektryczne, takie jak efekt Peltiera, efekt Thomsona i efekt Seebecka. Dotyczą one obwodu złożonego z dwóch elementów przewodzących, na którego złączach pod wpływem różnicy temperatury generowana jest siła elektromotoryczna [4–6]. Obwody połączone w grupy i ograniczone płytkami ceramicznymi tworzą moduły termoelektryczne, nazywane generatorami termoelektrycznymi TEG.



**Rys. 1.** Schemat wytwarzania energii elektrycznej z energii cieplnej przez termoogniwa TEG

Sprawność ogniw termoelektrycznych jest to stosunek mocy elektrycznej, oddawanej w obwodzie zewnętrznym, tj.  $P = R \times I_{TEG}^2$ , do ilości ciepła dostarczonego do ogniwa  $Q$ . Obecnie sprawność termoogniw wynosi 5–8%. Prace rozwojowe nad materiałami o lepszych właściwościach termoelektrycznych pozwalają osiągnąć sprawność powyżej 10% [9–12]. Jedno ogniwo termoelektryczne może wytworzyć do 20 W mocy elektrycznej. Wartości takie osiągają ogniwa, w których różnica temperatur między stronami przekracza 300°C [13]. Dla wartości  $\Delta T < 100^\circ\text{C}$  osiągane moce nie są zazwyczaj większe niż 5 W, a napięcia generowane nie przekraczają 5 V [7], [8]. Takie wartości są wystarczające w przypadku zastosowania termoogniwa np. do zasilania układu pomiarowego. Wykorzystanie termoogniw do produkcji energii elektrycznej oddawanej do publicznej sieci elektroenergety-

cznej wymaga użycia wielu połączonych ze sobą ogniów oraz zastosowania odpowiedniego przekształtnika DC-AC. W dalszej części artykułu przedstawiono możliwość stosowania ogniów termoelektrycznych do wytwarzania energii elektrycznej prądu przemiennego i warunki konieczne do zwiększenia efektywności uzysku energii.

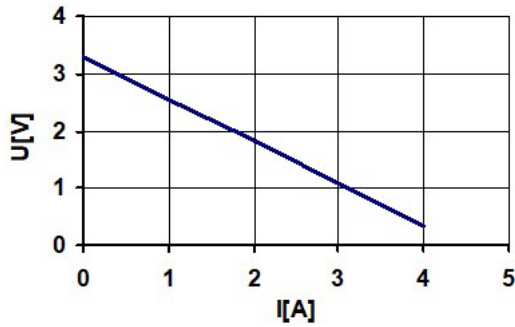
## 2. Sposób konwersji energii ciepła odpadowego na energię elektryczną prądu przemiennego

Źródłem ciepła odpadowego mogą być spaliny w kanałach kominowych, ciepło z kotłów parowych i wodnych, gorące ciecze chłodnicze procesów przemysłowych, gorąca woda lub para z upustów ciepłowniczych. Ciepło to doprowadzone jest do gorącej strony wymiennika, który złożony jest z wielu połączonych ze sobą ogniów termoelektrycznych TEG. Zimna strona wymiennika rozprasza niewykorzystaną część ciepła. W wyniku różnicy temperatur  $\Delta T$  między okładzinami modułów termoelektrycznych powstaje wypadkowe napięcie  $U_{TEG}$ . Wytworzona energia elektryczna prądu stałego zamieniana jest na energię prądu przemiennego w przekształtniku DC-AC. Przekształtnik może być podłączony do publicznej sieci elektroenergetycznej (*on grid*), może pracować jako inwerter wyspowy w lokalnej sieci elektrycznej (nazywany także autonomicznym lub *off-grid*) lub zasilać wyłącznie jeden rodzaj odbiorników, np. oświetlenie. Na wyjściu przekształtnika DC-AC powinno być sinusoidalne napięcie przemiennie o częstotliwości 50 Hz i stałej wartości skutecznej 230 V. Dopuszczalne odchylenia wynoszą  $\pm 10\%$ , czyli od 207 do 253 V. Do wytwarzania energii elektrycznej rzędu kilowatogodzin, należy zastosować dużą ilość termoogniw, połączonych ze sobą w grupy.

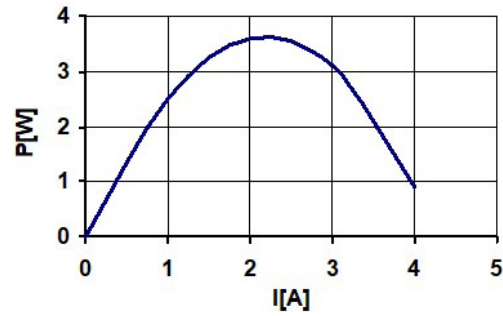
Na rysunku 2 pokazano zależność napięcia  $U$  od przepływającego prądu  $I$  jednego ogniwa termoelektrycznego. Wraz ze wzrostem natężenia prądu  $I$ , napięcie  $U$  maleje. Jest to zależność liniowa i wynika z rezystancji wewnętrznej ogniwa. Łączenie szeregowo termoogniw zwiększa wypadkową rezystancję wewnętrzną, a równoległe zmniejsza. Im mniejsza rezystancja wewnętrzna, tym mniejsze nachylenie  $U = f(I)$  i bardziej płaska charakterystyka  $P = f(I)$ . Rysunek 3 pokazuje, że dla określonej wartości prądu istnieje moc maksymalna.

Dla efektywnej produkcji energii przekształtnik DC-AC musi mieć zdolność wyznaczania punktu mocy maksymalnej MPP. Z konstrukcji i zasady działania przekształtnika DC-AC wynika, że im wyższe napięcie na wejściu, tym większa zdolność do utrzymania danego napięcia na wyjściu, niezależnie od zmian mocy źródła dostarczającego energię [14], [15]. Powyższe wymagania i właściwości powodują, że termoogniwa należy łączyć ze sobą w sposób mieszany – szeregowo i równoległe. Do uzyskania odpowiednio wysokich napięć należy stosować połączenia szeregowo modułów TEG. Pojedyncze

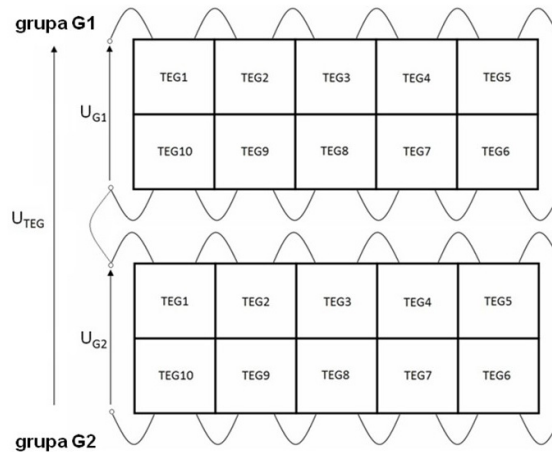
moduły najlepiej połączyć szeregowo w jedną grupę. Z kolei grupy modułów można także łączyć szeregowo lub równoległe. Przy połączeniu szeregowym uzyskujemy wypadkowe napięcie  $U_{TEG} = U_{G1} + U_{G2}$ , będące sumą napięć poszczególnych grup modułów (rys. 4). Przy połączeniu szeregowym prąd płynący przez wszystkie ogniwa jest taki sam:  $I_{TEG} = I_{G1} = I_{G2}$ .



Rys. 2. Wykres  $U = f(I)$  dla termoogniwa TEC1-12730

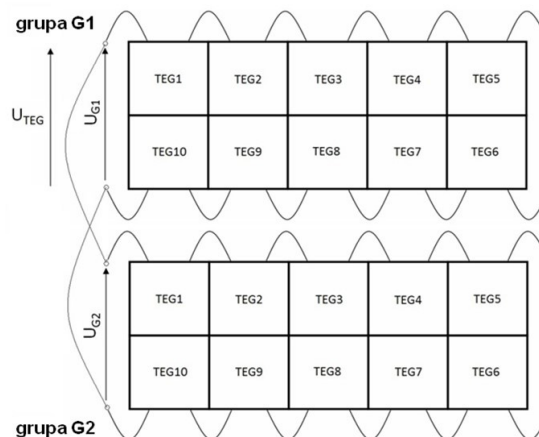


Rys. 3. Wykres  $P = f(I)$  dla termoogniwa TEC1-12730



Rys. 4. Połączenie szeregowe dwóch grup modułów termoelektrycznych TEG

Dla połączenia równoległego wypadkowe napięcie jest równe napięciom poszczególnych grup:  $U_{TEG} = U_{G1} = U_{G2}$ , a prąd jest sumą prądów poszczególnych grup modułów:  $I_{TEG} = I_{G1} + I_{G2}$  (rys. 5).



Rys. 5. Połączenie równoległe dwóch grup modułów termoelektrycznych TEG

### 3. Przekształtnik DC-AC oddający energię do sieci

Do zamiany energii prądu stałego wytwarzanej przez termogenerator na energię prądu przemiennego, oddawaną do sieci elektroenergetycznej opracowano i wykonano przekształtnik DC-AC. Istniejące przekształtniki DC-AC przeznaczone do paneli fotowoltaicznych nie umożliwiają poprawnej i efektywnej współpracy z generatorami termoelektrycznymi TEG. Są one projektowane na wyższe zakresy napięć wejściowych oraz minimalne napięcie wejściowe powyżej 70 V. Z kolei tzw. mikronwertery DC-AC (do 300 W) dla fotowoltaiki posiadają mniejsze napięcie wejściowe (startowe), ale wąski zakres dopuszczalnych napięć (20...50 V lub 30...70 V). Charakterystyka prądowo-napięciowa panelu fotowoltaicznego wymusza określone działanie algorytmu śledzenia punktu mocy maksymalnej MPPT.

Do współpracy z generatorami termoelektrycznymi TEG, przekształtnik DC-AC powinien spełniać następujące kryteria:

- szeroki zakres napięcia wejściowego (przynajmniej 10...100 V),
- jak najmniejsze napięcie wejściowe pozwalające na poprawne działanie przekształtnika,
- szybki algorytm śledzenia punktu mocy maksymalnej MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

Przekształtnik DC-AC oddający energię elektryczną do publicznej sieci elektroenergetycznej powinien posiadać współczynnik mocy PF (*Power Factor*) bliski jedności. Zgodnie ze wzorem:

$$PF = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (1)$$

współczynnik mocy PF może zawierać się w przedziale  $\langle 0...1 \rangle$ . Wpływ na wartość tego współczynnika mają:

- $\cos\varphi$  – nazywany współczynnikiem mocy w dziedzinie pierwszej harmonicznej lub współczynnikiem przesunięcia DPF (*Displacement Power Factor*):

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (2)$$

gdzie:

$\varphi$  – przesunięcie między napięciem i prądem,

$P$  – moc czynna (W – wat),

$S$  – moc pozorna (VA – woltoamper).

- $THD_I$  – współczynnik odkształcenia prądu (*Total Harmonic Distortion*), który jest określany wzorem:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (3)$$

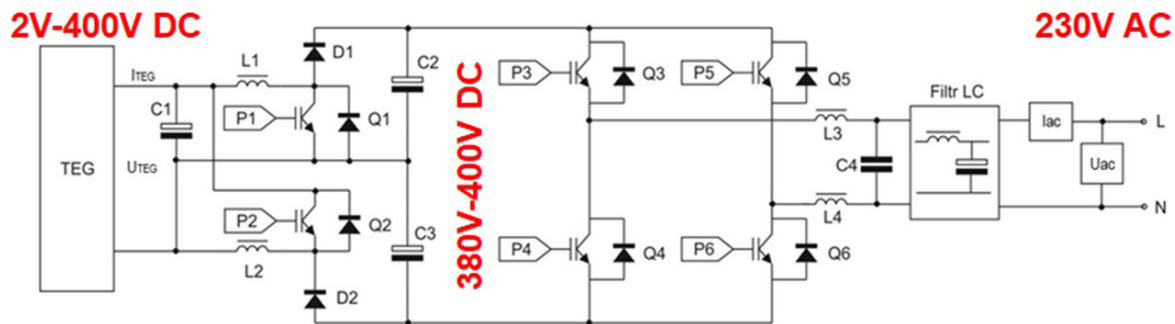
gdzie:

$I_1$  – składowa podstawowa prądu,

$I_h$  – składowa harmoniczna prądu.

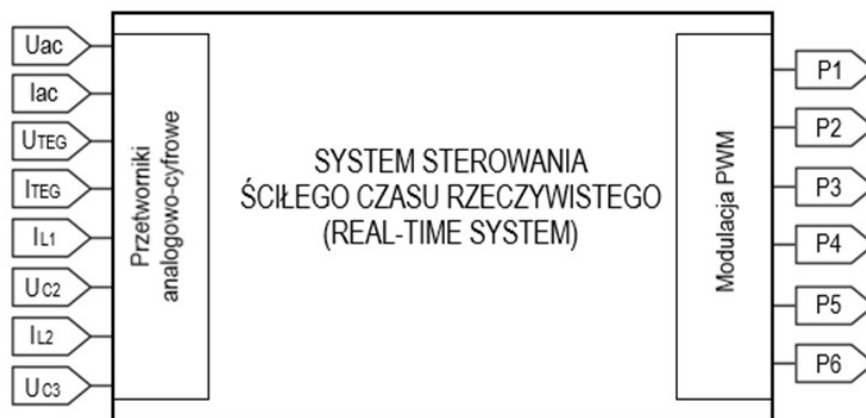
Z powyższych zależności wynika, że przebieg generowanego prądu powinien być jak najmniej zniekształcony, dążąc do idealnego przebiegu sinusoidalnego, czyli nie zawierać wyższych składowych harmonicznych. Kąt przesunięcia fazowego między prądem a napięciem powinien wynosić  $180^\circ$ , ponieważ prąd ma być oddawany do sieci, a nie pobierany.

Na rysunku 6 przedstawiony jest schemat dwustopniowego przekształtnika DC-AC, który umożliwia konwersję energii z generatora termoelektrycznego TEG na energię prądu przemiennego oddawaną do sieci.



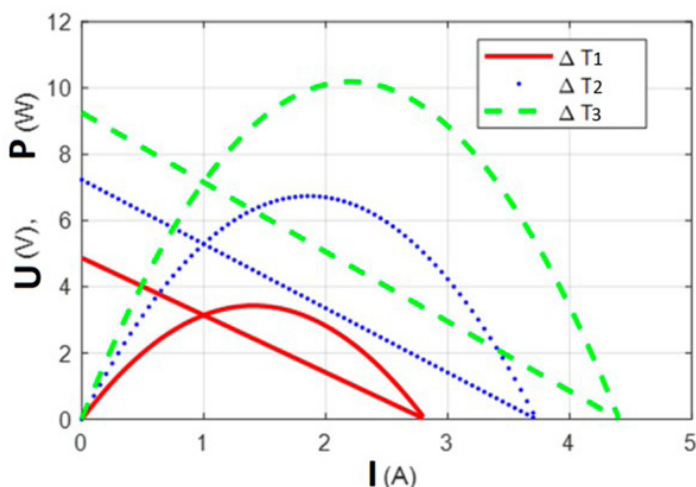
Rys. 6. Schemat dwustopniowego przekształtnika DC-AC

Pierwszy stopień ma za zadanie podwyższyć napięcie generowane przez termoogniwa z zakresu 2...400 V DC do napięcia 380...400 V DC. Tranzystor Q1 pracuje w układzie Boost, a tranzystor Q2 w układzie Buck Boost. Drugi stopień, złożony z czterech tranzystorów IGBT w układzie mostkowym, jest przekształtnikiem DC-AC generującym prąd o przebiegu sinusoidalnym. Sterowanie tranzystorami w obu stopniach jest realizowane przez modulację szerokością impulsu PWM [16], [17]. Odpowiednie sygnały (P1, P2, P3, P4, P5, P6) sterujące tranzystorami, są wyliczane przez sterownik ściślego czasu rzeczywistego na podstawie mierzonych wartości prądów i napięć (rys. 7).



Rys. 7. Kluczowe sygnały wejściowe i wyjściowe sterownika przekształtnika DC-AC

Dodatkowo sterownik posiada zaimplementowany algorytm śledzenia punktu mocy maksymalnej MPPT.



Rys. 8. Charakterystyki elektryczne generatorów termoelektrycznych (TEG)

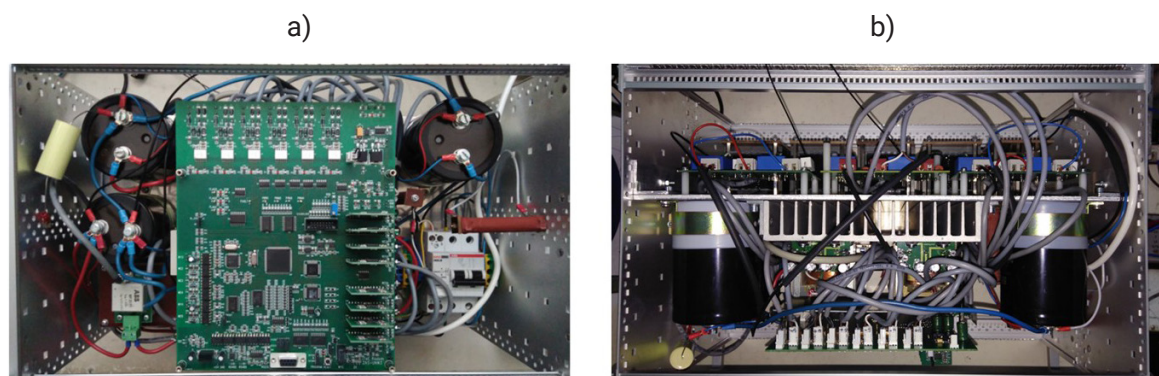
Charakterystyka elektryczna mocy generatorów termoelektrycznych kształtem zbliżona jest do odwróconej paraboli, w wierzchołku której znajduje się punkt maksymalnej mocy, jaką termooogniwo jest w stanie wygenerować dla danej różnicy temperatur  $\Delta T$  (rys. 8). W opracowanym przekształtniku do śledzenia punktu mocy maksymalnej została zastosowana metoda zaburzenia i obserwacji P&O (*Perturbation and observe method*) [18], [19]. Polega ona na wymuszonych zmianach prądu pracy ogniwa termoelektrycznych i obserwacji zmian mocy. Zmiany prądu należy kontynuować w tym samym kierunku (zwiększać lub zmniejszać), jeśli ta zmiana powoduje wzrost mocy. Natomiast jeżeli moc maleje należy zmienić kierunek zmian prądu. Jeżeli prąd był zwiększany należy zacząć go zmniejszać, a gdy był zmniejszany należy zacząć go zwiększać, do momentu osiągnięcia maksymalnej mocy.

## 4. Wyniki badań

Opracowany i wykonany przekształtnik DC-AC o mocy nominalnej 1 kW (rys. 9) zweryfikowano w układzie z dwudziestoma modułami termoelektrycznymi (typ TEC1-12730), umieszczonymi w wymienniku ciepła.

W autorskim rozwiązaniu przekształtnika zbadano poprawność generowanego do sieci prądu, współczynnik mocy PF, algorytm wyznaczania punktu mocy maksymalnej MPPT oraz porównano wyniki z przekształtnikiem przeznaczonym do paneli fotowoltaicznych.

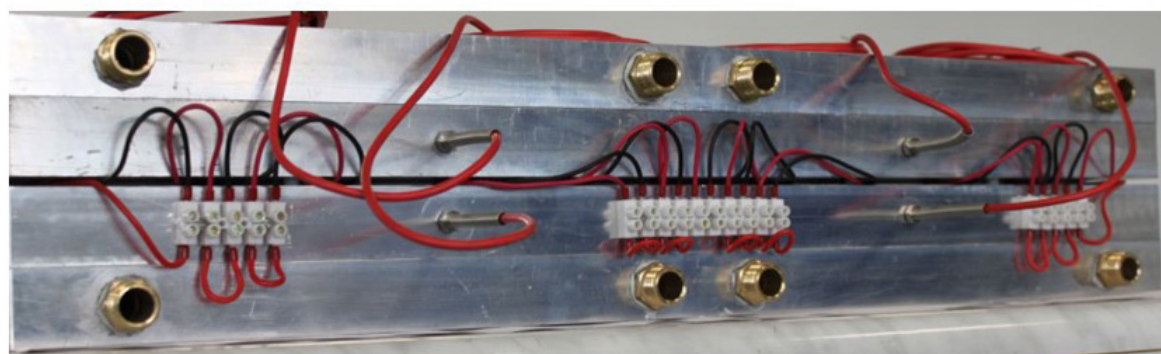
Wymiennik ciepła został zbudowany z czterech płyt ze stopu aluminium (rys. 10). Między dwoma górnymi i dwoma dolnymi płytami znajdują się termooogniwa. Pojedyncza płyta ma wymiary: długość 680 mm, szerokość 200 mm i grubość 34 mm.



**Rys. 9.** Widok zbudowanego przekształtnika DC-AC: a) część przednia ze sterownikiem, b) widok z góry z widocznymi elementami mocy

W autorskim rozwiązaniu przekształtnika zbadano poprawność generowanego do sieci prądu, współczynnik mocy PF, algorytm wyznaczania punktu mocy maksymalnej MPPT oraz porównano wyniki z przekształtnikiem przeznaczonym do paneli fotowoltaicznych.

Wymiennik ciepła został zbudowany z czterech płyt ze stopu aluminium (rys. 10). Między dwoma górnymi i dwoma dolnymi płytami znajdują się termoogniwa. Pojedyncza płyta ma wymiary: długość 680 mm, szerokość 200 mm i grubość 34 mm.

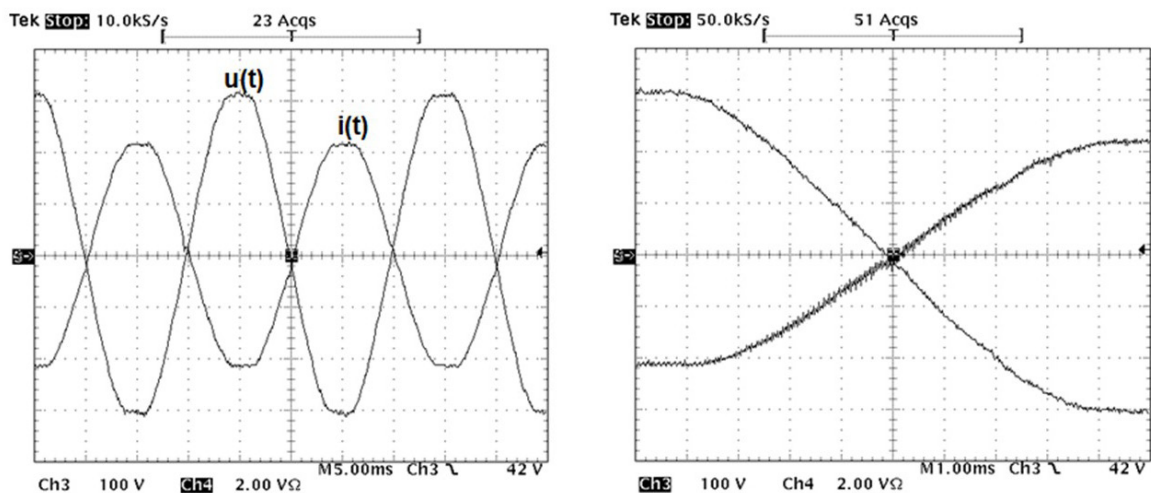


**Rys. 10.** Widok wymiennika ciepła dla ogniw termoelektrycznych typu ciec-z-ciecz

Dla zmniejszenia rezystancji termicznej do montażu ogniw na płytach aluminiowych użyto pasty termoprzewodzącej o współczynniku przewodzenia ciepła  $2,8 \text{ W}/(m \times K)$ , dla zmniejszenia rezystancji termicznej. Pasta wypełnia mikroprzestrzeń między modułem a płytą aluminiową. Zwiększa to strumień ciepła przewodzony przez termoogniwo, a tym samym jego wydajność elektryczną. Płyty zewnętrzne mają wewnątrz wyfrezowane dwa kanały do doprowadzania ciepła w formie wężownicy (płyta górna) i odprowadzania niewykorzystanego ciepła (płyta dolna). Z boku płyty znajdują się otwory dolotowe i wylotowe oraz przewody elektryczne. Jako medium transmisyjne ciepło zastosowano wodę. Taka konstrukcja wymiennika ciepła pozwoliła uzyskać równomierny rozkład temperatury w płaszczyznach równoległych do płaszczyzn powierzchni modułów termoelektrycznych. Dla

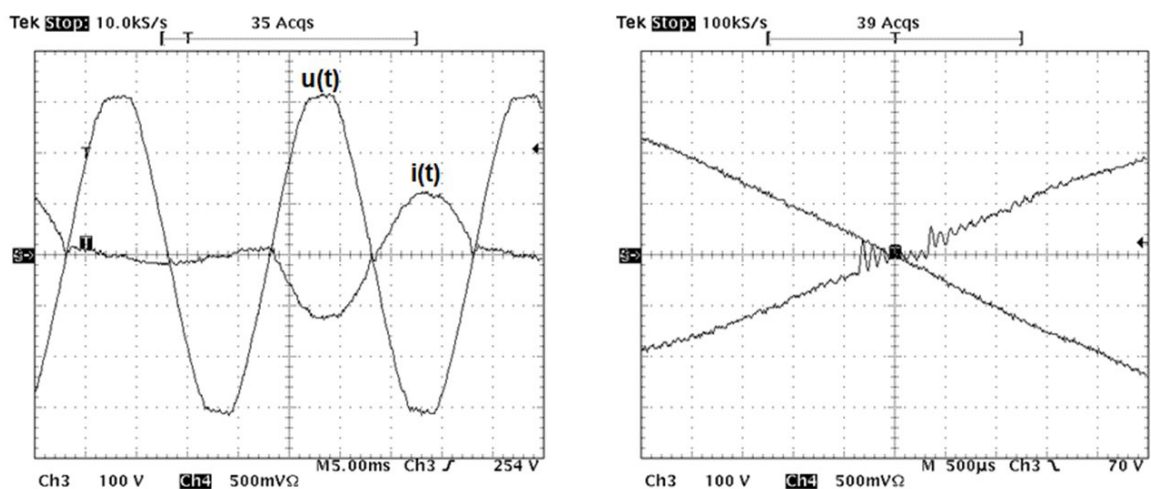


różnicy temperatur  $\Delta T = 85^\circ\text{C}$  z dwudziestu szeregowo połączonych modułów, uzyskano maksymalną moc  $P = 84,5\text{ W}$ . Moc na wyjściu przekształtnika, tj. od strony sieci, była niższa ze względu na straty w przekształtniku (statyczne i dynamiczne) i wynosiła około  $68\text{ W}$ . Dla większych mocy, bliskich mocy nominalnej przekształtnika, sprawność jest większa. Uzyskany przebieg prądu generowanego do sieci przez przekształtnik DC-AC przedstawiono na rys. 11.



**Rys. 11.** Oddawanie energii do sieci przez przekształtnik wykonany w Ł-ITeE do współpracy z termogeneratorami TEG

Generowany prąd  $i(t)$  jest w przeciwfazie do napięcia sieci  $u(t)$  – kąt przesunięcia fazowego wynosi około  $177^\circ$ . Kształt prądu jest bardzo zbliżony do sinusoidy, wypłaszczenie prądu w wierzchołkach jest spowodowane wypłaszczeniem napięcia w sieci. Przekształtnik za wzorzec sinusoidy przyjmuje przebieg napięcia w sieci. Przy przejściu przez zero napięcia sieci przekształtnik nie ma problemu z synchronizacją.



**Rys. 12.** Oddawanie energii do sieci przez przekształtnik DC-AC do paneli fotowoltaicznych

Na rysunku 12 pokazane są przykładowe przebiegi prądu generowanego przez przekształtnik przeznaczony do paneli fotowoltaicznych, w którym do wejścia podłączono wymiennik ciepła z termoogniwami. Inwerter do paneli fotowoltaicznych nie generuje poprawnie prądu  $i(t)$ . Przekształtnik ten ma problemy z synchronizacją z siecią, do której jest oddawany prąd oraz z ustalaniem punktu mocy maksymalnej. Przy przejściu przez zero napięcia sieci występują zakłócenia.

## 5. Podsumowanie

Do konwersji energii ciepła odpadowego na energię elektryczną generowaną do sieci elektroenergetycznej, można zastosować generatory termoelektryczne TEG. Stosując wiele połączonych ze sobą ogniw termoelektrycznych, przy różnicy temperatur  $\Delta T$  poniżej  $100^{\circ}\text{C}$  między okładkami termoogniw, można uzyskać znaczące wartości użytecznej mocy elektrycznej.

Dla efektywnego odzysku energii elektrycznej ważny jest równomierny rozkład temperatur na okładkach poszczególnych ogniw, zarówno po stronie gorącej, jak i zimnej. Pozwala to na optymalne wykorzystanie powierzchni ogniw termoelektrycznych. Z kolei optymalizacja uzysku energii elektrycznej, w zależności od zmian ilości energii cieplnej, dokonywana jest w sterowniku przekształtnika DC-AC. W rozwiązaniu tym, oprócz zaimplementowanego algorytmu śledzenia punktu mocy maksymalnej MPPT, ważne są także parametry generowanego do sieci elektroenergetycznej prądu. Współczynnik mocy PF będzie maksymalny wówczas, gdy przebieg generowanego prądu nie będzie zawierał wyższych składowych harmonicznych (przebieg sinusoidalny), a przesunięcie fazowe między prądem i napięciem sieci elektroenergetycznej będzie zbliżone do  $180^{\circ}$ .

Przedstawiony w artykule przekształtnik został zaprojektowany na moc 1000 W. Na stanowisku badawczym przekształtnik przetestowano z dwudziestoma termoogniwami. Aktualnie trwają prace nad budową termogeneratora o mocy odpowiadającej mocy nominalnej opracowanego przekształtnika. Nowością w tym urządzeniu jest szeroki zakres napięć wejściowych 2...400 V DC oraz współpraca z ogniwami termoelektrycznymi. Istnieje także możliwość współpracy opisanego urządzenia z ogniwami paliwowymi.

## Literatura

- [1] Brazdil M., Pospisil J., *Thermoelectric power generation utilizing the waste heat from a biomassboiler*, Journal of Electronic Materials 2013, 42, 2198–2202. DOI: 10.1007/s11664-013-2570-7.

- [2] Wojciechowski K., Merkisz J., Fuć P., Tomankiewicz J., Zybała R., Leszczyński J., Lijewski P., Nieroda P., *Prototypical thermoelectric generator for waste heat conversion from combustion engines*, *Combustion Engines* 2013, 52(3), 60–71.
- [3] Kalpana K., Muthumeena V., Sheerin S., Sriranjani M., *Thermoelectric generator and PV panel integrated hybrid energy harvesting system*, *International Journal for Modern Trends in Science and Technology* 2017, 3(5), 173–177.
- [4] Ohara B., Wagner M., Kunkle C., Watson P., *Residential solar combined heat and power generation using solar thermo-electric generation*, *Journal of Electronic Materials* 2015, 44(6), 2132–2142. DOI: 10.1007/s11664-015-3702-z.
- [5] Aggarwal R.K., Markandas S., *Thermoelectric generation using combination of solar and geo-thermal energy*, *International Journal of Advanced Research* 2013, 1(5), 53–58.
- [6] Sztekler K., Wojciechowski K., Komorowski M., *The thermoelectric generators use for waste heatutilization from conventional power plant*, *E3S Web of Conferences* 2017, 14, 01031. DOI: 10.1051/e3sconf/20171401032.
- [7] Trojanowski Ł., *Stabilizator temperatury płaszcza wodnego oparty na modułach Peltiera*, Praca dyplomowa, Politechnika Warszawska, 2008.
- [8] Jadwiszczok P., Sidorczyk M., *Produkcja energii elektrycznej z ciepła za pomocą ogniw TEG, charakterystyki termoelektryczne termogeneratorów*, *Rynek Instalacyjny* 2016, 4, 38–42.
- [9] Poudel B., Hao Q., Ma Y., Lan Y., Minnich A., Yu B., Yan X., Wang D., Muto A., Vashaee D., Chen X., Liu J., Dresselhaus M.S., Chen G., Ren Z., *High-thermoelectric performance of nanostructured bismuth antimony telluride bulk alloys*, *Science* 2008, 320 (5876), 634–638. DOI: 0.1126/science.1156446.
- [10] Hochbaum A.I., Chen R., Delago R.D., Liang W., Garnett E.C., Najarian M., Majumdar A., Yang P., *Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nano wires*, *Nature* 2008, 451(10), 163–167. DOI: 0.1038/nature06381.
- [11] Królicka A., Hruban A., Mirowska A., *Nowoczesne materiały termoelektryczne – przegląd literaturowy*, *Materiały Elektroniczne* 2012, 40(4), 19–34.
- [12] Rezaia A., Rosendahl L.A., *Thermal effect of a thermoelectric generator on parallel microchannel heat sink*, *Energy* 2012, 37(1), 220–227. DOI: 10.1016/j.energy.2011.11.043.
- [13] *Tellurex, G2-56-0570 Thermoelectric Power Generation Module Specifications*, [www.tellurex.com/media/uploads/productpdfs/g2-56-0570-specifications.pdf](http://www.tellurex.com/media/uploads/productpdfs/g2-56-0570-specifications.pdf)
- [14] Majcher A., Gospodarczyk A., Mrozek M., Przybylski J., *Podstawowe moduły złożonych systemów sterowania plazmowych procesów inżynierii powierzchni*, *Problemy Eksploatacji* 2004, 3, 175–183.
- [15] Mrozek M., *Układ sterowania przekształtnikiem AC-DC z funkcją korekcji współczynnika mocy PFC*, *Problemy Eksploatacji* 2012, 3, 145–154.
- [16] Gospodarczyk A., Majcher A., Mrozek M., *Trójfazowy przekształtnik mocy AC/DC*, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* 2013, 2, 219–225.
- [17] Mrozek M., *Power factor correction algorithm in AC-DC converter*, *Problemy Eksploatacji* 2013, 2, 129–139.

- [18] Zaremba A., Rodziewicz T., Waclawek M., *Algorytmy śledzenia punktu mocy maksymalnej (MPPT) w systemach fotowoltaicznych*, Proceedings of ECO 2012, 6 (2), 805–810. DOI: 10.2429/proc.2012.6(2)112.
- [19] Kwan T.H., Wu X., *TEG maximum power point tracking using an adaptive duty cycle scaling algorithm*, Energy Procedia 2017, 105, 14–27. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.274.