

Generatory termoelektryczne do lokalnego zasilania urządzeń pomiarowych w komorach ciepłowniczych

Evaluation of direct electricity generation in a thermoelectric generator powered by heat from district heating pipelines

Marek Sidorczyk, Elżbieta Niemierka, Piotr Jadwiszczak*

Słowa kluczowe: TEG, generatory termoelektryczne, ciepłownictwo

Streszczenie

Brak dostępności energii elektrycznej w istniejących komorach ciepłowniczych wymusza poszukiwanie alternatywnych źródeł energii, do zasilania cyfrowych komponentów systemów monitoringu. Lokalne wytwarzanie energii elektrycznej z dostępnego ciepła sieciowego możliwe jest w generatorach termoelektrycznych (TEG). Przedstawiono metodologię analizy podaży energii z TEG obejmującą: wytypowanie i charakterystykę lokalnych źródeł oraz odbiorników ciepła dla zasilania TEG w danej komorze ciepłowniczej, ocenę sezonowej zmienności lokalnych warunków zasilania TEG strumieniem ciepła i potencjału wytwórczego energii elektrycznej oraz wybór korzystnego rozwiązania. Zawarto przykład analizy dla dynamicznych warunków pracy rzeczywistego systemu ciepłowniczego.

Keywords: TEG, thermoelectric generator, district heating

Abstract

Typically, in existing district heating distribution nodes there is no power supply for digital monitoring systems. The solution is thermoelectric generators (TEG) powered by heat from district heating pipelines. A methodology for analyzing the energy supply from TEG is presented, including defining local heat sources and receivers for powering TEG cells, assessing the seasonal heat supply and electricity generation potential of TEG, and selecting a favorable solution. An exemplary TEG analysis in real conditions of a real heating system is included.

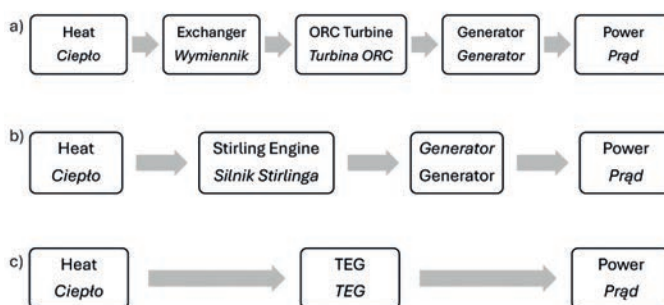
Wstęp

Współczesne systemy monitoringu i telemetrii systemów ciepłowniczych bazują na odczytach z licznych urządzeń pomiarowych, zlokalizowanych w miejscach strategicznych dla niezawodności i stabilności pracy systemu ciepłowniczego. W wypadku ciepłociągów podziemnych najczęściej miejscem tym są komory ciepłownicze. Układy pomiarowe oparte są na technologii cyfrowej, przez co wymagają stałego zasilania energią elektryczną. W większości komór, zwłaszcza tych eksploatowanych od dziesięcioleci, zasilanie energią elektryczną nie było przewidziane i do dziś nie jest dostępne. Wtórne doprowadzenie prądu sieciowego do takich obiektów infrastruktury podziemnej często jest trudne, nieopłacalne lub nawet niemożliwe ze względów technicznych, lokalizacyjnych czy organizacyjnych. W takich przypadkach rozwiązaniem są systemy lokalnego wytwarzania energii elektrycznej do zasilania cyfrowych układów pomiarowo-rejestrujących.

Istnieje kilka rozwiązań technicznych, wykorzystujących różne źródła energii oraz różne technologie jej wytwarzania lub transformacji. Wybór rozwiązania wymaga indywidualnej oceny, uwzględniającej analizę zapotrzebowania na energię elektryczną oraz lokalnych możliwości jej wytwarzania, z uwzględnieniem koherentności czasowej i parametrycznej popytu i podaży energii elektrycznej. W rozproszonych komorach ciepłowniczych naturalnym kierunkiem poszukiwań są urządzenia wytwarzające energię elektryczną z ciepła sieciowego.

Generatory termoelektryczne TEG

Znanymi technologiami lokalnej konwersji niskoparametrowego ciepła o temperaturze do 130°C w energię elektryczną są silniki Stirlinga, urządzenia wykorzystujące organiczny obieg Rankine'a (*ang. Organic Rankine Cycle – ORC*) oraz ogniwa generatorów termoelektrycznych (*ang. Thermoelectric Generator – TEG*).

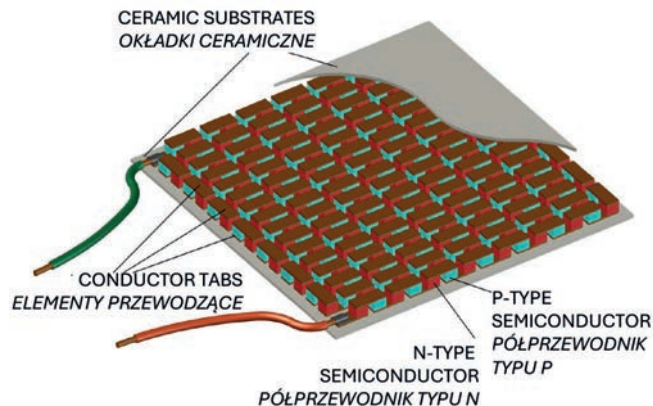


Rys. 1. Schemat produkcji energii elektrycznej z ciepła dla układów: a) z turbiną ORC, b) z silnikiem Stirlinga, c) z generatorem termoelektrycznym

Fig. 1. Heat to electricity generation chain: a) ORC turbine, b) Stirling engine, c) thermoelectric generator

* Marek Sidorczyk, dr inż., e-mail: marek.sidorczyk@insanit.pl, Insanit Sp. z o. o., Elżbieta Niemierka, dr inż., e-mail: elzbieta.niemierka@pwr.edu.pl, ORCID 0000-0002-4846-6550; Piotr Jadwiszczak, dr inż., e-mail: piotr.jadwiszczak@pwr.edu.pl, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska, ORCID 0000-0003-3896-2056.

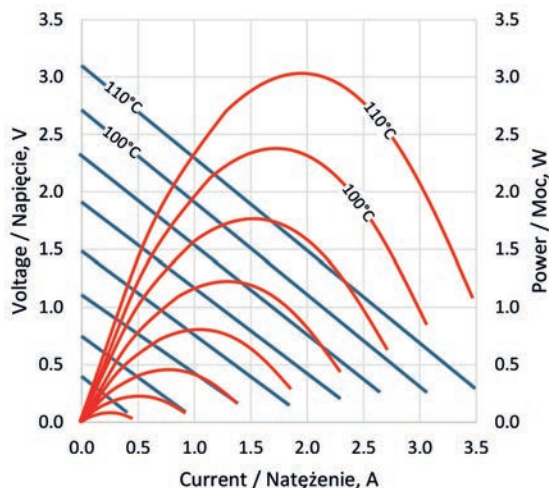
Generatory termoelektryczne wytwarzają prąd elektryczny w oparciu o zjawisko Seebecka. Siłą napędową jest różnica temperatur między okładką ciepłą i zimną ogniwa generatora. Konwersja ciepła w energię elektryczną odbywa się bezpośrednio, bez przekształcania w energię mechaniczną jak w innych technologiach (rys. 1). Dzięki budowie typu solid-state TEG pracują bez ruchomych części. Wymiary typowego ogniwa TEG to 50 na 50 mm przy grubości kilku milimetrów (rys. 2).



Rys. 2. Schemat budowy typowego generatora termoelektrycznego [4]
Fig. 2. Construction of a standard thermoelectric generator [4]

TEG mają niewielką sprawność, wynoszącą kilka procent oraz wymagają zapewnienia strumienia ciepła o wysokiej gęstości powierzchniowej. Na małą powierzchnię okładki ciepłej ogniwa należy dostarczać dużą ilość ciepła, jednocześnie efektywnie odbierając ją z okładki zimnej.

Ważnym parametrem TEG jest przebieg charakterystyki produkcji energii elektrycznej w danym ogniwie, w zależności od parametrów temperaturowych oraz strumieni czynników: dostarczającego i odbierającego ciepło z ogniwa. W przewidywanym zakresie temperatury pracy TEG w systemach ciepłowniczych, czyli od 20 do 150°C, w literaturze dostępne są jedynie pojedyncze wyniki badań [4-5]. Liczne badania ogniw TEG obejmują ich zastosowania m.in. w przemyśle, motoryzacyjnym lub kosmicznym [1,2,4,6], lub w samowystarczalnych systemach ogrzewania [7]. Na rys. 3. przedstawiono przykładową charakterystykę ogniwa TEC1-12730, przy temperaturze w obiegu chłodzącym wynoszącej 30°C oraz przyrastających temperaturach w obiegu grzewczym.



Rys. 3. Charakterystyka elektryczna generatora TEC1-12730, przy temperaturze w obiegu chłodzącym 30°C oraz rosnącej temperaturze w obiegu grzewczym co 10°C [2]. Linia czerwona to moc, a linia niebieska to napięcie

Fig. 3. Electrical characteristics of the TEG type TEC1-12730 generator at 30°C in the cooling circuit and an increasing temperature in the heating circuit by 10°C [2]. The red line represents power and the blue line represents voltage

Maksymalna moc prądu elektrycznego to około 3 W z jednego ogniwa. W przypadku budowy zespołów, składających się z wielu ogniw, wartość ta będzie proporcjonalnie większa.

3. Metodologia

3.1. Etapy analizy

Nie istnieją gotowe wytyczne projektowania systemów lokalnej produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem ogniw TEG. Literatura nie przytacza również przykładów zastosowania takich rozwiązań w systemach ciepłowniczych, do zasilania rozproszonych układów monitoringu i rejestracji danych.

Postawione zadanie wymaga przeprowadzenia pilotażowych analiz przed doбором i wymiarowaniem pakietu ogniw TEG. W tym celu opracowano procedurę stosowaną do przewidywanych warunków pracy termogeneratorów, złożoną z trzech etapów:

- 1) Wytypowanie i charakterystyka par lokalnych źródeł oraz odbiorników ciepła dla zasilania ogniw TEG w analizowanej komorze ciepłowniczej.
- 2) Ocena sezonowej (rocznej) zmienności warunków zasilania ogniw TEG strumieniem ciepła transferowanego z danego źródła do danego odbiornika, kształtującej lokalny potencjał wytwórczy energii elektrycznej.
- 3) Porównanie i wybór korzystnego rozwiązania.

Ze względu na cel analizy, na wstępnym etapie dopuszczalne jest pominięcie szczegółowych rozwiązań technicznych i elektrycznych. Przyjęto założenie, że istnieją odpowiednie rozwiązania technologiczne przejmowania, transferu i rozpraszania ciepła dla powietrza, wody, gruntu, ścianek ciepłociągu, przegród budowlanych i innych. Przyjęto również, że dzięki właściwościom ogniw TEG, możliwe jest zbudowanie pakietu odpowiednio połączonych ogniw, w celu osiągnięcia wymaganych parametrów zasilania elektrycznego.

3.2. Obliczenia

W rozpatrywanym obszarze analizy ważniejsze jest określenie rocznej zmienności produkcji energii elektrycznej w TEG, niż określenie wielkości tej produkcji. Z tego względu zaproponowano wykonanie analizy potencjału wytwórczego dla jednego wirtualnego ogniwa TEG wyznaczając dla każdej godziny roku teoretyczną ilość energii elektrycznej generowanej przez TEG w komorze ciepłowniczej dla danego źródła i odbiornika ciepła. Chwilowa moc elektryczna takiego ogniwa wyznaczana jest z zależności [5]:

$$P = U \cdot (0,0484 \cdot t_h - 0,0499 \cdot t_c - 1,3010 \cdot U + 0,14584), W \quad (1)$$

gdzie:

t_h – temperatura źródła ciepła dla TEG, °C

t_c – temperatura odbiornika ciepła z TEG, °C

U – napięcie pracy, V.

3.3 Dane do obliczeń

Ze względu na specyfikę pracy systemu ciepłowniczego określoną sposobem regulacji dostawy ciepła, realizowanym wykresem regulacyjnym, opóźnieniami transportowymi w analizowanym punkcie sieci ciepłowniczej, występującymi tam zakłóceniami i wpływem dynamiki odbiorców ciepła do obliczeń zaleca się wykorzystywanie rzeczywistych danych pomiarowych, zamiast danych teoretycznych. Przykładowo rozbieżność między teoretycznymi liniami temperatury zasilania i powrotu według wykresu regulacyjnego, a rzeczywistą chmurą danych archiwalnych, wpłynie na wyniki analizy potencjału lokalnego wytwarzania energii elektrycznej w ogniwach TEG, zasilanych ciepłem sieciowym w danej komorze ciepłowniczej.

W przytaczanym przykładzie analizy wykorzystano dostępne autorom dane archiwalne z 2023 r., zawierające lokalne odczyty temperatury powietrza zewnętrznego, zasilania i powrotu w systemie

ciepłowniczym dużego miasta wojewódzkiego w Polsce. Wybrano dane z punktu pomiarowego dla dużej grupy odbiorców ciepła. Dane opracowywano w kroku godzinowym dla całego roku kalendarzowego. Zakresy temperatury odzwierciedlają rzeczywiste warunki eksploatacji systemu ciepłowniczego i zasilanych budynków z węzłami ciepłowniczymi. Należy zaznaczyć, że w wypadku analizowania innych komór ciepłowniczych, w innych lokalizacjach w systemie ciepłowniczym, dane pomiarowe będą inne.

4. Analiza

4.1 Źródła i odbiorniki ciepła dla TEG

Określenie możliwości lokalnego wytwarzania energii elektrycznej z ciepła w ogniwach TEG, w danej komorze ciepłowniczej wymaga wskazania źródła ciepła doprowadzanego do okładki gorącej TEG i odbiornika ciepła z okładki zimnej TEG.

W komorach ciepłowniczych, jako źródło ciepła do TEG, powinien być rozpatrywany wyłącznie ciepłociąg zasilający. Nie ma technicznego uzasadnienia dla analizowania innych źródeł, ze względu na dostępny wysoki parametr transportowanego, w tym ciepłociągu czynnika.

Potencjalnych odbiorników ciepła z TEG w komorach ciepłowniczych jest natomiast kilka. Poszukuje się środowiska o największych możliwościach odbioru ciepła. Zestaw potencjalnych odbiorników ciepła zmienia się w zależności od lokalizacji komory ciepłowniczej, jej zagłębienia w gruncie, materiału, z którego jest zbudowana, parametrów przechodzących rurociągów, gabarytów komory, ilości i rodzaju wyposażenia instalacyjnego czy technicznego, układu geologicznego wokół komory, sąsiadujących elementów infrastruktury pod – i naziemnej oraz wielu innych czynników lokalnych, włączając sprawy związane z prawem własności nieruchomości lub jej służebnością.

W typowej komorze ciepłowniczej odbiornikami ciepła z TEG mogą być:

- rurociąg powrotny,
- powietrze w komorze,
- ściana komory ciepłowniczej,
- grunt za ścianą komory,
- zewnętrzne powietrze atmosferyczne.

Każdy z nich posiada specyficzne cechy, warunkujące potencjał odprowadzania ciepła z okładki zimnej ogniwa TEG. Jego zmienność w czasie kształtuje produkcję energii elektrycznej w TEG w skali roku.

4.2. Parametry źródeł i odbiorników ciepła

Dla wydajności pracy ogniwa TEG najważniejsza jest gęstość strumienia ciepła przepływającego przez ogniwo. Należy skupić się na różnicy temperatury między źródłem, a odbiornikiem ciepła. To ona w kluczowy sposób warunkuje strumień ciepła doprowadzanego na gorącą okładkę TEG i ciepła odprowadzanego z zimnej okładki ogniwa TEG.

Z tego względu parametry termiczne źródeł i odbiorników ciepła oraz ich dostępność i zmienność w skali roku należy zawsze rozpatrywać w parach źródło-odbiornik. Ich wzajemna relacja warunkuje najważniejszą siłę napędową przepływu ciepła przez ogniwo TEG i kształtuje jego wydajność. W typowej komorze ciepłowniczej są to następujące pary:

- rurociąg zasilający – rurociąg powrotny (ozn. Zasilanie-TEG-Powrót),
- rurociąg zasilający – powietrze wewnątrz komory ciepłowniczej (ozn. Zasilanie-TEG-Powietrze),
- rurociąg zasilający – ściana komory ciepłowniczej (ozn. Zasilanie-TEG-Ściana),
- rurociąg zasilający – grunt za ścianą komory ciepłowniczej (ozn. Zasilanie-TEG-Grunt),

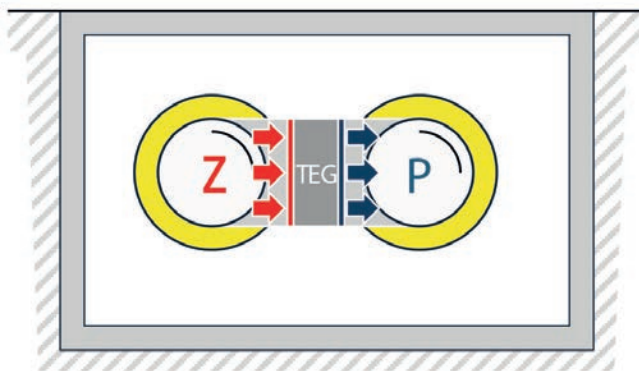
- rurociąg zasilający – zewnętrzne powietrze atmosferyczne (ozn. Zasilanie-TEG-Atmosfera).

Rurociąg zasilający w wodnych sieciach ciepłowniczych transportuje gorącą wodę sieciową ze źródła ciepła do odbiorców. W miejskich systemach ciepłowniczych ciepło dystrybuowane jest przez cały rok. Zmieniają się temperatury i strumienie czynnika. Zmiany te związane są z planem dostaw, rodzajem realizowanej regulacji dostawy ciepła do odbiorców oraz ogólnej akumulacyjności cieplnej systemu i opóźnień transportowych, w rejonach zasilanych przez daną komorę ciepłowniczą. Występujące dobowe i sezonowe fluktuacje temperatury zasilania bezpośrednio wpływają na potencjał produkcji energii elektrycznej w TEG. Graniczne temperatury zasilania określa wykres regulacyjny danego systemu ciepłowniczego, a stabilność i częstotliwość występowania konkretnych temperatur wody sieciowej kształtowane są głównie przez bieżące i przewidywane warunki pogodowe. Najwyższa temperatura zasilania występuje w warunkach projektowych sezonu zimowego i w warunkach górnego załamania wykresu regulacyjnego. Zależnie od systemu ciepłowniczego może to być np. 150°C, 120°C lub 90°C. Najniższą temperaturę zasilającą woda sieciowa osiąga w lecie, gdy sieć ciepłownicza dostarcza jedynie ciepło na cele przygotowania ciepłej wody użytkowej. W obszarze tak zwanego dolnego załamania wykresu regulacyjnego, utrzymywana jest temperatura zasilania około 60-70°C, w zależności od technologii przygotowywania ciepłej wody użytkowej u odbiorców i strat ciepła na przesyśle.

4.3. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Powrót

Temperatura w rurociągu powrotnym jest zawsze niższa niż w zasilającym. Różnica temperatury między nimi, będąca siłą napędową pracy ogniwa TEG, najwyższą wartość osiąga w warunkach projektowych sezonu zimowego. W skali roku maleje ona wraz ze wzrostem temperatury zewnętrznej, aby latem osiągnąć niską wartość stałą w obszarze dolnego załamania wykresu regulacyjnego sieci ciepłowniczej.

Transfer ciepła z rurociągu zasilającego do powrotnego przez ogniwo TEG jest stratą ciepła z punktu widzenia systemu ciepłowniczego, jednak skala tych strat jest niezauważalna, w porównaniu do innych eksploatacyjnych strat ciepła w systemie.



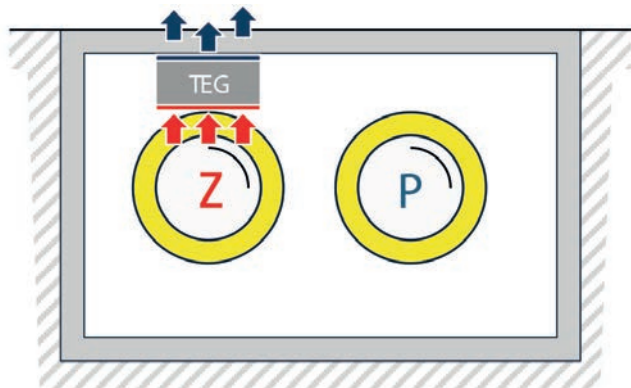
Rys. 4. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Powrót w komorze ciepłowniczej

Fig. 4. Supply-TEG-Return configuration. Z – supply pipeline, P – return pipeline

4.4. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Atmosfera

Z punktu widzenia efektywności pracy ogniwa TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Atmosfera, zmienność temperatury zewnętrznej jest niekorzystna w relacji do zmian temperatury ciepłociągu zasilającego. Najkorzystniejsze warunki pracy ogniwa w tej konfiguracji występują w warunkach projektowych sezonu grzewczego, gdy woda sieciowa osiąga najwyższą temperaturę w roku, a powietrze zewnętrzne najniższą. Następnie, wraz ze wzrostem temperatury zewnętrznej spada temperatura w ciepłociągu zasilającym. W lecie

sieć ciepłownicza dostarcza jedynie ciepło na cele przygotowania ciepłej wody użytkowej. Utrzymywane jest 60-70°C na zasilaniu. W tym samym czasie powietrze zewnętrzne może osiągać ponad 30°C, zatem efektywna różnica temperatury napędzająca TEG spada drastycznie poniżej 30 K.



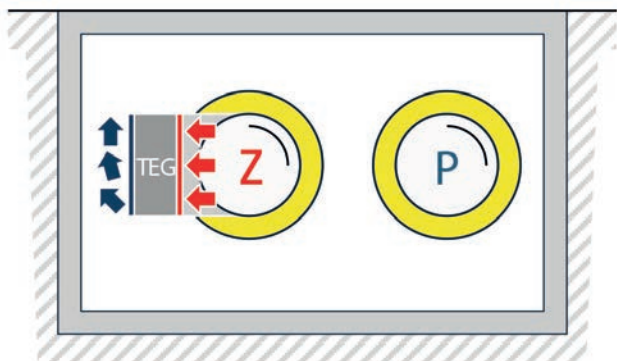
Rys. 5. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Atmosfera w komorze ciepłowniczej
Fig. 5. Supply-TEG-Air configuration. Z – supply pipeline, P – return pipeline

Rozpraszanie ciepła sieciowego do atmosfery jest stratą energetyczną w systemie ciepłowniczym. Wymaga również wyprowadzenia instalacji rozpraszającej poza obrys komory ciepłowniczej, co nie zawsze jest możliwe i bezpieczne.

4.5. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Powietrze

Ciepło z zimnej okładki ogniwa TEG można również odprowadzać do powietrza wewnątrz komory ciepłowniczej. Ciepło pobrane z rurociągu zasilającego, po przejściu przez ogniwo TEG, będzie rozpraszane do przestrzeni powietrznej wewnątrz komory ciepłowniczej. Zaletą takiego rozwiązania jest kompaktowość urządzenia i bezinwazyjny montaż w komorze. Wadą jest konieczność indywidualnej oceny zmienności temperatury powietrza wewnątrz każdej komory, jako odbiornika ciepła i wyznaczenia wpływu zrzuca ciepła na temperaturę powietrza w komorze.

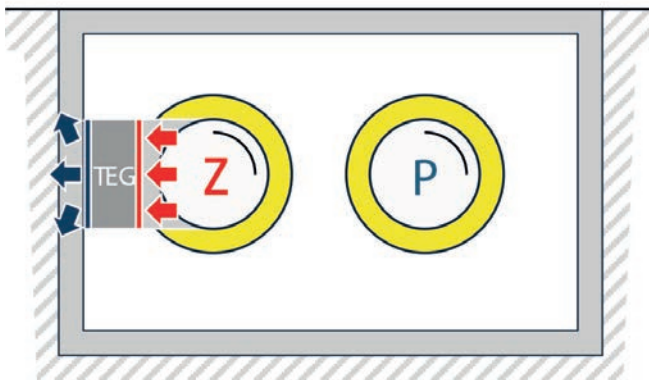
Temperatura ta zależy jest od bilansu zysków i strat ciepła komory ciepłowniczej. Bilans kształtowany jest przez wiele czynników, m.in. zagłębienie komory w gruncie, konstrukcję przegród, intensywność wymiany powietrza, poziom wód gruntowych oraz ilość, długość i średnice ciepłociągów, ich izolację cieplną itd. Doświadczenia eksploatacyjne miejskich przedsiębiorstw ciepłowniczych pokazują, że w podziemnych komorach ciepłowniczych temperatura powietrza oscyluje w zakresie 30-60°C, zależnie od bieżącej temperatury w sieci ciepłowniczej i charakterystyki cieplnej danej komory. Rozpraszanie ciepła podnosi temperaturę w komorze, obniżając tym samym efektywną różnicę temperatur napędzającą TEG.



Rys. 6. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Powietrze w komorze ciepłowniczej
Fig. 6. Supply-TEG-Air configuration. Z – supply pipeline, P – return pipeline

4.6. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Ściana

Intensywność odprowadzania ciepła z zimnej okładki TEG do ściany komory ciepłowniczej uzależniona jest od konstrukcji przegrody i temperatury środowiska bezpośrednio za ścianą. Odprowadzanie ciepła na wewnętrzną powierzchnię ściany komory nie wymaga ingerencji w jej konstrukcję, nie zakłóca jej integralności, właściwości konstrukcyjnych i szczelności. Przekazywanie ciepła sieciowego do ściany jest stratą energetyczną systemu ciepłowniczego, jednak skala tych strat jest niezauważalna w porównaniu do innych eksploatacyjnych strat ciepła.

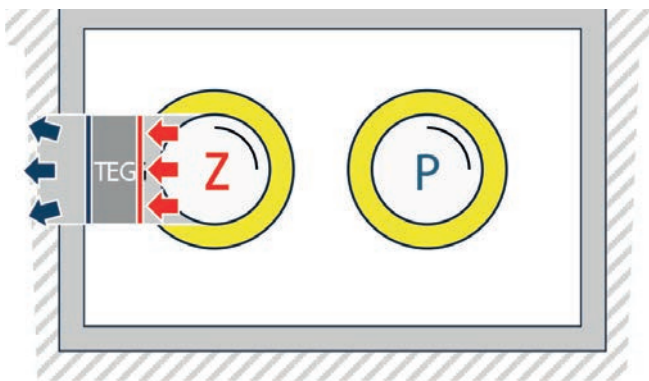


Rys. 7. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Ściana komory ciepłowniczej
Fig. 7. Supply-TEG-Wall configuration. Z – supply pipeline, P – return pipeline

4.7. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Grunt

Otoczającą podziemną komorę ciepłowniczą grunt jest odbiornikiem o wysokim potencjale odbierania ciepła z zimnej okładki ogniwa TEG. Przewodnictwo cieplne gruntu i roczny rozkład temperatury są rozpoznane i opisane w literaturze. Trudnością jest konieczność każdorazowego rozpoznania rodzaju i właściwości gruntu w bezpośrednim sąsiedztwie komory. Innym przewodnictwem cieplnym charakteryzować się będą: niezakłócony grunt rodzimy, grunt o zmienionej strukturze czy obsypka z materiałów sprowadzonych. Wpływ mają również: zagłębienie komory, poziom wód gruntowych, obecność infrastruktury podziemnej i inne czynniki zakłócające.

Oddawanie ciepła sieciowego do gruntu jest stratą energetyczną z punktu widzenia systemu ciepłowniczego, jednak skala tych strat jest niezauważalna w porównaniu do innych eksploatacyjnych strat ciepła. Trudnością jest konieczność wykonania przejścia przez ścianę komory dla układu transmisji ciepła i zapewnienia jego trwałej szczelności.



Rys. 8. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Grunt w komorze ciepłowniczej
Fig. 8. Supply-TEG-Ground configuration. Z – supply pipeline, P – return pipeline

5. Wyniki

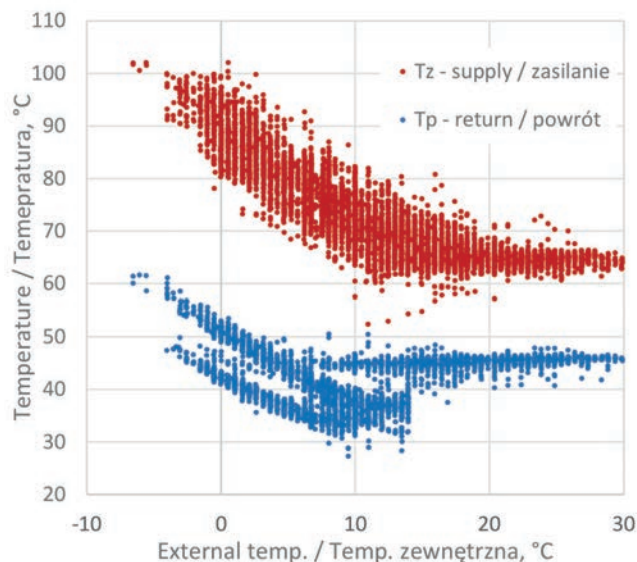
Do analiz wybrano dwie konfiguracje zasilania w ciepło ogniwa TEG w komorze ciepłowniczej: konfigurację Zasilanie-TEG-Powrót oraz konfigurację Zasilanie-TEG-Atmosfera. Dla obu konfiguracji

sporządzono analogiczne zestawienia danych, obliczenia i wykresy ilustrujące najważniejsze wyniki, stosownie do przyjętych wcześniej założeń.

5.1. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Powrót

W konfiguracji Zasilanie-TEG-Powrót bezpośredni wpływ na produkcję energii elektrycznej w TEG ma różnica temperatury między zasilaniem (źródło ciepła) i powrotem (odbiornik ciepła) sieci ciepłowniczej. Ich zmienność w funkcji temperatury zewnętrznej opisana jest teoretycznie krzywą grzewczą (wykresem regulacyjnym) źródła ciepła w systemie ciepłowniczym. W warunkach eksploatacyjnych, obliczeniowe linie temperatury zasilania i powrotu, odzwierciedlające sposób regulacji dostawą ciepła, zmieniają się w chmury punktów (rys. 9). Rozproszenie chmur danych pomiarowych jest odzwierciedleniem opóźnień transportowych, dynamiki odbiorów ciepła oraz zakłóceń w danym punkcie systemu ciepłowniczego. Wpływy te są szczególnie widoczne w temperaturze powrotu sieci ciepłowniczej. W analizowanej grupie danych wyraźnie widoczne są: okres grzewczy, osłabienia nocne u odbiorców oraz letni okres dostawy ciepła, jedynie na potrzeby przygotowywania ciepłej wody użytkowej.

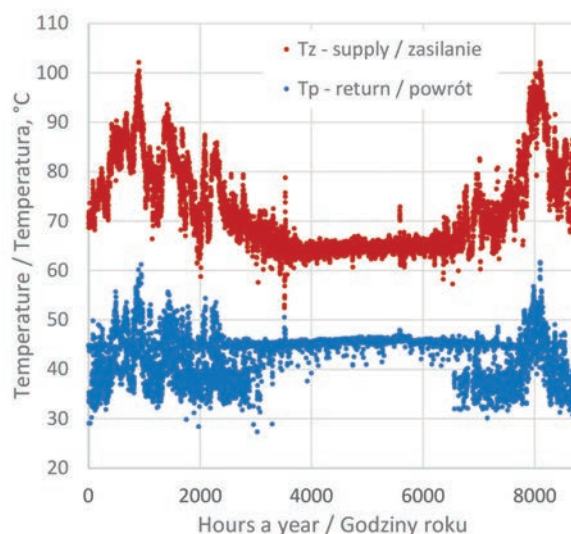
W obrębie chmur danych znajdują się pary temperatura zasilania i temperatura powrotu, których rozbieżność jest w główną siłą napędową TEG. Warunkuje ona ilość lokalnie generowanej w ogniwie energii elektrycznej. Analiza z wykorzystaniem puli rzeczywistych danych jest zawsze pełniejsza niż bazowanie na zależnościach teoretycznych wykresu regulacyjnego. Eksploatacyjna charakterystyka statyczna z analizowanego roku ujawnia główną trudność w projektowaniu układów z TEG: w dynamicznie pracującej sieci ciepłowniczej, przy tych samych temperaturach zewnętrznych, występują różne warunki temperatury zasilania i powrotu. I jest to stan normalny.



Rys. 9. Eksploatacyjna charakterystyka statyczna temperatury źródła i odbiornika ciepła dla TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Powrót

Fig. 9. Temperatures of the heat source (supply pipeline) and heat receiver (return pipeline) in the Supply-TEG-Return configuration

Chronologicznie ustawione pary temperatury zasilanie-powrót tworzą sezonowe ujęcie zmienności potencjału produkcji energii w TEG (rys. 10). Dla każdej godziny roku od stycznia do grudnia 2023 r. widoczna jest zmieniająca się różnica między temperaturą zasilania (źródłem ciepła dla TEG) i powrotu sieci ciepłowniczej (odbiornika ciepła). Tu również widoczne są: okres grzewczy z szczytami temperaturowymi w sieci, osłabienia nocne u odbiorców oraz letni okres dostawy ciepła na potrzeby c.w.u.



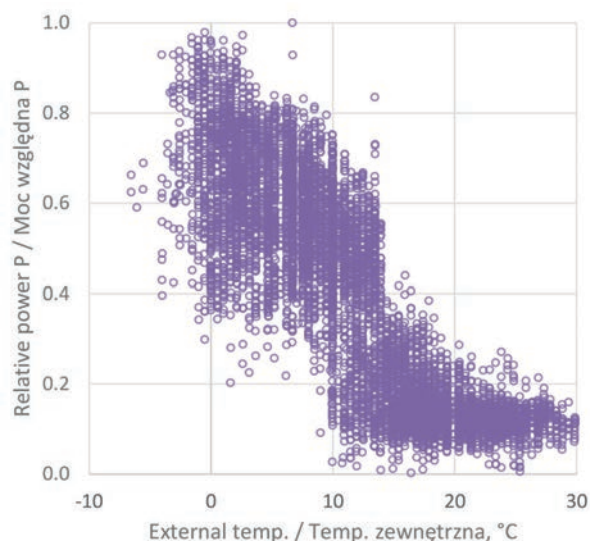
Rys. 10. Sezonowa zmienność temperatury źródła i odbiornika ciepła dla TEG w systemie Zasilanie-TEG-Powrót

Fig. 10. Year-round temperatures of the heat source (supply pipeline) and heat receiver (return pipeline) in the Supply-TEG-Return configuration

Na tej podstawie dla każdej godziny roku, według zależności (1), wyznaczono ilość energii elektrycznej generowanej przez układ TEG w komorze ciepłowniczej. Następnie sporządzono charakterystykę statyczną (rys. 11) oraz sezonową (rys. 12) względnej zmiany mocy elektrycznej generowanej przez układ TEG. Przebiegi te można również nazwać stopniem wykorzystania mocy zainstalowanej ogniw TEG.

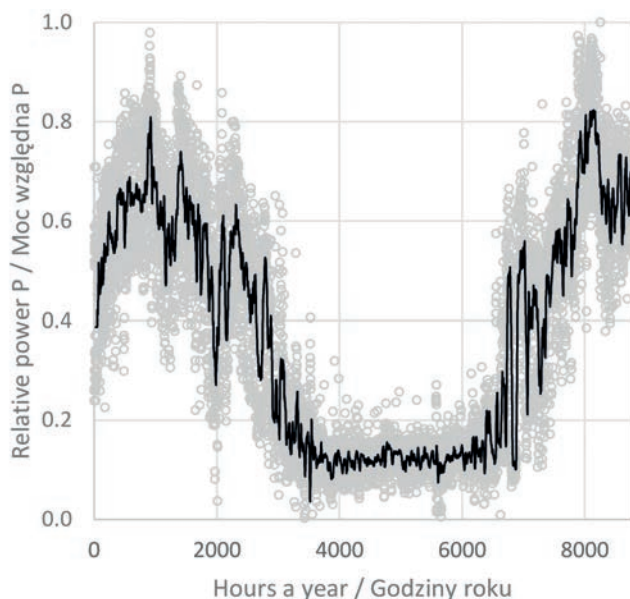
Na obu charakterystykach widoczna jest niekorzystnie duża, z punktu widzenia celu pracy TEG, zmienność lokalnej produkcji energii elektrycznej z ciepła sieciowego. Pionowa rozpiętość chmury punktów charakterystyki statycznej obrazuje wpływ dynamiki pracy oraz zakłóceń w sieci ciepłowniczej i jest ona charakterystyczna dla danego miejsca w sieci ciepłowniczej.

Przebieg charakterystyk jest punktem wyjścia do wymiarowania efektywnej wielkości pakietu ogniw TEG do zasilania urządzeń pomiarowych o określonej mocy. Zależnie od wymagań i przyjętych założeń, charakterystyki te mogą być wzbogacane np. o wartość średnią, sezonową, okresową czy dobową do wymiarowania magazynu energii elektrycznej (linia czarna na rys. 12).



Rys. 11. Charakterystyka statyczna względnej zmiany mocy TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Powrót

Fig. 11. Relative TEG power generation in the Supply-TEG-Return configuration



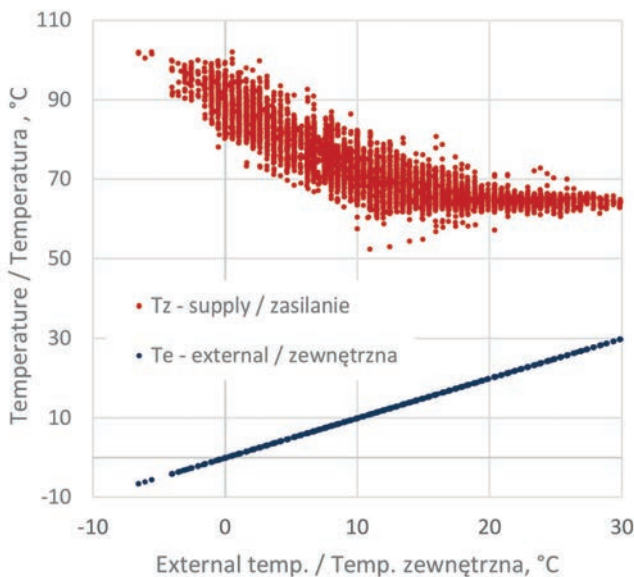
Rys. 12. Sezonowa względna zmiana mocy TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Powrót
 Fig. 12. Year-round relative power generation in the Supply-TEG-Return configuration

5.2. Konfiguracja Zasilanie-TEG-Atmosfera

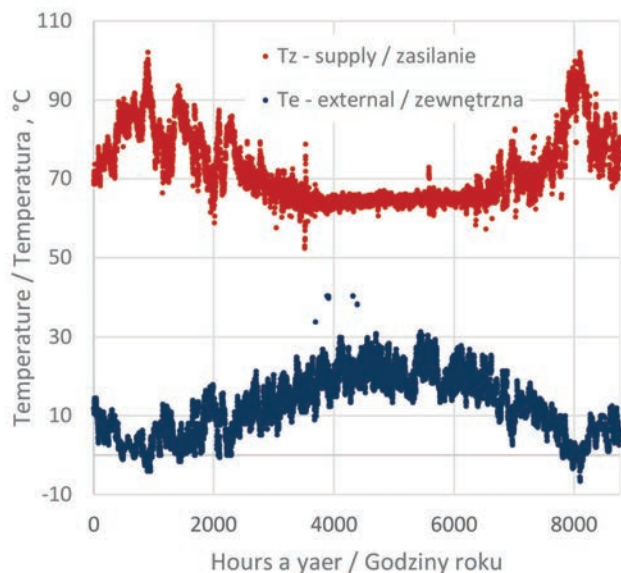
Analogiczne obliczenia i zestawienia wyników wykonano dla konfiguracji Zasilanie-TEG-Atmosfera. Źródłem ciepła podawanego na gorącą okładkę TEG jest zasilanie sieci ciepłowniczej, a odbiornikiem ciepła z zimnej okładki TEG jest powietrze zewnętrzne (powietrze atmosferyczne).

W porównaniu do konfiguracji Zasilanie-TEG-Powrót, sporządzone charakterystyki przedstawiają odmienną, w wielu aspektach korzystniejszą z punktu widzenia celu pracy TEG sytuację. Różnica temperatury między źródłem i odbiornikiem ciepła na eksploatacyjnej charakterystyce statycznej (rys. 13) jest większa i rośnie bardziej dynamicznie. Widoczne jest to również na charakterystyce sezonowej (rys. 14).

Chmura punktów na statycznej charakterystyce względnej mocy (wykorzystania mocy zainstalowanej) jest zdecydowanie węższa (rys. 15). Wskazuje to na teoretycznie stabilniejsze warunki pracy TEG i generowaną moc elektryczną. W charakterystyce sezonowej (rys. 16) nie występuje tak rozległe wypłaszczenie, jak w poprzedniej konfiguracji.

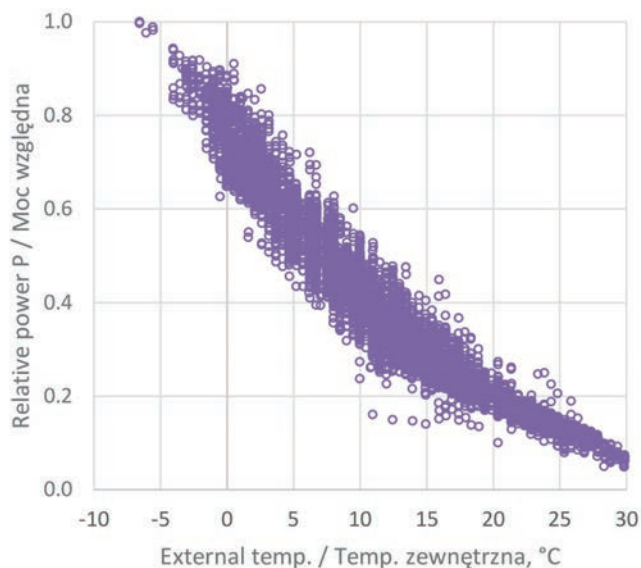


Rys. 13. Eksploatacyjna charakterystyka statyczna temperatury źródła i odbiornika ciepła dla TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Atmosfera
 Fig. 13. Temperatures of the heat source (supply pipeline) and heat receiver (external air) in the Supply-TEG-Atmosphere configuration



Rys. 14. Sezonowa zmienność temperatury źródła i odbiornika ciepła dla TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Atmosfera

Fig. 14. Year-round temperatures of the heat source (supply pipeline) and heat receiver (external air) in the Supply-TEG-Atmosphere configuration



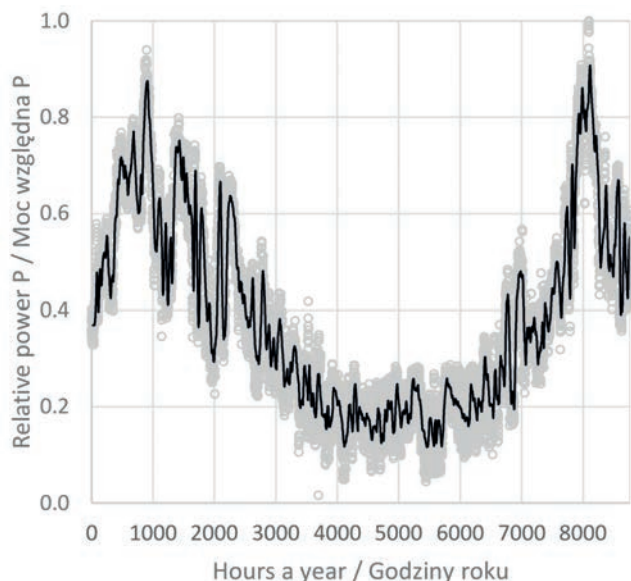
Rys. 15. Charakterystyka statyczna względnej zmiany mocy TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Atmosfera.

Fig. 15. Relative TEG power generation in the Supply-TEG-Atmosphere configuration.

5.3. Porównanie konfiguracji

Już porównanie dwóch powyższych konfiguracji obrazuje różnice w charakterystykach statycznych i sezonowych produkcji energii elektrycznej w TEG. Wskazują też, że podstawą wyboru konfiguracji źródło-TEG-odbiornik dla danej lokalizacji nie powinien być tylko całkowity uzysk energii elektrycznej, lecz również przebieg zmiany dostępności energii w czasie. Należy podkreślić, że na wyniki silnie wpływają lokalne warunki w systemie ciepłowniczym, a przedstawionych w niniejszej pracy wyników nie należy traktować jako uniwersalnych. W systemach ciepłowniczych o innych parametrach, a nawet jedynie w innej lokalizacji tego samego systemu ciepłowniczego, wyniki zastosowania ogniw TEG będą się zmieniać, wpływając na wyniki oceny, porównania i wyboru rozwiązania.

Ze względu na charakterystykę wybranego źródła ciepła dla TEG, w postaci przewodu zasilającego sieci ciepłowniczej, w obu wariantach widoczna jest ogólna, silna zmienność sezonowa chwilowej produkcji

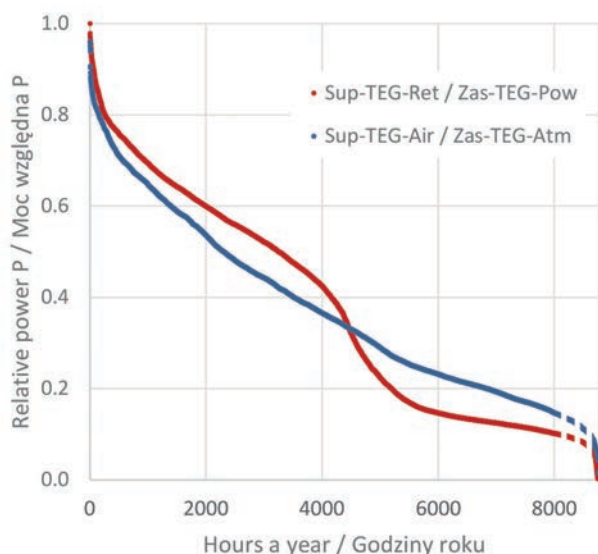


Rys. 16. Sezonowa względna zmiana mocy TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Atmosfera
Fig. 16. Year-round relative power generation in the Supply-TEG-Atmosphere configuration

energii elektrycznej. Inna charakterystyka sezonowych zmian temperatury odbiorników ciepła (przewód powrotny i powietrze atmosferyczne) różnicuje roczne przebiegi i dostępność generowanej mocy elektrycznej.

Różnice te ilustruje porównanie przedstawionej na rys. 17 sezonowej zmienności generowanych mocy elektrycznych z TEG w obu analizowanych konfiguracjach. Dla właściwego porównania zestawiono ze sobą względne charakterystyki zmian mocy, gdzie ilość wyprodukowanej sezonowo energii elektrycznej w obu konfiguracjach jest taka sama. W praktyce możliwe jest to dzięki możliwościom modułowej rozbudowy układów z ogniwami TEG.

Linia czerwona obrazuje uporządkowaną sezonową zmienność generowanej mocy w konfiguracji Zasilanie-TEG-Powrót. Widoczne są: bardzo krótki okres produkcji szczytowej oraz załamanie związane z zakończeniem sezonu grzewczego w systemie ciepłowniczym. Linia niebieska ilustruje zmienność produkcji energii elektrycznej z ciepła sieciowego w konfiguracji Zasilanie-TEG-Atmosfera. Ponownie widoczne są: bardzo krótki szczyt produkcyjny oraz jednostajny przebieg w pozostałej części sezonu, bez niekorzystnego załamania. W obu przypadkach minimalne wartości generowanej mocy obarczone są



Rys. 17. Sezonowa względna zmiana mocy TEG w konfiguracji Zasilanie-TEG-Atmosfera
Fig. 17. Annual relative TEG power in a Power-TEG-Atmosphere configuration

błędami wynikającymi z niedoskonałości danych wejściowych oraz zdarzeniami w eksploatacji sieci (np. awarie czy planowe wyłączenia), które należy zweryfikować i uwzględnić na etapie szczegółowej analizy.

6. Podsumowanie

Zaprezentowana metodologia spełnia wymagania wstępnej analizy możliwości zastosowania ogniw TEG i oceny porównawczej sezonowej zmienności ich pracy, w funkcji parametrów je napędzających, czyli charakterystyki źródła i odbiornika ciepła.

Ważnym czynnikiem jest duża zależność produkcji energii elektrycznej w TEG od strumienia ciepła opisanego różnicą temperatury między źródłem ciepła przekazywanego na okładkę gorącą i odbiornikiem ciepła z okładki zimnej ogniwa TEG. Zmienność tej różnicy temperatury w skali roku kształtuje stopień wykorzystania teoretycznej mocy zainstalowanej ogniw TEG. W konwencjonalnych, wodnych systemach ciepłowniczych, zmienność ta jest bardzo duża. Związana jest ona z charakterystyką realizowanego wykresu regulacyjnego i różnicą temperatury wody sieciowej w warunkach projektowych, w sezonie grzewczym i poza sezonem grzewczym.

W czasie badania dla rzeczywistych komór ciepłowniczych, zauważono bardzo dużą zmienność dostępnych rodzajów odbiorników ciepła od warunków lokalizacji komór. Należy zaznaczyć, że występują ograniczenia nie tylko techniczne, lecz również własnościowe i prawne.

Wykorzystanie danych archiwalnych jest konieczne dla określenia realnie występujących warunków termicznych dla pracy ogniw TEG, w analizowanej komorze ciepłowniczej. Bazowanie jedynie na charakterystykach teoretycznych, np. jedynie na wykresie regulacyjnym i typowym roku meteorologicznym, będzie powodowało otrzymanie wyników odbiegających od tych występujących w czasie eksploatacji.

Duża zmienność warunków termicznych, a tym samym lokalnej produkcji energii elektrycznej w układach TEG, wymaga zastosowania rozwiązań łagodzących szczyty i deficyty. Poza właściwym wyborem pary źródło-odbiornik ciepła dla TEG, możliwe jest zastosowanie rozwiązań obejmujących kaskadową pracę pakietów ogniw TEG, czasowe magazynowanie energii czy stosowanie układów hybrydowych z innymi technologiami. Uzyskane w ramach proponowanej metodologii charakterystyki mogą stanowić podstawę wymiarowania magazynów energii oraz elementów układów hybrydowych, co będzie przedmiotem dalszych badań.

Analiza potwierdza możliwość zastosowania ogniw TEG do lokalnego generowania energii elektrycznej w niskotemperaturowych systemach ciepłych. Ogniwa TEG mają wiele zalet, a ich właściwości umożliwiają dopasowanie parametrów generowanej energii elektrycznej do wymagań zasilania układów monitoringu. Jako urządzenia cyfrowe mogą wykorzystywać prąd stały wprost z pakietu ogniw termogeneratorów, których odpowiednia ilość oraz sposób połączenia zapewni wymagane parametry zasilania.

LITERATURA

- [1] Champier Daniel. 2017. „Thermoelectric generators: A review of applications” *Energy conversion and management* (140): 167-181. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>).
- [2] Jaziri Nesrine, et al. 2020. „A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications”. *Energy Reports* (6): 264-287. (<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.011>).
- [3] Rohit Gurudutt Gurudutt, et al. 2017. „Performance study of thermo-electric generator”. Materiały konferencyjne AIP Conference Proceedings 1859. (https://www.researchgate.net/publication/318578753_Performance_study_of_thermo-electric_generator).
- [4] Sidorczyk Marek, Piotr Jadwiszczak. 2018. „Wykorzystanie generatorów termoelektrycznych do lokalnego wytwarzania energii pomocniczej w systemach ciepłych”. *Rynek Instalacyjny* (7-8): 59-64.
- [5] Sidorczyk Marek. 2016. „Wykorzystanie ciepła do lokalnego wytwarzania energii pomocniczej dla systemów ciepłych”. Rozprawa doktorska, Wrocław: Politechnika Wroclawska.
- [6] Tohidi Farzad, Shahriyar Ghazanfari Holagh and Ata Chitsaz. 2021. „Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications”. *Applied Thermal Engineering* 201 Part A: 117793. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117793>).