

Analiza termodynamiczna układu trigeneracyjnego

Przemysław Krochmal*

Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska
e-mail: przemyslawkrochmal@gmail.com

Słowa kluczowe: silnik tłokowy gazowy, układ trigeneracyjny, zapotrzebowanie na nośniki energii, analiza termodynamiczna

Streszczenie

W poniższej pracy wykonano analizę pracy układu trigeneracyjnego, którego działanie napędzane jest przez gazowy silnik tłokowy. Paliwem doprowadzonym do silnika jest gaz o określonej wartości opałowej. Zaproponowany system produkuje energię elektryczną dodatkowo pobierane jest ciepło z chłodzenia silnika oraz spalin wylotowych, które następnie zamieniane jest na ciepło grzejne oraz chłód o określonych parametrach. Analizowane są różne scenariusze pracy układu tak, aby spełnić określone zapotrzebowanie na energię elektryczną, ciepło grzejne oraz chłód. Scenariusze różnią się priorytetami wytwarzania nośników energii. Pierwsza koncepcja pokrycia zapotrzebowania podzielona została na dwa scenariusze jednakże priorytetem produkcji układu według tej koncepcji jest energia elektryczna. Drugi ze scenariuszy zakłada nadrzędność zaspokojenia zapotrzebowania u odbiorcy na ciepło grzejne oraz chłód. Każda z koncepcji posiada wady i zalety. Ostateczna decyzja, według którego scenariusza powinien pracować układ zależy od indywidualnego podejścia i powinna zostać rozszerzona o specjalistyczną analizę techniczną oraz ekonomiczną. W pracy ukazano również przewagę termodynamiczną układu trigeneracyjnego nad układem kogeneracyjnym.

* Rozdział przygotowano podczas pracy nad projektem inżynierskim wykonywanym przez autora w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pod opieką Dra hab. inż. Wiesława Gazdy.

1 Cel i zakres

W niniejszym opracowaniu, jako cel sformułowano przeprowadzenie analizy termodynamicznej efektów działania układu trigeneracyjnego wyposażonego w gazowy silnik tłokowy oraz adsorpcyjną chłodziarkę odpowiednio do produkcji nośników energii w postaci energii elektrycznej, ciepła grzewczego oraz chłodu. W zakresie analizy przeprowadzono obliczenia z uwzględnieniem scenariuszy działania układu w zależności od profili zapotrzebowania na nośniki energii u odbiorcy końcowego.

2 Wprowadzenie

Nie tylko Europa, ale też i cały świat próbuje znaleźć rozwiązanie jednego z głównych problemów XXI wieku, jakim jest globalne ocieplenie oraz kurczące się zasoby naturalne Ziemi. Ośrodki naukowe na całym świecie prowadzą badania nad opracowaniem najskuteczniejszych metod ograniczania skutków zmieniającego się klimatu oraz ograniczenie wydobycia surowców. Jedną z możliwości zmniejszenia globalnego zużycia energii pierwotnej oraz odpowiadającej jej emisji gazów cieplarnianych jest zastosowanie systemów, które mogą produkować równocześnie więcej niż jeden nośnik energii. Zarówno w sektorze przemysłowym, jak i mieszkaniowym są obiekty, w których symultanicznie istnieje zapotrzebowanie na więcej niż jeden nośnik energii. W takich przypadkach preferowane jest zastosowanie systemów do skojarzonej produkcji nośników energii. Typowe rozwiązanie dla połączonej produkcji nośników energii to elektrociepłownie, wytwarzające energię elektryczną i ciepło w tym samym procesie. Skojarzona produkcja energii elektrycznej oraz ciepła są gwarantem zmniejszenia zużycia energii chemicznej w gospodarce. Oszczędności te widoczne są nie tylko w obiektach wytwarzania tych nośników energii zysk dla gospodarki zauważalny jest też w systemach transportowych oraz miejscach wydobycia surowców [1]. Jeżeli dodatkowo odbiorca wykazuje zapotrzebowanie na kolejny nośnik energii, jakim jest chłód to możliwe jest zastosowanie układów trigeneracyjnych (CCHP-Combined Cooling, Heat and Power) [2].

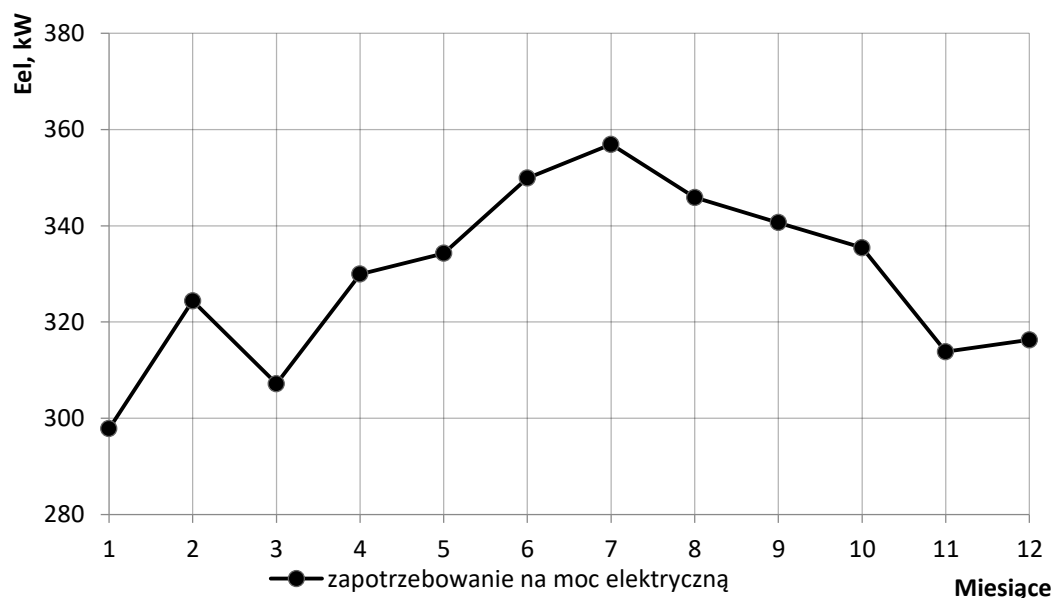
Technologie grzewcze i energetyczne są dojrzałe zarówno technologicznie i handlowo. Łatwo dostępne są silniki tłokowe jak i turbiny gazowe, podczas gdy inne rozwiązania wciąż znajdują się w fazie badań i na etapie rozwoju np. jednostki oparte na silniku Stirling, organiczne systemy oparte na cyklu Rankine'a i jednostki napędzane ogniwami paliwowymi [3]. W literaturze przedstawiono wiele badań różnych aspektów związanych z spalaniem wewnętrznym silników lub turbin gazowych, które są głównie stosowane do napędzania układów trigeneracyjnych. Na przykład symulacja wydajności systemu CCHP z silnikiem spalinowym, w którym paliwem jest gaz ziemny [4] lub biogaz [5]. Na całym świecie istnieje wiele instalacji potrafiących jednocześnie produkować energię elektryczną, ciepło grzejne oraz chłód. Ten trend powoli znajduje swoich odbiorców na rynku krajowym. W Polsce uruchomiono w przeciągu kilku ostatnich lat parę takich instalacji np. we Wrocławiu [6] oraz w Katowicach [7].

2.1 Zapotrzebowanie na nośniki energii

Ludzkość od początku istnienia zwiększa swoje potrzeby, chcemy żyć lepiej i wygodniej. Aby to osiągnąć udoskonalamy elementy otaczającego nas świata. Jednakże te zmiany powodują zwiększanie zapotrzebowania na energię, która jest nam niezbędna do zapewnienia wzrastających potrzeb rozwoju społeczeństw. Zaspokojenie rosnącego zapotrzebowania na nośniki energii takie jak energia elektryczna, ciepło grzejne oraz chłód jest, więc priorytetem dla rozwijającego się świata.

Popyt na energię elektryczną, ciepło grzejne oraz chłód u odbiorcy końcowego składa się z wielu ich potrzeb składowych pozwalających na określenie profilu zapotrzebowania na poszczególne nośniki energii. Dzięki profilowi zapotrzebowania na nośniki energii możliwe jest dobranie odpowiednich urządzeń oraz ich specyfikacji.

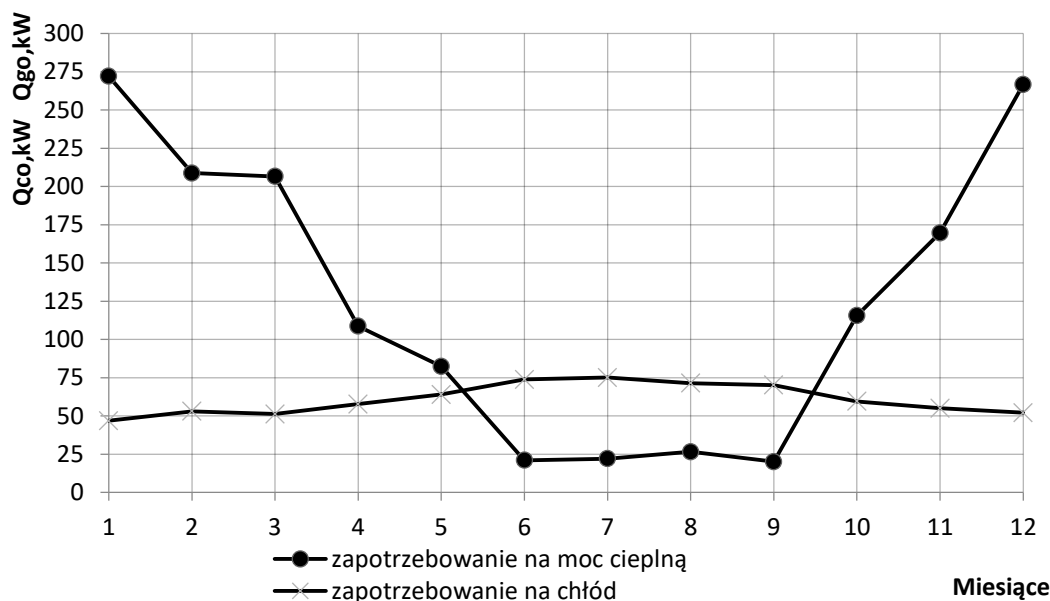
Na rys.1 przedstawiono profil średniomiesięcznego zapotrzebowania na energię elektryczną u odbiorcy końcowego w ciągu roku.



Rys. 1 Zapotrzebowanie na moc elektryczną.

Popyt na energię elektryczną u odbiorcy w ciągu dwunastu miesięcy jest zmienny. W miesiącach zimowy jest on mniejsze. Natomiast wzrost energii elektrycznej widoczny jest w miesiącach od czerwca do września, co może być spowodowane zwiększającą się w tym okresie średnią dobową temperaturą a co za tym idzie m.in. wzrostem poboru energii elektrycznej na potrzeby urządzeń przeznaczonych do wentylacji i klimatyzacji.

Na rys.2 przedstawiono profil średniomiesięcznego zapotrzebowania na ciepło grzewcze oraz chłód u odbiorcy końcowego w ciągu roku.



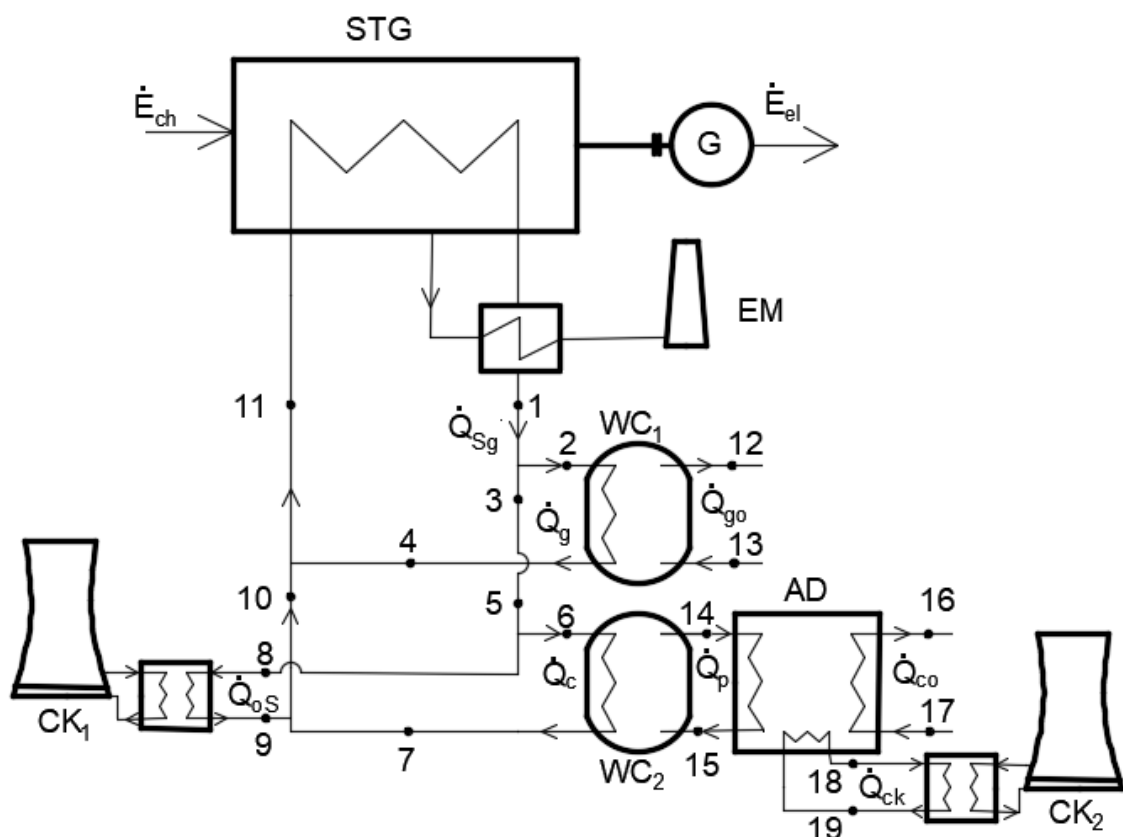
Rys. 2 Zapotrzebowanie na moc cieplną oraz chłód.

Zapotrzebowanie na ciepło grzejne u odbiorcy jest wynikiem potrzebnego do zasilania instalacji centralnego ogrzewania oraz do podgrzania ciepłej wody użytkowej. Największe wartości osiąga w miesiącach zimowych, co jest związane ze znacznym spadkiem średniej dobowej temperatury. Natomiast popyt na chłód w ciągu całego roku plasuje się na podobnym poziomie, przy czym można zauważyć wzrost zapotrzebowania w okresie letnim.

2.2 Schemat układu

Do zabezpieczenia zapotrzebowania u odbiorcy końcowego na nośniki energii takie jak chłód, ciepło grzewcze oraz energia elektryczna proponuje się zastosowanie układu trigeneracyjnego, który jednocześnie umożliwi produkcję trzech różnych nośników energii. Tak, aby w maksymalny sposób wykorzystać gazowy silnik tłokowy, którego parametry nominalne zostały podane poniżej (w punkcie 2.3 Założenia).

Rys. 3 przedstawia ogólny schemat układu, który został zaproponowany [8], aby pokryć profile zapotrzebowania u odbiorcy końcowego.



Rys.3 Schemat zaproponowanego układu trigeneracyjnego.

Podstawowymi elementami układu są:

- silnik tłokowy gazowy (STG),
- dwa wymienniki ciepła (WC_1 , WC_2)
- generator energii elektrycznej (G),
- chłodziarka adsorpcyjna (AD),
- dwie chłodnie kominowe (CK_1 , CK_2),
- zespół rurociągów z oznaczeniami liczbowymi w charakterystycznych punktach układu (1-19),
- komin/emiter (EM).

2.3 Założenia

Podstawową analizę wykonano w oparciu o ilość i jakość nośników energii u odbiorcy oraz z uwzględnieniem danych gazowego silnika tłokowego o nominalnej mocy elektrycznej $\dot{E}_{el}=325$ kW i mocy cieplnej $\dot{Q}_{go}=200$ kW dla parametrów wody grzewczej uzyskiwanej z chłodzenia elementów silnika odpowiednio 90/70°C oraz chłodniczego urządzenia adsorpcyjnego o współczynniku efektywności chłodniczej $COP=0,7$ i mocy chłodniczej $\dot{Q}_{co}=166$ kW. Sprawność generatora elektrycznego przyjęto na poziomie 95%. Analizowany układ trigeneracyjny zasilany jest paliwem gazowym o wartości opałowej 35 MJ/kg. Sprawność wymienników ciepła przyjęto na poziomie 98%.

Podstawowe założenia odnośnie wymaganych poziomów temperatury nośników energii były następujące:

- temperatura na wejściu/wyjściu z sieci ciepłowniczej 88/63 °C (punkty 12/13) w okresie letnim jest możliwość regulowania temperatury jednakże różnica między nimi musi zostać zachowana na poziomie 25°C,
- temperatura na wejściu/wyjściu z sieci chłodniczej 7/12 °C (punkty 16/17),
- różnica temperatury w punktach 14/15 wynosi 10 °C,
- wartość temperatury w punktach 18/19 odpowiednio wynosi 28/33 °C.

3 Metodyka obliczeń

3.1 Równania bilansów energii elementów układu

Strumień energii chemicznej paliwa otrzymano z zależności:

$$\dot{E}_{ch} = \dot{P} \cdot Wd \quad (1)$$

gdzie:

\dot{E}_{ch} - strumień energii chemicznej paliwa; kW,

\dot{P} - strumień paliwa; kg/s,

Wd - wartość opałowa paliwa; kJ/kg.

Strumień energii elektrycznej otrzymano z zależności:

$$\dot{E}_{el} = \dot{E}_{ch} \cdot \eta_{Sel} \cdot \eta_G \quad (2)$$

gdzie:

\dot{E}_{el} - strumień energii elektrycznej; kW,

η_{Sel} - sprawność elektryczna silnika tłokowego gazowego; -,

η_G - sprawność generatora energii elektrycznej; -.

Strumień ciepła z ochłodzenia silnika oraz spalin otrzymano z zależności:

$$\dot{Q}_{St} = \dot{E}_{ch} \cdot \eta_{St} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_{11}) \quad (3)$$

gdzie:

\dot{Q}_{St} - strumień ciepła dostarczany do układu z ochłodzenia silnika oraz spalin; kW,

η_{St} - sprawność termiczna silnika tłokowego gazowego; -,

\dot{m}_1 - strumień wody w punkcie 1; kg/s,

h_1, h_{11} - entalpie wody w punktach 1, 12; kJ/kg.

Strumienie ciepła na cele grzewcze oraz chłodnicze otrzymano z zależności:

$$\dot{Q}_{St} = \dot{Q}_g + \dot{Q}_c \quad (4)$$

gdzie:

\dot{Q}_g - strumień ciepła dostarczany do wymiennika ciepła (WC₁); kW,

\dot{Q}_c - strumień ciepła dostarczany do wymiennika ciepła (WC₂); kW.

Bilans energii wymiennika ciepła na cele grzewcze(WC₁):

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_2 \cdot (h_2 - h_4) \quad (5)$$

gdzie:

\dot{m}_2 - strumień wody w punkcie 2; kg/s,

h_2, h_{14} - entalpie wody w punktach 2, 14; kJ/kg.

Bilans substancji rozdzielacza przed wymiennikiem ciepła na cele grzewcze(WC₁):

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (6)$$

gdzie:

\dot{m}_3 - strumień wody w punkcie 3; kg/s.

Strumień ciepła na cele grzewcze u odbiorcy otrzymano z zależności:

$$\dot{Q}_{go} = \dot{Q}_g \cdot \eta_{WC} \quad (7)$$

gdzie:

\dot{Q}_{go} - strumień ciepła dostarczany do sieci ciepłowniczej; kW,

η_{WC} - sprawność wymienników ciepła (WC₁, WC₂); -.

Bilans energii sieci ciepłowniczej:

$$\dot{Q}_{go} = \dot{m}_{12} \cdot (h_{12} - h_{13}) \quad (8)$$

gdzie:

\dot{m}_{12} - strumień wody w punkcie 12; kg/s,

h_{12}, h_{13} - entalpie wody w punktach 12, 13; kJ/kg.

Bilans energii wymiennika ciepła na cele chłodnicze (WC₂):

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_7) \quad (9)$$

gdzie:

\dot{m}_6 - strumień wody w punkcie 12; kg/s,

h_6, h_7 - entalpie wody w punktach 6, 7; kJ/kg.

Bilans substancji rozdzielacza przed wymiennikiem ciepła na cele chłodnicze(WC₂):

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_8 \quad (10)$$

gdzie:

\dot{m}_5, \dot{m}_6 - strumienie wody w punktach 6, 8; kg/s.

Strumień ciepła na cele chłodnicze kierowany do adsorpcyjnego urządzenia chłodniczego otrzymano z zależności:

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_c \cdot \eta_{WC} \quad (11)$$

gdzie:

\dot{Q}_p - strumień ciepła dostarczany do chłodniczego urządzenia adsorpcyjnego (AD); kW.

Bilans energii adsorpcyjnego urządzenia chłodniczego(AD):

$$\dot{Q}_p = \dot{m}_{14} \cdot (h_{14} - h_{15}) \quad (12)$$

gdzie:

\dot{m}_{14} - strumień wody w punkcie 14; kg/s,

h_{14}, h_{15} - entalpie wody w punktach 14, 15; kJ/kg.

Współczynnik efektywności chłodniczej wynika z zależności:

$$COP = \frac{\dot{Q}_{co}}{\dot{Q}_p} \quad (13)$$

gdzie:

COP - współczynnik efektywności chłodniczej; -,

\dot{Q}_{co} - strumień ciepła dostarczany do sieci chłodniczej; kW.

Strumień ciepła do chłodni kominowej(CK₂) otrzymano z zależności:

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{co} + \dot{Q}_{ck} \quad (14)$$

gdzie:

\dot{Q}_{ck} - strumień ciepła dostarczany do chłodni kominowej (CK₂); kW.

Bilans energii sieci chłodniczej:

$$\dot{Q}_{co} = \dot{m}_{16} \cdot (h_{17} - h_{16}) \quad (15)$$

gdzie:

\dot{m}_{16} - strumień wody w punkcie 16; kg/s,

h_{16}, h_{17} - entalpie wody w punktach 16, 17; kJ/kg.

Bilans energii chłodni kominowej(CK₂):

$$\dot{Q}_{oc} = \dot{m}_{18} \cdot (h_{18} - h_{19}) \quad (16)$$

gdzie:

\dot{m}_{18} - strumień wody w punkcie 18; kg/s,

h_{18}, h_{19} - entalpie wody w punktach 18, 19; kJ/kg.

Bilans energii chłodni kominowej(CK₁):

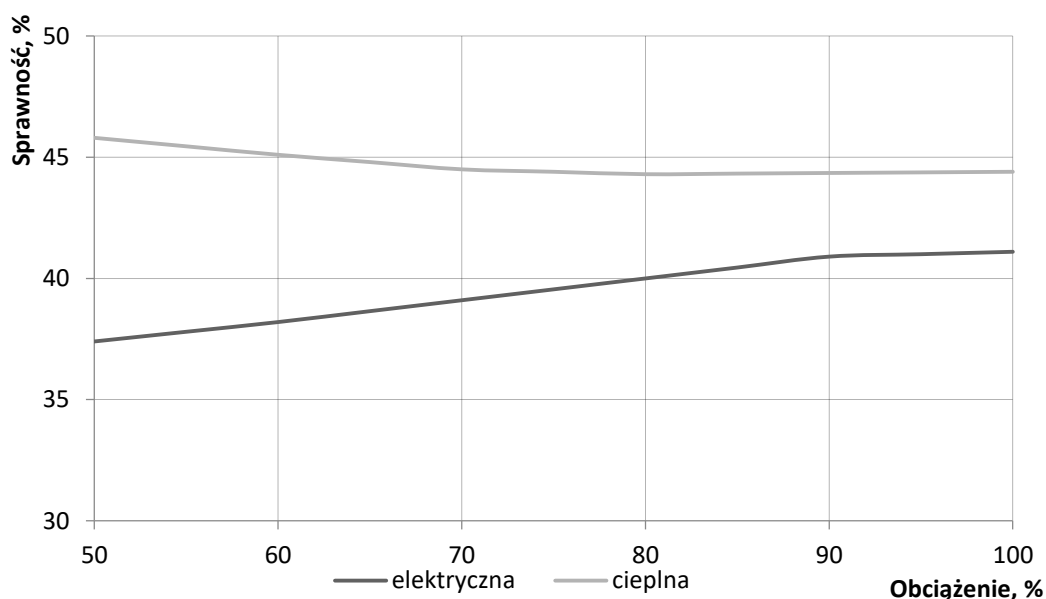
$$\dot{Q}_{oS} = \dot{m}_8 \cdot (h_8 - h_9) \quad (17)$$

gdzie:

\dot{m}_8 - strumień wody w punkcie 8; kg/s,

h_8, h_9 - entalpie wody w punktach 8, 9; kJ/kg.

W zaproponowany rozwiązaniu silnik gazowy działa według przedstawionej na rys.4 charakterystyki zmian jego sprawności elektrycznej η_{Sel} oraz sprawności termicznej (cieplnej) η_{St} w zależności od zmian stopnia jego obciążenia.



Rys. 4 Efektywność energetyczna silnika tłokowego gazowego w zależności od stopnia jego obciążenia.

3.2 Scenariusze priorytetów działań

W analizach działań koncepcji omawianego układu przyjęto kilka rozwiązań pokrycia zadanego zapotrzebowania na nośniki energii. Jeden ze scenariuszy stawia produkcję energii elektrycznej na pierwszym miejscu. Ten scenariusz został podzielony na dwa oddzielne rozwiązania (A, B), które w odmienny sposób podchodzą do realizacji zadanego zapotrzebowania na energię elektryczną, pokrycie zapotrzebowania na ciepło grzewcze oraz chłód jest realizowane w następstwie dostępnej ilości ciepła, jaka przypada na wytworzenie danej ilości energii elektrycznej.

Drugi ze scenariuszy działania analizowanego układu, zakłada, że priorytetem jest produkcja ciepła na potrzeby grzewcze oraz wytworzenie odpowiedniej ilości chłodu, natomiast ilość wyprodukowanej energii elektrycznej jest związana z pracą silnika przy takich założeniach.

3.2.1 Priorytet wytwarzania energii elektrycznej

W analizach działania rozważanego układu według tego priorytetu parametry silnika są tak dobierane, aby wytworzyć ilość energii elektrycznej, która pozwoliłaby pokryć zadane zapotrzebowanie. W zależności od profilu zapotrzebowania może pojawić się niedobór lub nadmiar produkcji energii elektrycznej. Wygenerowane podczas tego procesu ciepło pobierane z silnika wykorzystywane jest do pokrycia wymaganego zapotrzebowania dla ciepła grzewczego oraz chłodu. Niemniej jednak nie pokrycie zapotrzebowania na te nośniki nie wymusza zmiany parametrów pracy silnika.

Rozwiązanie A, dla którego priorytetem jest wytwarzanie energii elektrycznej przy stałych nominalnych parametrach pracy silnika. W czasie tego scenariusza silnik przez cały rok pracuje z maksymalną mocą elektryczną- w tej konfiguracji możliwe jest wyprodukowanie nadmiernej ilości energii elektrycznej.

Rozwiązanie B, dla którego priorytetem jest wytwarzanie energii elektrycznej przy dopasowaniu parametrów pracy silnika do zadanego zapotrzebowania na energię elektryczną. W tej idei niemożliwe jest wyprodukowanie nadmiarowej ilości energii elektrycznej.

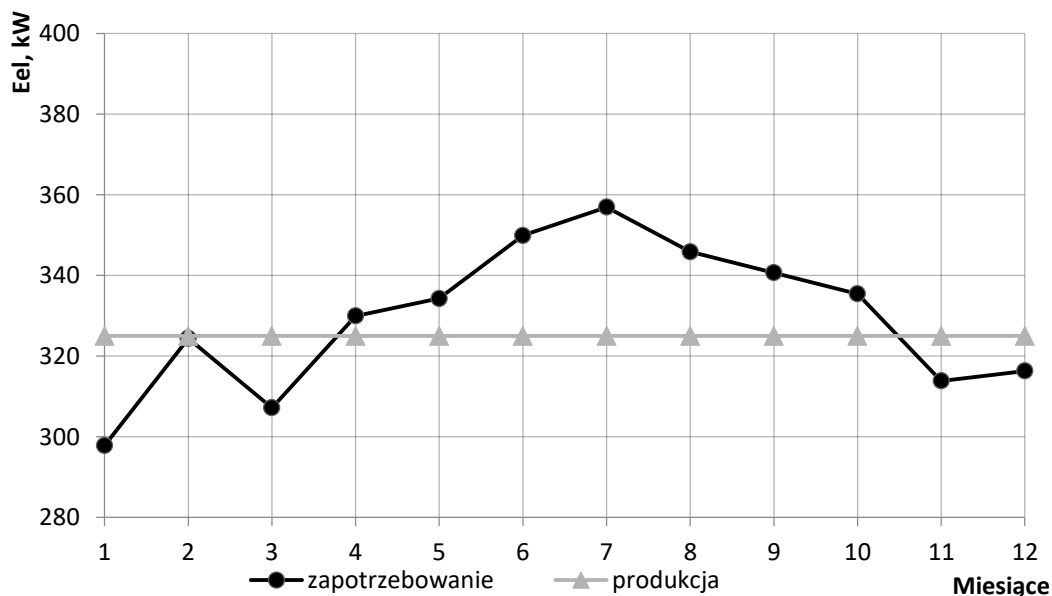
3.2.2 Priorytet wytwarzania ciepła grzejnego oraz chłodu

W czasie badań działań układu według tej koncepcji parametry pracy silnika są tak dobrane, aby zapotrzebowanie na ciepło grzejne, chłód u odbiorcy były w całości pokryte przez analizowany układ. Natomiast produkcja energii elektrycznej była wynikiem pracy silnika, którego działanie nakierowane jest na wytwarzanie wyżej wymienionych nośników energii. Podczas działania układu energetycznego według tej zasady możliwe jest wystąpienie niedoboru ilości produkowanej energii elektrycznej, który należy uzupełnić z systemu elektroenergetycznego. Jednocześnie w tym wariantcie zmniejszana jest ilość ciepła, które zostaje skierowane do chłodni kominowej oraz następnie wyprowadzona do otoczenia. Powoduje to oszczędność paliwa do napędu silnika.

4 Wyniki analizy

4.1 Priorytet wytwarzania energii elektrycznej

Rys. 5 przedstawia wyniki analizy produkcji energii elektrycznej z silnika według rozwiązania A dla priorytetowego wytwarzania energii elektrycznej i wykres zapotrzebowania na dany nośnik energii.

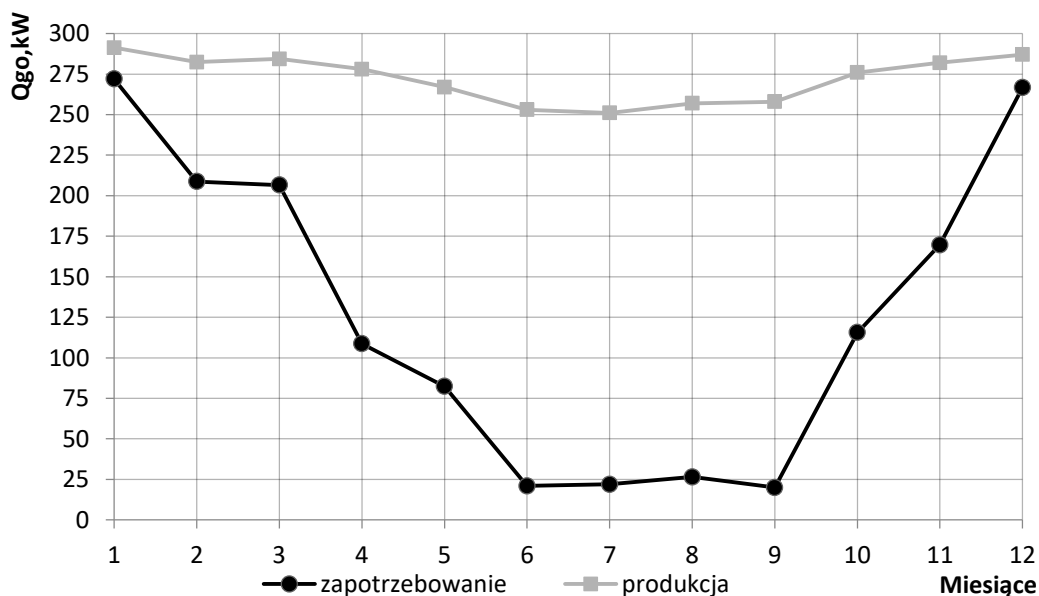


Rys.5 Charakterystyka zapotrzebowania oraz produkcji mocy elektrycznej z silnika przez rok rozwiązanie A.

Na podstawie charakterystyki powyżej można odczytać, że w czterech miesiącach (1, 3, 11, 12) zapotrzebowanie na energię elektryczną jest mniejsze od produkcji, co pozwala na jej sprzedaż do sieci. Natomiast we wszystkich innych miesiącach oprócz lutego, (w którym zapotrzebowanie jest równe produkcji) braki tego nośnika trzeba uzupełnić energią elektryczną z sieci. Brak możliwości wyprodukowania większych ilości tego nośnika energii spowodowana jest ograniczeniami układu. Silnik tłokowy gazowy nie może pracować długotrwale z parametrami przekraczającymi parametry nominalne. Taka praca wiązałaby się z uszkodzeniem jednostki napędowej.

W czasie analizy pracy analizowanego układu według rozwiązania A zapotrzebowanie na ciepło grzewcze oraz chłód jest całkowicie pokryte.

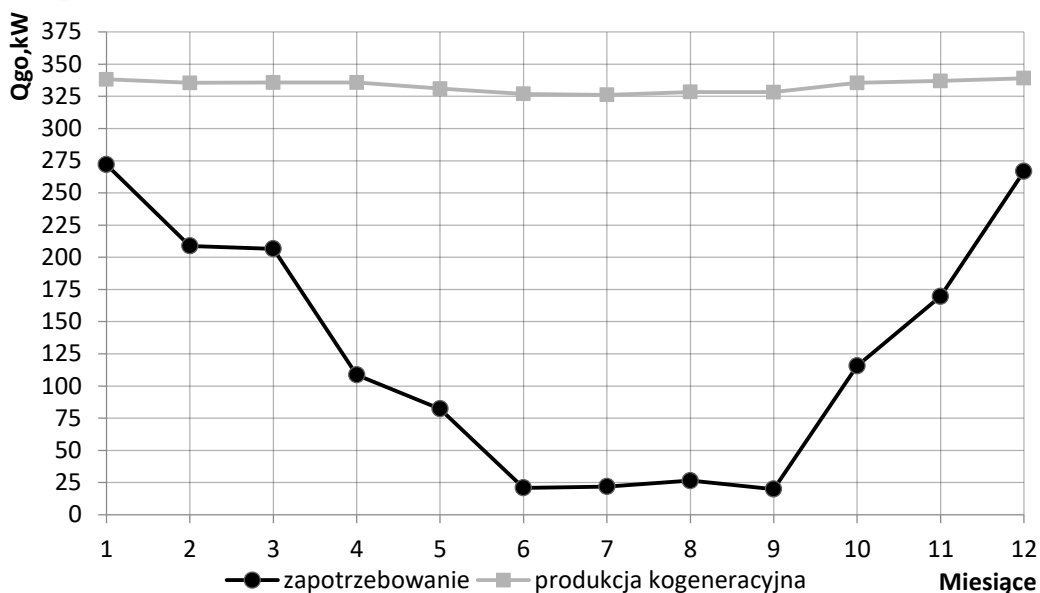
Rys. 6 ukazuje wyniki produkcji ciepła grzejnego przez analizowany silnik dla priorytetowego wytwarzania energii elektrycznej według rozwiązania A oraz woluminy zapotrzebowania.



Rys. 6 Charakterystyka zapotrzebowania ciepła grzejnego oraz produkcji z silnika przez rok rozwiązanie A.

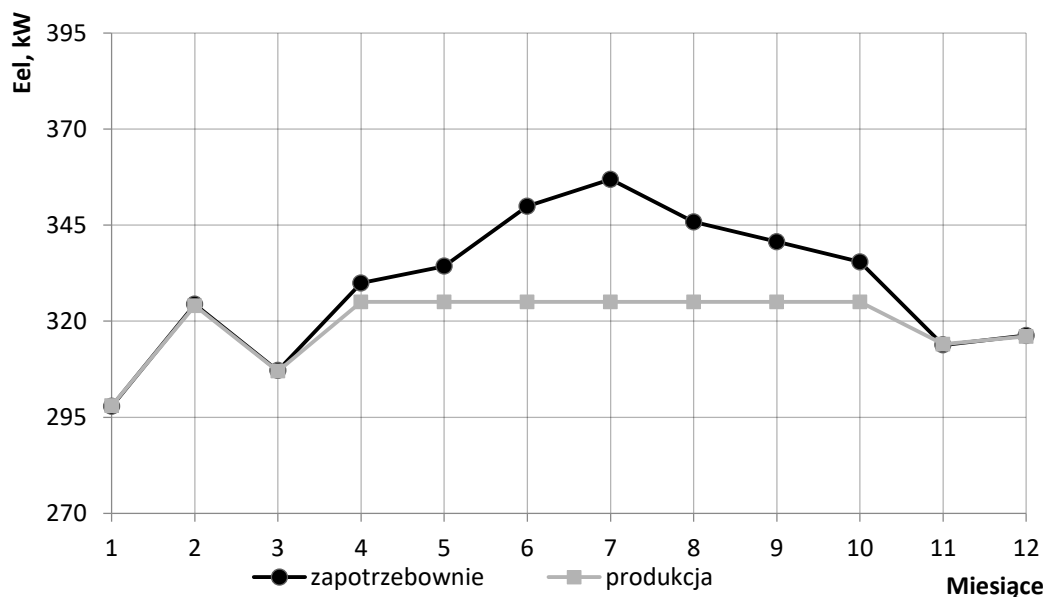
Nadmiar ciepła, który pojawia się w układzie przez cały rok (różnica pomiędzy zapotrzebowaniem a produkcją) należy skierować do chłodni kominowej. W czasie działania układu z takimi parametrami pracy możliwe jest oszacowanie ewentualnego zwiększenia zapotrzebowania na ciepło grzejne oraz na chłód w trakcie całego roku.

Na rys. 7 pokazano wzrost ilości ciepła, które należy skierować do chłodni kominowej, jeżeli układ trigeneracyjny został zastąpiony układem kogeneracyjnym tzn. bez produkcji chłodu. Parametry pracy systemu są takie same jak dla rozwiązania A.



Rys. 7 Charakterystyka zapotrzebowania ciepła grzejnego oraz produkcji silnika w układzie kogeneracyjnym przez rok rozwiązanie A.

Ponadto na rys. 7 można zauważyć jak znaczący wpływ na prace układu ma produkcja jednego nośnika energii na drugi. Ewidentny wzrost rozejścia się linii zapotrzebowania oraz linii produkcji powoduje zwiększenie ilości ciepła, które należy skierować do chłodni kominowej. A co za tym idzie wzrost kosztów pracy systemu. Całkowite pokrycie zapotrzebowania na chłód w dużym stopniu wpływa na poprawę efektywności całego układu. Rozwiązanie B, w którym parametry silnika są dopasowane do zapotrzebowania. Rys. 8 przedstawia wyniki analizy produkcji energii elektrycznej silnika według rozwiązania B dla priorytetowego wytwarzania energii elektrycznej oraz charakterystykę zapotrzebowania.

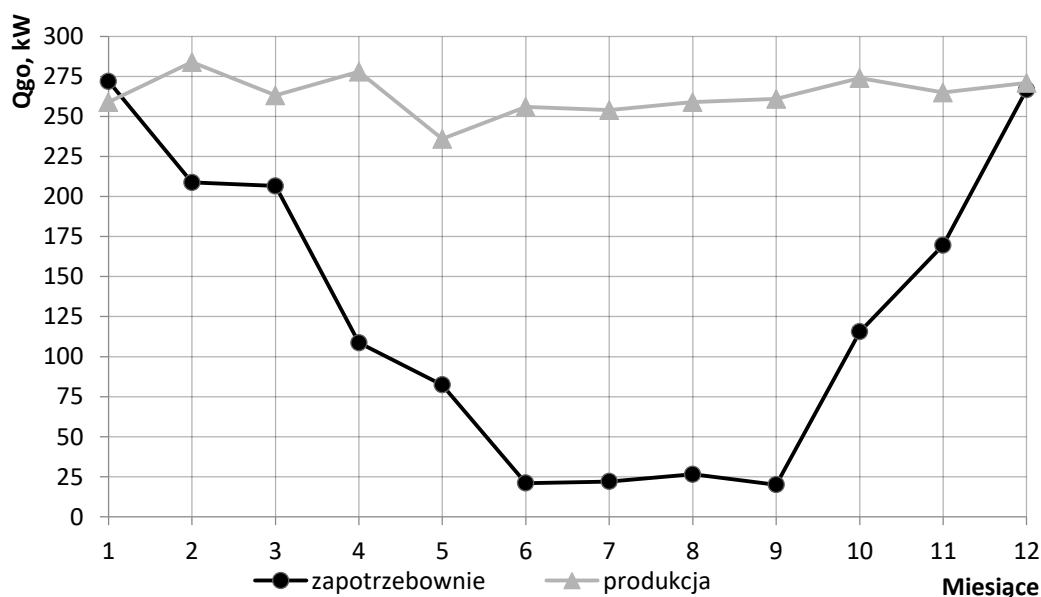


Rys.8 Charakterystyka zapotrzebowania oraz produkcji mocy elektrycznej z silnika przez rok rozwiązanie B.

Z charakterystyki (Rys. 8) da się wywnioskować, iż silnik produkuje wystarczającą ilość energii tylko w trzech pierwszych miesiącach oraz w dwóch ostatnich a przez resztę roku należy tak jak w rozwiązaniu A uzupełnić brakującą liczbę energii elektrycznej z sieci. Jednakże warto zauważyć, że nieprodukowany jest żaden nadmiar tego nośnika energii, co w pewnych warunkach może być atutem tego rozwiązania.

W okresie badania pracy silnika według rozwiązania B zapotrzebowanie na chłód jest całkowicie pokryte.

Na rys. 9 ukazano charakterystykę zapotrzebowania oraz wyniki produkcji ciepła grzejnego przez analizowany silnik dla priorytetowego wytwarzania energii elektrycznej według wariantu B.



Rys. 9 Charakterystyka zapotrzebowania ciepła grzejnego oraz produkcji silnika przez rok rozwiązanie B.

Na podstawie charakterystyki obciążenia ciepła grzejnego oraz pracy silnika można zauważyć, iż zaproponowane rozwiązanie pokrywa z znacznym nadmiarem zapotrzebowanie na ciepło grzejne przez dziesięć miesięcy. Jedyne w styczniu popyt jest większy od produkcją, natomiast w grudniu zapotrzebowanie jest równe produkcji. Gdyby wystąpiła konieczność zwiększenia zapotrzebowania w miesiącu grudniu to niedomiar ciepła należałoby uzupełnić z zewnętrznych źródeł tak jak ma to miejsce w pierwszym miesiącu.

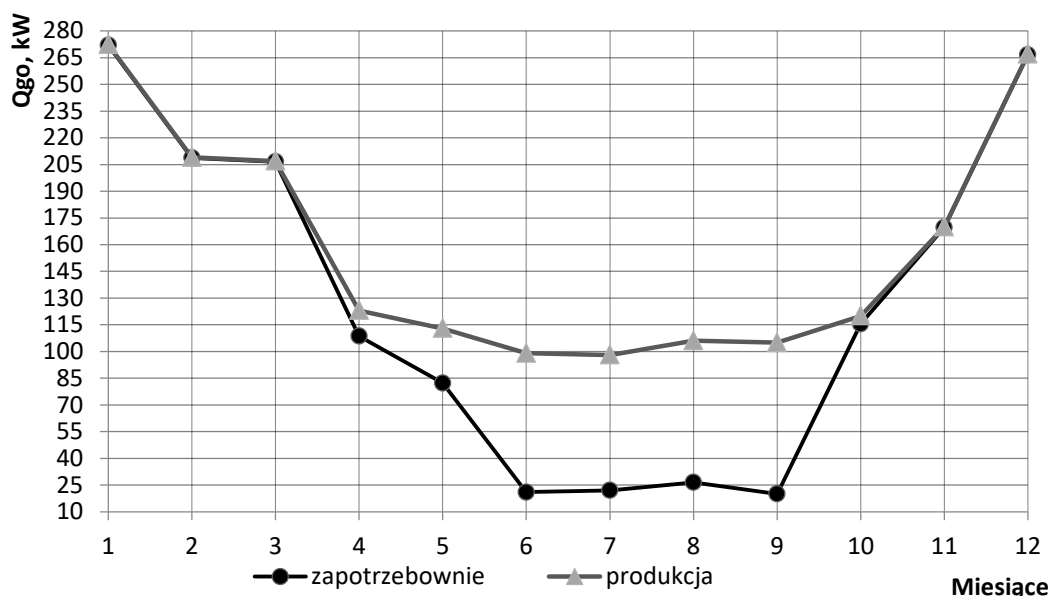
Nadmiar ciepła, który pojawia się w układzie przez dziesięć miesięcy (różnica pomiędzy zapotrzebowaniem a produkcją) należy skierować do chłodni kominowej.

4.2 Priorytet wytwarzania ciepła grzejnego oraz chłodu

Scenariusz pracy silnika, według którego priorytetem jest wytworzenie odpowiedniego woluminy chłodu oraz ciepła grzejnego.

Zapotrzebowanie na chłód w czasie działania układu według tej koncepcji jest całkowicie pokryte.

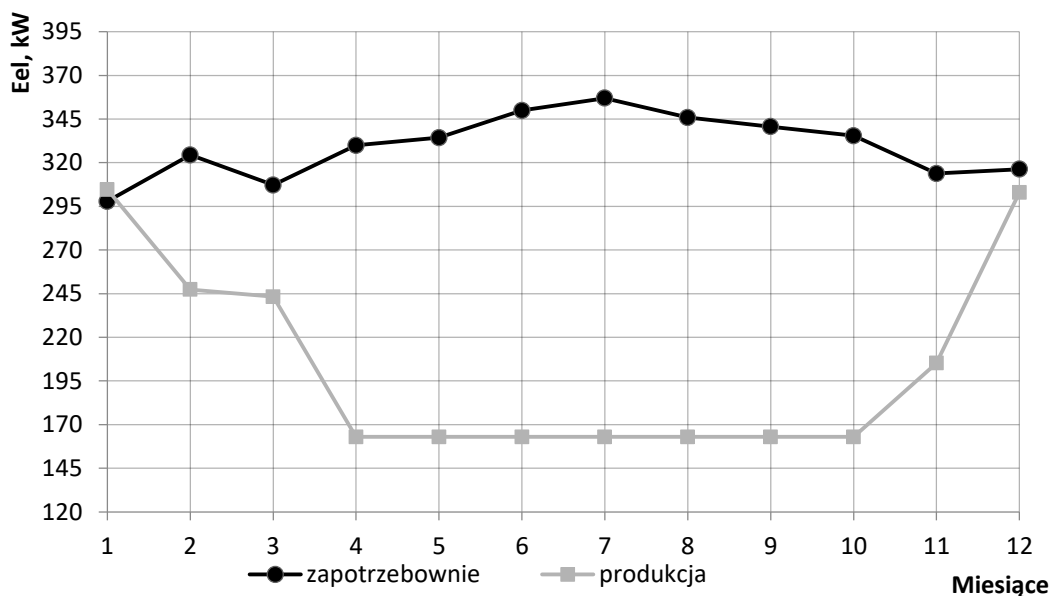
Na rys. 10 przedstawiono wyniki badania pracy układu według priorytetowego wytwarzania ciepła grzejnego oraz chłodu oraz charakterystykę zapotrzebowania.



Rys. 10 Charakterystyka zapotrzebowania ciepła grzewczego oraz produkcji silnika przez rok.

Z diagramu powyżej (rys. 10) wynika, iż w czasie całego roku odbiorca ciepła grzewczego nie jest zmuszony w żaden sposób uzupełniać braków ciepła, ponieważ krzywa jego zapotrzebowania jest całkowicie pokryta. Dodatkowo od kwietnia do września układ produkuje nadmierną ilość ciepła, która zostaje skierowana do chłodni kominowej. Wynika to z faktu braku możliwości pracy silnika na niższych parametrach. Można stwierdzić, że układ jest odpowiednio skonfigurowany do pracy z takimi obciążeniami na ciepło grzewcze oraz chłód. Dodatkowo da się oszacować możliwości zwiększenia zapotrzebowania na te nośniki bez ingerencji w parametry pracy.

Rys. 11 ukazuje wyniki analizy produkcji energii elektrycznej silnika według priorytetowego wytwarzania ciepła grzewczego, chłodu oraz charakterystykę zapotrzebowania.



Rys. 11 Charakterystyka zapotrzebowania na moc elektryczną i produkcji silnika przez rok.

Dzięki charakterystyce obciążenia elektrycznego oraz pracy silnika przez cały rok można wywnioskować, iż energia elektryczna produkowana podczas priorytetowego wytwarzania ciepła grzejnego oraz chłodu jest niewystarczająca od lutego do listopada. Natomiast w miesiącu dwunastym różnica pomiędzy produkcją a zapotrzebowaniem jest już zdecydowanie mniejsza niemniej jednak tylko w styczniu układ wytwarza nadmierną ilość tego nośnika energii. Tak znaczące braki będą powodowały znaczny wzrost kosztów związanych z zakupem brakującej energii.

W trzech tabelach 1-3 przedstawiono roczne wyniki prac układu według omówionych scenariuszy jego działania. W każdej z tabel odpowiednio przedstawiono zużycie energii chemicznej paliwa, zapotrzebowanie (Z) na dany nośnik energii u odbiorcy oraz wielkości produkcji (P) danego nośnika energii przez analizowany układ trigeneracyjny. Ponadto wskazano różnicę pomiędzy wielkością zapotrzebowania i produkcji danego nośnika energii, przy czym wartość ujemna tej różnicy oznacza niedobór, a wartość dodatnia nadmiar ilości produkowanego nośnika energii w stosunku do jego zapotrzebowania.

Tab.1 Wyniki roczne pracy układu według priorytet wytwarzania energii elektrycznej dla rozwiązania A.

Energia chemiczna paliwa E_{ch} kWh/rok	Energia elektryczna u odbiorcy E_{el} kWh/rok		Ciepło grzewcze u odbiorcy, Q_{go} kWh/rok		Chłód u odbiorcy, Q_{co} kWh/rok	
	P	Z	P	Z	P	Z
Zużycie						
9984	3900	3952	3259	1522	730	730
	Różnica		Różnica		Różnica	
	-52		1737		0	

Tab.2 Wyniki roczne pracy układu według priorytet wytwarzania energii elektrycznej dla rozwiązania B.

Energia chemiczna paliwa E_{ch} kWh/rok	Energia elektryczna u odbiorcy E_{el} kWh/rok		Ciepło grzewcze u odbiorcy, Q_{go} kWh/rok		Chłód u odbiorcy, Q_{co} kWh/rok	
	P	Z	P	Z	P	Z
Zużycie						
9828	3834	3952	3160	1522	730	730
	Różnica		Różnica		Różnica	
	-118		1638		0	

Tab.3 Wyniki roczne pracy układu według priorytet wytwarzania ciepła grzejnego oraz chłodu.

Energia chemiczna paliwa E_{ch} kWh/rok	Energia elektryczna u odbiorcy E_{el} kWh/rok		Ciepło grzewcze u odbiorcy, Q_{go} kWh/rok		Chłód u odbiorcy, Q_{co} kWh/rok	
	P	Z	P	Z	P	Z
Zużycie						
6645	2444	3952	1859	1522	730	730
	Różnica		Różnica		Różnica	
	-1508		337		0	

Z przedstawionych w tabelach 1-3 rezultatów analizy wynika, iż żadna z koncepcji nie pozwala na całkowite zaspokojenie potrzeb odbiorcy na energię elektryczną wartości różnie są ujemne. Jednakże każda z nich gwarantuje całkowite pokrycie zapotrzebowania na chłód. Równocześnie produkcja ciepła grzejnego jest na takim poziomie, który pozwala zaspokoić wymagania ilościowe u odbiorcy na ten nośnik energii w skali roku. Największe zużycie energii chemicznej paliwa odnotowano podczas pracy według rozwiązania A dla priorytetu energii elektrycznej, co związane jest z ciągłą pracą silnika z maksymalnymi parametrami.

5 Podsumowanie

Przedmiotem powyższego opracowania była analiza pracy układu trigeneracyjnego, którego podstawowymi elementami są silnik tłokowy gazowy zasilany paliwem o znanej wartości opałowej, wymienniki ciepła, chłodnicze urządzenie adsorpcyjne oraz chłodnie kominowe. Analiza obejmowała zaspokojenie zapotrzebowania odbiorcy na nośniki energii takie jak energia elektryczna, ciepło grzejne oraz chłód. Wartości średniomiesięcznego zapotrzebowania zostały narzucone przez odbiorcę. Podczas badań zastosowano dwa różne scenariusze pokrycia zadanego zapotrzebowania. Pierwszy zakładał, iż priorytetem działania systemu jest produkcja odpowiedniej ilości energii elektrycznej tak, aby wymagania ilościowe odbiorcy zostały w jak największym stopniu wypełnione. W tym przypadku produkcja ciepła grzejnego oraz chłodu wynika z priorytetu działania systemu według tej koncepcji. Scenariusz działania z priorytetem wytwarzania energii elektrycznej podzielono na dwa sposoby podejścia do tej koncepcji (Rozwiązanie A oraz B). Rozwiązanie A gwarantuje stałość parametrów pracy silnika przy pełnym obciążeniu. W czasie siedmiu miesięcy wymagane jest doprowadzenie niewielkiej ilości energii elektrycznej z zewnętrznej sieci elektroenergetycznej do odbiorcy. Jednakże w pozostałych miesiącach układ zapewnia możliwość wyprowadzenia pewnej ilości tego nośnika do sieci elektroenergetycznej. Rozwiązanie B jest jedynym scenariuszem pracy silnika, który nie zapewnia pełnego pokrycia zapotrzebowania na ciepło grzejne przez cały rok. Jednocześnie ilość ciepła, które należałoby dostarczyć ze źródeł zewnętrznych jest niewielka i została wskazana dla miesiąca stycznia. Dodatkowo w czasie analizy tego sposobu działania również zapewnia wyprodukowanie nadmiernej ilości energii elektrycznej, co w odpowiednich warunkach może decydować o wyborze tego rozwiązania. Scenariusz priorytetowego wytwarzania ciepła grzejnego oraz chłodu gwarantuje pokrycie zapotrzebowania na te nośniki oraz najmniejsze zużycie energii chemicznej paliwa. Ponadto zmniejsza się znacząco ilość odpadowego ciepła trafiającego do chłodni kominowej. Jednak to rozwiązanie powoduje największy deficyt energii elektrycznej w ciągu roku.

Do porównania efektów działania układu trigeneracji pracującego według rozpatrywanych scenariuszy zastosowano wskaźnik zdefiniowany równaniem:

$$\eta = \frac{E_{\text{elp}} + Q_{\text{goz}} + Q_{\text{coz}}}{E_{\text{ch}}} \quad (18)$$

gdzie:

E_{elp} - ilość energii elektrycznej wyprodukowanej do odbiorcy w ciągu roku,

$Q_{\text{goz}}, Q_{\text{coz}}$ - ilość ciepła grzejnego oraz chłodu wyprodukowana do odbiorcy w ciągu roku,

E_{ch} - ilość energii chemicznej paliwa zużytego w ciągu roku.

Wartość względna tego wskaźnika dla układu trigeneracji według scenariuszy priorytetowego wytwarzania energii elektrycznej dla sposobu A była na poziomie 61,6%, a dla rozwiązania B wynosiła 61,9%. W przypadku scenariusza priorytetowego wytwarzania ciepła oraz chłodu wartość tego wskaźnika wynosiła 70,7%. Również wyznaczono wartość tego wskaźnika dla układu kogeneracyjnego przy priorytecie produkcji energii elektrycznej (parametry pracy przyjęto dla sposobu A), która wynosiła 54,3%.

6 Literatura

- [1] J.Szargut, *Termodynamika Techniczna*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice. (2013)
- [2] Wua B, Wanga L. Comparable analysis methodology of CCHP based on distributed energy system. *Energy Convers Manage* 88, 2014, 863–71.
- [3] Jradi M, Riffat S. Tri-generation systems: energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies. *Renew Sustain Energy Rev* 32, 2014, 396–415.
- [4] Moran A, Mago PJ, Chamra LM. Thermo-economic modelling of micro-CHP (micro-cooling, heating, and power) for small commercial applications. *Int J Energy Res* 32, 2008, 808–23.
- [5] Gazda W., Stanek W.: Energy and environmental assessment of integrated biogas trigeneration and photovoltaic plant as more sustainable industrial system. *Applied Energy* 169, 2016, 138–149.
- [6] Układ trigeneracyjny we Wrocławiu informacje dostępne w Internecie 10.11.2017 na stronie: http://energetyka.wnp.pl/zew-kogeneracja-uruchomil-instalacje-trigeneracji,181433_1_0_0.html
- [7] Układ trigeneracyjny w Katowicach informacje dostępne w Internecie 10.11.2017 2017 na stronie: <http://www.chronmyklimat.pl/projekty/energooszczedne-4-katy/wiadomosci/wybitny-biurowiec-w-katowicach>
- [8] Gazda W.: Informacja własna. 2017

Thermodynamic analysis of the trigeneration system

Przemysław Krochmal

Key words: gas internal combustion engine, trigeneration system, demand for energy, thermodynamic analysis.

Abstract

The article describes analysis of the trigeneration system, which is driven by gas internal combustion engine. The fuel is gas with known Lower Calorific Value. The system produces electricity, and the heat from the cooling of the engine and exhaust gases. Heat is converted into heat and cooling with suitable parameters. In the article have been analysed different scenarios, in which trigeneration system try to satisfy the demand for the electricity, heat and cooling:

-in the first scenario priority is production of the electricity (this scenario was divided into two solutions A and B),

-in the second scenario priority is production of the heat and cooling.

Both scenarios have some advantages and disadvantages. The final decision, which the scenario system should work, depends on an individual approach and should be extended to specialized technical and economic analysis.