

INŻ. BARTOSZ SMÓŁKA, BEATA SZKOŁA

## WYKORZYSTANIE SILNIKA STIRLINGA W MAŁYCH I ŚREDNICH AGREGATACH TRIGENERACYJNYCH

---

### Streszczenie

W związku z wprowadzaniem kolejnych dyrektyw dotyczących oszczędzania energii, ograniczenia zużycia paliw kopalnych i emisji zanieczyszczeń wprowadzanych do atmosfery konieczne jest wprowadzenie nowych rozwiązań w energetyce. Jednym z możliwych kierunków działań jest promowanie i wdrażanie rozwiązań kogeneracyjnych. W przypadku budynków biurowych lub nowoczesnego mieszkalnictwa coraz popularniejsze są układy trigeneracyjne – do produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu. Rozwiązania tego typu wykorzystują najczęściej silniki spalania wewnętrzznego, które muszą być zasilane paliwem ciekłym lub gazowym. Alternatywnym rozwiązaniem dla zasilania układów trigeneracyjnych jest silnik Stirlinga. Może być on zasilany dowolnym źródłem ciepła - energią słoneczną, paliwami stałymi czy energią odpadową. W poniższym artykule przedstawiono koncepcje wykorzystania silnika Stirlinga w małych i średnich instalacjach trigeneracyjnych. Przeprowadzono uproszczoną analizę energetyczno – ekonomiczną rozwiązania dla domu jednorodzinnego. Omówione rozwiązanie zmniejsza roczne koszty związane z pokryciem zapotrzebowania na energię elektryczną, ciepło i chłód o blisko 50% w stosunku do układu z kotłem gazowym i poborem prądu z sieci.

## 1. Układy trigeneracyjne

### 1.1. Idea zastosowania układów trójgeneracyjnych

Rosnące ceny paliw kopalnych jak również zmniejszanie się ich dostępności, między innymi w wyniku konfliktów politycznych, prowadzą do poszukiwania nowych rozwiązań opartych na wykorzystaniu energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Dodatkowym aspektem poszukiwań jest zwiększenie stabilności oraz niezależności energetycznej przez rozproszenie źródeł produkcji i zwiększenie ich różnorodności.

Dążąc do pokrycia jednoczesnego zapotrzebowania na energię elektryczną, ciepło i chłód, szczególnie w budynkach biurowych, przemysłowych czy w nowoczesnym budownictwie, coraz częściej stosuje się układy trójgeneracyjne. Pozwalają one wytworzyć powyższe strumienie energii w jednym procesie technologicznym, co pozwala na uzyskanie większej sprawności produkcji użytecznych form energii w stosunku do energetyki rozdzielonej.

### 1.2. Budowa klasycznego układu trigeneracyjnego

Zasada działania układu oparta jest o szereg przemian termodynamicznych. Na klasyczny układ trigeneracyjny składa się silnik spalinowy tłokowy zasilany paliwem gazowym bądź olejem opałowym lub turbina gazowa, układ odzysku ciepła oraz ziębiarka absorpcyjna. W celu wyrównania pracy układu w czasie stosuje się zasobniki ciepła, zimna oraz akumulatory. W układach trigeneracyjnych stosujemy dwa rodzaje chłodziarek absorpcyjnych: bromolitowe, gdzie czynnikiem roboczym jest woda i amoniakalne, gdzie czynnikiem roboczym jest amoniak. Chłodziarki adsorpcyjne bromolitowe ze względu na wytwarzanie czynnika chłodniczego o temperaturze na poziomie  $5^{\circ}\text{C}$  znajdują zastosowanie w układach klimatyzacji. Natomiast ziębiarki amoniakalne ze względu na produkcję czynnika o temperaturze poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  mają zastosowanie w układach przemysłowych. Medium zasilającym ziębiarki adsorpcyjne są spaliny, para nasycona lub gorąca woda

### 1.3. Korzyści wynikające ze stosowania systemów trigeneracyjnych

Stosowanie układów trigeneracyjnych niesie wraz z sobą wiele korzyści, zarówno dla środowiska naturalnego jak i potencjalnych odbiorców. Oto niektóre z nich:

- wyższa sprawność wytwarzania użytecznych form energii,
- mniejsze zużycie paliw pierwotnych,
- niższa emisja gazów cieplarnianych,
- większa niezależność od sieci energetycznej i zasilanie zastępcze na wypadek awarii sieci
- wydłużenie czasu pracy urządzeń cieplnych.

## **2. Silnik Stirlinga**

### 2.1. Idea działania

Silnik Stirlinga jest tłokową maszyną cieplną pracującą w obiegu zamkniętym o zasilaniu zewnętrznym. Jego działanie opiera się na sprężaniu i rozprężaniu gazu roboczego przy jednoczesnym dostarczaniu ciepła do części cieplej cylindra oraz odbieraniu ciepła od części zimnej. Sprawność silnika jest tym większa im większa jest różnica temperatur pomiędzy częścią ciepłą oraz zimną. Istnieje kilka podstawowych konstrukcji silnika Stirlinga :  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  czy rotacyjny. Zewnętrzne zasilanie pozwala nam na zasilanie silnika dowolnym paliwem.

### 2.2. Przykładowe zastosowanie silników Stirlinga

Podstawowymi zaletami silnika Stirlinga przemawiającymi za jego zastosowaniem są m.in. : ciągła praca, niski poziom hałasu, różnorodność w możliwości zasilania.

Silnik Stirlinga stosować możemy w wielu obszarach m.in. :

- energetyce,
- urządzeniach chłodniczych, klimatyzacyjnych, kriogenicznych,
- przemyśle morskim,
- przemyśle samochodowym.

## **3. Koncepcja agregatu trigeneracyjnego**

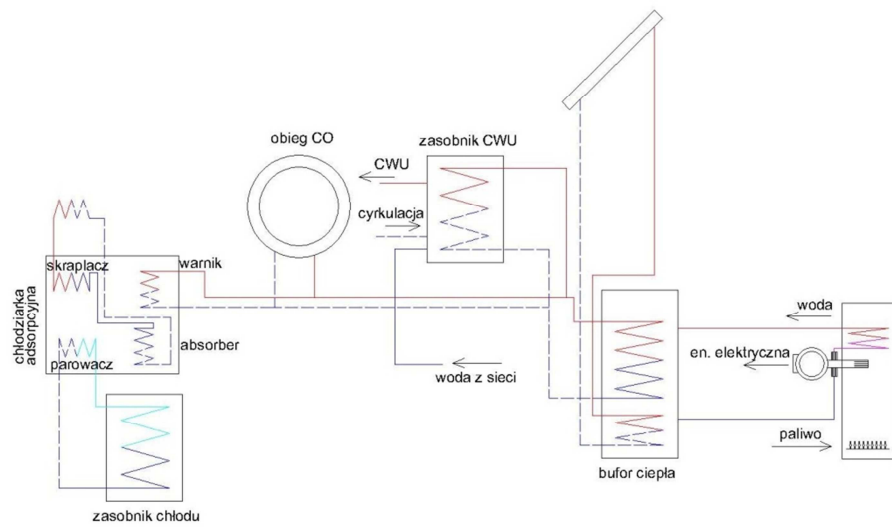
### 3.1. Opis rozwiązania

Celem opracowania jest przedstawienie koncepcji agregatu trigeneracyjnego dla małych i średnich budynków. Proponowane rozwiązanie składa się z :

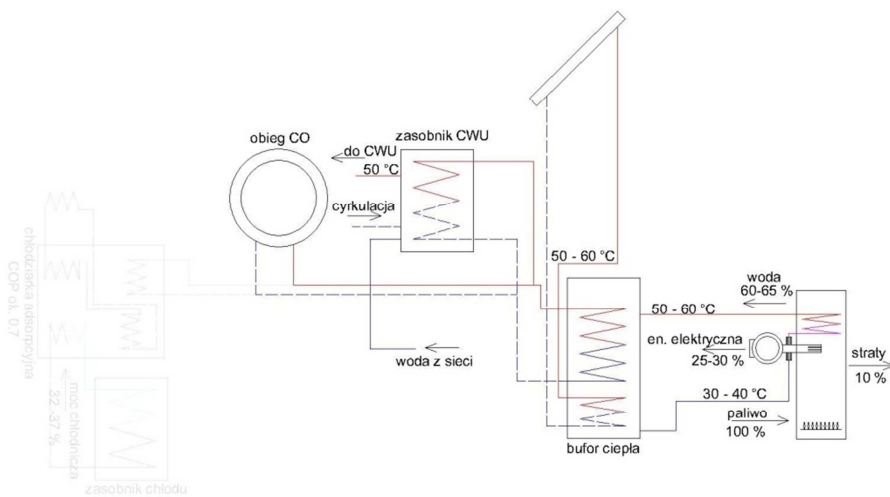
- komory paleniska,
- silnika Stirlinga z umieszczoną w komorze sondą do odbioru ciepła, omywaną przez spaliny,
- generatora prądu oraz akumulatora,
- węzownicy wodnej umieszczonej w górnej części paleniska,
- buforu ciepła,
- zasobnika cwu,
- bromolitowej chłodziarki absorpcyjnej,
- zasobnika chłodu,
- opcjonalnej instalacji solarnej wspomagającej układ.

Nadrzędną opcją sterowania agregatem jest zapewnienie pokrycia zapotrzebowania na ciepło oraz chłód a wielkość produkcji energii elektrycznej jest drugorzędna. Spaliny omywają w pierwszej kolejności silnik a następnie węzownicę wodną w celu zapewnienia odpowiedniej temperatury wody trafiającej na bufor ciepła. Chłodna część silnika jest omywana przez wodę wracającą z bufora. Agregat pracuje w dwóch trybach : letnim oraz zimowym. W zimie odcina się zasilanie chłodziarki absorpcyjnej oraz obniża temperaturę

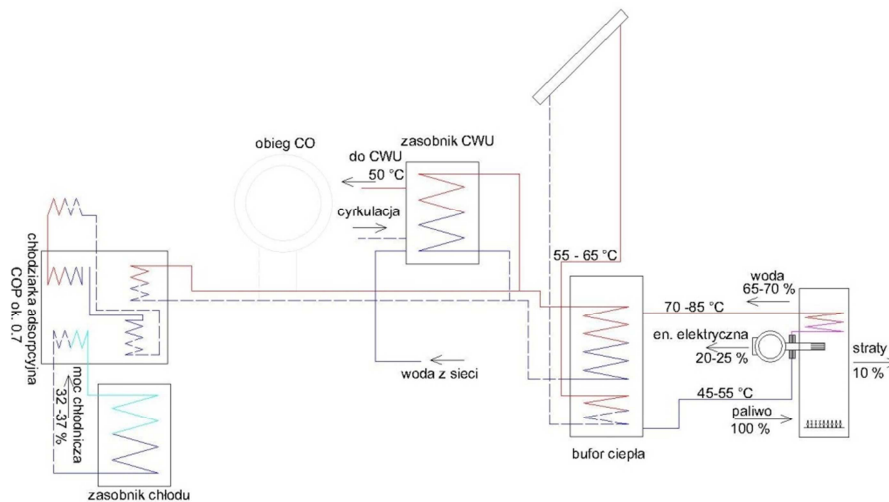
wody w buforze do poziomu 50 - 60°C, wystarczającą dla układu cwu oraz systemów niskotemperaturowego ogrzewania.. W okresie letnim ciepło kierowane wcześniej do obiegu CO trafia na zasilanie chłodziarki absorpcyjnej. Zwiększamy temperaturę w buforze do poziomu 70 - 85°C która pozwala na pracę chłodziarki. Zwiększenie temperatury w buforze powodują też zwiększenie temperatury na części chłodzącej silnika i zmniejszenie jego sprawności wytwarzania prądu.



Rys.1. Koncepcja układu agregatu trigeneracyjnego z silnikiem Stirlinga



Rys.2. Uproszczoney bilans energii oraz zestawienie temperatur dla pracy w trybie zimowym



Rys.3. Uproszczony bilans energii oraz zestawienie temperatur dla pracy w trybie letnim

### 3.2. Analiza energetyczno – ekonomiczna rozwiązania z wykorzystaniem agregatu trójgeneracyjnego z silnikiem Stirlinga dla domu jednorodzinnego.

Do analizy przyjęte zostały następujące dane:

Dom jednorodzinny 150 m<sup>2</sup>, 5 osób

- Jednostkowe straty ciepła 40 W/m<sup>2</sup>

- Obciążenie chłodnicze 7,5 kW, 500h pracy z maksymalną wydajnością, COP 3,2

- Ilość wody na CWU 300 l/dzień

- Zużycie energii elektrycznej 5000 kWh/rok

- Koszt energii elektrycznej 0,52 zł/kWh

- Koszt gazu 0,216 zł/kWh

- Koszt węgla (ekogroszek) 0,118 zł/kWh

- Agregat pracuje przez cały rok z mocą zbliżoną do nominalnej po ok. 4h dziennie

Do porównania uwzględniono dwa rozwiązania :

- dom ogrzewany przy pomocy kotła gazowego kondensacyjnego, chłodzenie przy pomocy klimatyzatora typu split, energia elektryczna pobierana z sieci ,

dom ogrzewany przy pomocy kotła węglowego na ekogroszek, chłodzenie przy pomocy klimatyzatora typu split, energia elektryczna pobierana z sieci

Tabela 1

**Analiza kosztów pokrycia zapotrzebowania energii przy użyciu agregatu trigeneracyjnego oraz porównywanych rozwiązań dla domu jednorodzinnego**

	Kocioł gazowy kondensacyjny + prąd z sieci	Kocioł węglowy (ekogroszek) + prąd z sieci	Agregat trigeneracyjny zasilany ekogroszkiem
CWU	1010 zł/rok	580 zł/rok	580 zł/rok
CO	2990 zł/rok	1720 zł/rok	1720 zł/rok
Chłodzenie	610 zł/rok	610 zł/rok	640 zł/rok
En. elektryczna	2600 zł/rok	2600 zł/rok	850 zł/rok
SUMA	7210 zł/rok	5510 zł/rok	3790 zł/rok

### 3.3. Podsumowanie analizy energetyczno- ekonomicznej

Po dokonanej analizie stwierdzić można, że proponowane rozwiązanie zmniejsza koszty związane z pokryciem zapotrzebowania na energię elektryczną, ciepło i chłód blisko o 50 % w stosunku do układu z kotłem gazowym i poborem prądu z sieci. Kolejnym argumentem przemawiającym za przedstawionym rozwiązaniem jest możliwość stosowania dowolnego paliwa (ekogroszek, pellety, gaz) oraz wspomaganie zasilania instalacją solarną.

Przeszkodą w zastosowaniu tego typu rozwiązania jest cena. Według cen podawanych przez producentów silnik Stirlinga o mocy elektrycznej 3 kW to koszt ok. 14000 €. Chłodziarka absorpcyjna o mocy ok. 10 kW to koszt ok. 5000 \$. Dodatkowe koszty to zasobniki, bufor, akumulator czy też wspomaganie solarne. Podstawowym składnikiem kosztów jest silnik którego konstrukcja wymaga dużej dokładności, szczelności a także wysokiej klasy regeneratora. Prosty czas zwrotu takiej inwestycji w porównaniu z kotłem gazowym wynosi ok 25-30 lat. Tego typu agregat przy obecnej formie rynku pomimo dużej ilości zalet nie znajdzie zastosowania dla małego budownictwa.

Gdyby jednak rozważyć zastosowanie agregatu z silnikiem Stirlinga do większych instalacji prosty czas zwrotu maleje w szybkim tempie. Koszt agregatu o 10-krotnie większej mocy wzrośnie 2 do 3 razy w dalszym ciągu pozwalając na ok. 50 % oszczędność. Krótki czas zwrotu 10-krotnie większej instalacji wyniósłby ok. 6-10 lat. Możliwość zbudowania instalacji opartej o silnik Stirlinga zasilanej np. biomasą obsługującej małe osiedle lub kamienicę dałoby wymierną korzyść w postaci oszczędności finansowej oraz energetycznej.

- [1] Skorek J., Kalina J., *Gazowe układy kogeneracyjne*, WNT, Warsaw 2005
- [2] Prymon M., Wrona J., *Analiza ekonomiczna wykorzystania agregatu kogeneracyjnego zbudowanego w oparciu o silnik Stirlinga*, Politechnika Krakowska
- [3] Kirilow N.G, *Power units based on stirling engines: new technologies based on alternative fuels*, Vestnik Mashinostroeniya, 2008, No. 2, pp. 6–11
- [4] Kalina J., *Skojarzone wytwarzanie ciepła, zimna i energii elektrycznej w systemach trójgeneracyjnych – aspekty techniczne i ekonomiczne*