

Malinowska Wanda, Malinowski Leszek*

Zakład Podstaw Techniki

Akademia Rolnicza w Szczecinie

*Zakład Teorii Maszyn Ciepłych

Politechnika Szczecińska

EFEKTYWNOŚĆ LOKALNEGO UKŁADU KOGENERACYJNEGO DLA GOSPODARSTWA ROLNEGO Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIENNEGO ZAPOTRZEBOWANIA NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNA I CIEPŁO

Streszczenie

W pracy przeprowadzono analizę efektywności lokalnej siłowni kogeneracyjnej, w której prądnicę napędza silnik spalinowy, dla przypadku zmiennego zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło. Sformułowano model empiryczno-analityczny siłowni umożliwiający uwzględnienie charakterystyk częściowego obciążenia maszyn i urządzeń siłowni. Efektywność siłowni kogeneracyjnej porównano z efektywnością układu tradycyjnego, w którym energia elektryczna pobierana jest z sieci energetycznej, a ciepło produkowane jest przez kocioł wodny.

Słowa kluczowe: kogeneracja, efektywność, zmienne zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepło

Wykaz symboli

c_{psp} ciepło właściwe spalin przy stałym ciśnieniu, J/(kg K)

c_w ciepło właściwe wody przy stałym ciśnieniu, J/(kg K)

$FESR$ wskaźnik oszczędności paliwa

\dot{m}_{sp} strumień spalin, kg/s

\dot{m}_w strumień wody chłodzącej silnik, kg/s

N_e moc efektywna silnika, W

N_{el} nominalna moc generatora, W

N_{eli} moc generatora częściowo obciążonego, W

\dot{Q}_0 strumień ciepła traconego przez silnik na rzecz otoczenia, W

\dot{Q}_{ch} strumień ciepła chłodzenia silnika, W

\dot{Q}_d strumień ciepła doprowadzanego do silnika wskutek spalania paliwa, W

\dot{Q}_{sp} strumień ciepła unoszonego ze spalinami opuszczającymi silnik, W

\dot{Q}_u łączny strumień ciepła wykorzystany użytecznie (woda chłodząca silnik i spaliny), W

T_0 temperatura otoczenia, °C

ϕ stopień obciążenia generatora

η_A pozorna sprawność elektryczna układu kogeneracyjnego

η_{el}	całkowita sprawność wytwarzania energii elektrycznej w układzie kogeneracyjnym
η_{elt}	całkowita sprawność wytwarzania energii elektrycznej w układzie tradycyjnym
η_{en}	sprawność energetyczna układu kogeneracyjnego
η_{ent}	sprawność energetyczna układu tradycyjnego
η_g	sprawność generatora
η_k	sprawność kotła w układzie tradycyjnym

Wstęp

Zdecentralizowane (lokalne) kogeneracyjne systemy zasilania w energię elektryczną i ciepło są coraz szerzej stosowane w Europie i na świecie. Zalety takich systemów ujawniają się zwłaszcza w przypadku odbiorców rozproszonych, do których należą gospodarstwa rolne. Układy kogeneracyjne charakteryzują się lepszym wykorzystaniem energii i egzergii [Kolanowski 2000, Malinowska i in. 2003] zawartej w paliwie oraz zmniejszoną o około 25% emisją CO₂. W lokalnych układach kogeneracyjnych praktycznie nie występują straty przesyłu energii elektrycznej. Zwiększenie udziału różnego rodzaju systemów kogeneracyjnych w produkcji energii elektrycznej do 18% w 2010 roku jest jednym z priorytetów Unii Europejskiej [COM 97].

Podczas analizy efektywności układów kogeneracyjnych najczęściej się przyjmuje, że silnik napędzający prądnicę pracuje z mocą nominalną, a całe ciepło odpadowe (spalin, czynnika chłodzącego) jest wykorzystywane użytecznie. Takie założenie jest uzasadnione wtedy, gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepło nie zmienia się w czasie lub gdy układ kogeneracyjny jest wspomagany przez sieć energetyczną i dodatkowy kocioł, w celu zaspokojenia szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło. W przypadku, gdy układ kogeneracyjny jest jedynym źródłem energii elektrycznej i ciepła, a zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepło zależy od pory dnia i roku, niezbędna jest analiza efektywności układu w warunkach zmiennego obciążenia. Występujące w literaturze modele matematyczne umożliwiające analizę efektywności układów kogeneracyjnych przy częściowym obciążeniu z reguły dotyczą dużych siłowni, w których prądnica napędzana jest turbiną gazową lub parową [O'Brien i in. 2000]. Ponadto, modele te wykorzystują drogie i skomplikowane specjalistyczne oprogramowanie [Zheng i in. 2003]. Brak jest tanich, prostych w użyciu modeli do analizy pracy w warunkach zmiennego obciążenia siłowni kogeneracyjnych niewielkich mocy, w których główną maszyną napędową jest silnik spalinowy. Opracowanie takiego narzędzia jest celem niniejszej pracy.

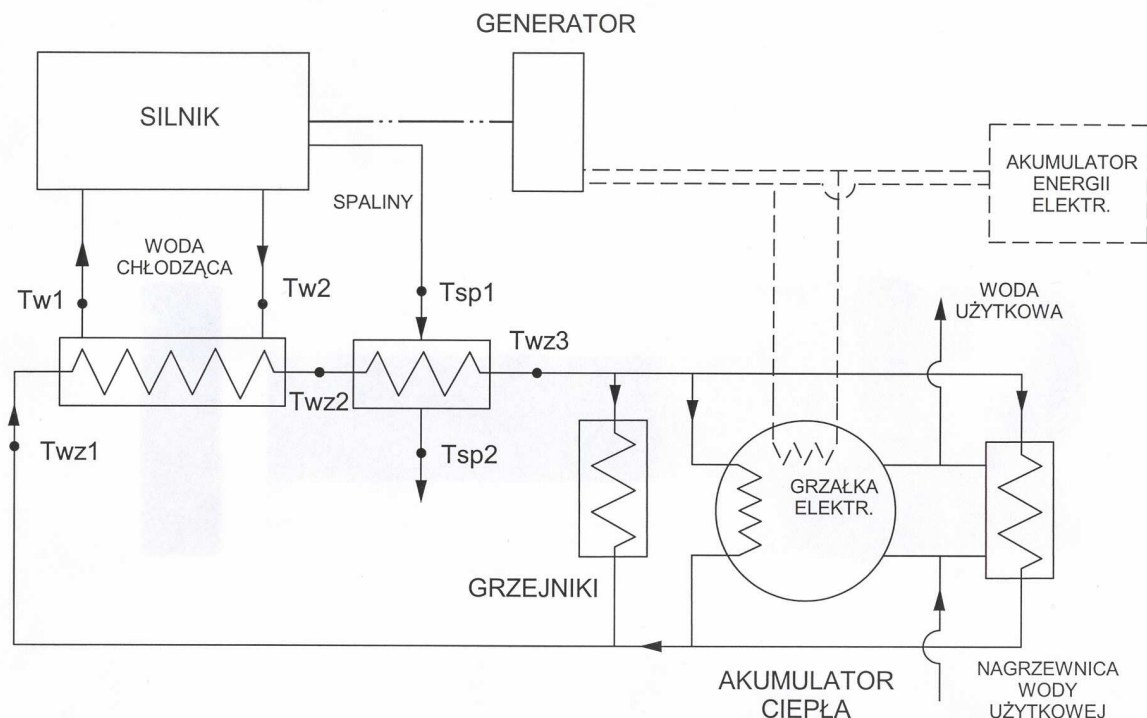
Model matematyczny siłowni kogeneracyjnej

Proponowany model matematyczny siłowni jest empiryczno-analitycznym modelem quasi-statycznym, umożliwiającym analizę stacjonarnej pracy siłowni przy różnych obciążeniach. Podczas konstruowania modelu wykorzystano podstawowe prawa i równania termodynamiki oraz zależności empiryczne. W celu uwzględnienia wpływu zmiennego zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło na efektywność siłowni posłużono się charakterystykami obciążeniowymi maszyn i urządzeń wchodzących w skład systemu, tzn.: silnika, generatora, kotła i wymienników ciepła. Charakterystyki częściowego obciążenia komponentów siłowni wyznaczono metodami aproksymacyjnymi wykorzystując dane pomiarowe opublikowane przez producentów komponentów, dane literaturowe oraz przeprowadzając analizę termodynamiczną komponentów. W przeważającej części są to funkcje liniowe.

W przedstawionym modelu układu kogeneracyjnego uwzględniono zależność od obciążenia: zużycia paliwa (oleju napędowego), strumienia ciepła chłodzenia silnika, strumienia ciepła unoszonego ze spalinami oraz składu i temperatury spalin, sprawności generatora w systemie kogeneracyjnym, sprawności kotła w systemie tradycyjnym oraz strumieni ciepła przenikających w wymiennikach ciepła. Schemat ideowy analizowanej siłowni przedstawiono na rys. 1.

Formułując model założono ponadto, że: strumień powietrza doprowadzanego do spalania w silniku nie zależy od jego obciążenia (brak doładowania), temperatura spalin opuszczających wymiennik ciepła nie może być niższa niż 120°C (korozja siarkowa), strumień wody chłodzącej silnik nie zależy od jego obciążenia, temperatura wody chłodzącej na wylocie z silnika jest równa 80°C.

Z charakterystyk częściowego obciążenia, producenci silników z reguły publikują tylko zależność zużycia paliwa od obciążenia. Do wyznaczenia innych wielkości dotyczących silnika niezbędnych do wyznaczenia wskaźników efektywności układu kogeneracyjnego w warunkach częściowego obciążenia wykorzystano sformułowany model empiryczno-analityczny silnika. Poprawność modelu silnika zweryfikowano za pomocą dostępnych danych pomiarowych dostarczonych przez producenta analizowanego zespołu prądotwórczego (Cummins DKAC, 11 kW) dla obciążenia nominalnego .



Rys. 1. Schemat ideowy analizowanego systemu kogeneracyjnego
 Fig. 1. Schematic diagram of the analysed cogeneration system

Podstawowe zależności i algorytm obliczeń

Dla różnych stopni obciążenia generatora

$$\phi = N_{eli} / N_{el} \quad (1)$$

z równania bilansu energii układu kogeneracyjnego wyznaczono sumę $\dot{Q}_{ch} + \dot{Q}_{sp}$

$$\dot{Q}_{ch} + \dot{Q}_{sp} = \dot{Q}_d - N_e - \dot{Q}_0 \quad (2)$$

gdzie $N_{el} / N_e = \eta_g$. \dot{Q}_d wyznaczano na podstawie danego zużycia paliwa i jego wartości opałowej. Przyjęto, że \dot{Q}_0 nie zależy od obciążenia silnika i w obliczeniach użyto wartości podanej przez producenta silnika dla mocy nominalnej. Wykorzystując empiryczną funkcję

$$\omega(\phi) = \frac{\dot{Q}_{ch}}{\dot{Q}_{sp}} \quad (3)$$

z układu równań (2) - (3) wyznaczono \dot{Q}_{ch} oraz \dot{Q}_{sp} .

Z równania

$$\dot{Q}_{sp} = \dot{m}_{sp} c_{psp} \Big|_{t_0}^{t_{sp1}} (T_{sp1} - T_0) \quad (4)$$

obliczono temperaturę spalin na wylocie z silnika, T_{sp1} , a z równania

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_w c_{pw} (T_{w2} - T_{w1}) \quad (5)$$

obliczono temperaturę wody na wlocie do silnika, T_{w1} . Następnie wykonano obliczenia wymienników ciepła (bilans energetyczny oraz strumień przenikającego ciepła) i wyznaczono \dot{Q}_u . W modelu silnika, współczynnik nadmiaru powietrza i skład spalin opuszczających silnik wyznaczano na podstawie obliczeń stechiometrycznych dla założonego składu paliwa (olej napędowy).

Analiza

Opracowany model wykorzystano do wyznaczenia wartości typowych, powszechnie stosowanych miar efektywności układów kogeneracyjnych [Feng i in. 1998] dla różnych obciążeń układu:

- sprawności energetycznej

$$\eta_{en} = \frac{N_{el} + \dot{Q}_u}{\dot{Q}_d} \quad (6)$$

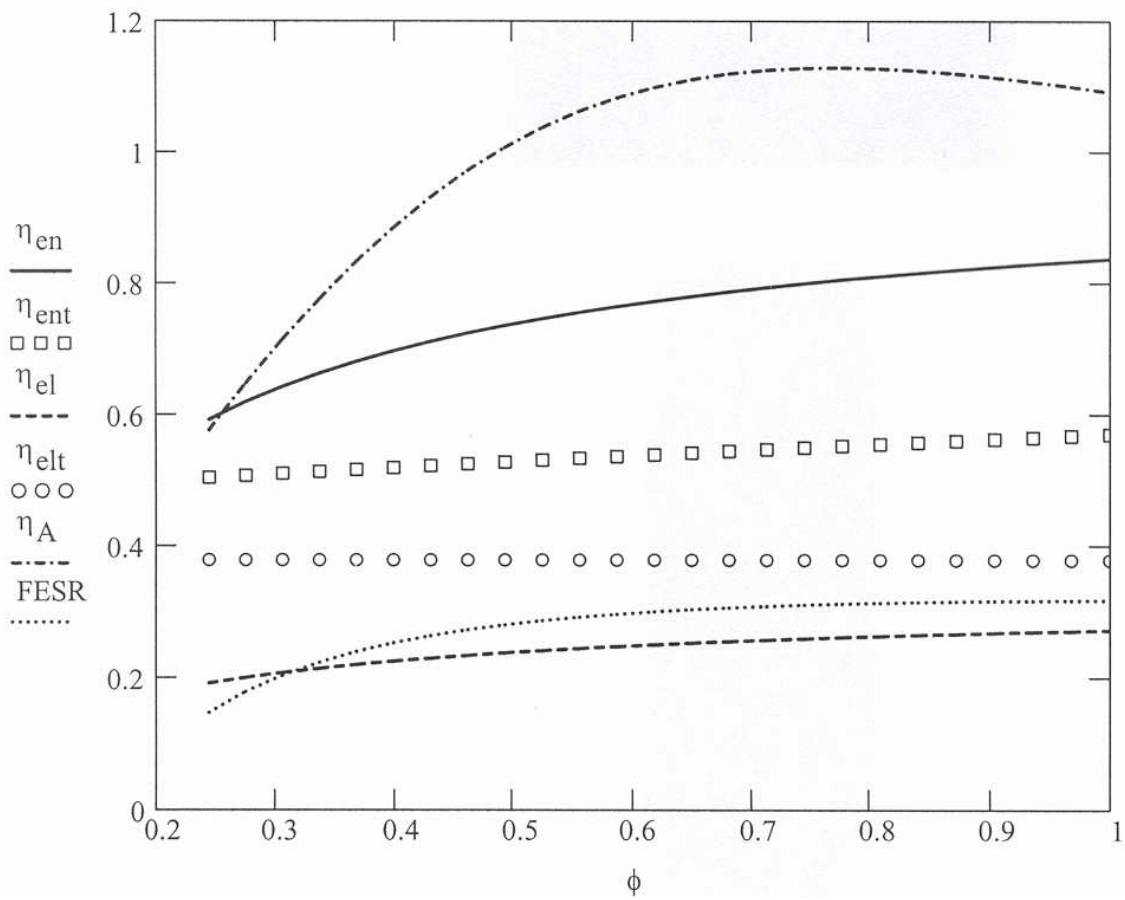
- pozornej sprawności elektrycznej

$$\eta_A = \frac{N_{el}}{\dot{Q}_d - \dot{Q}_u / \eta_k} \quad (7)$$

- wskaźnika oszczędności paliwa

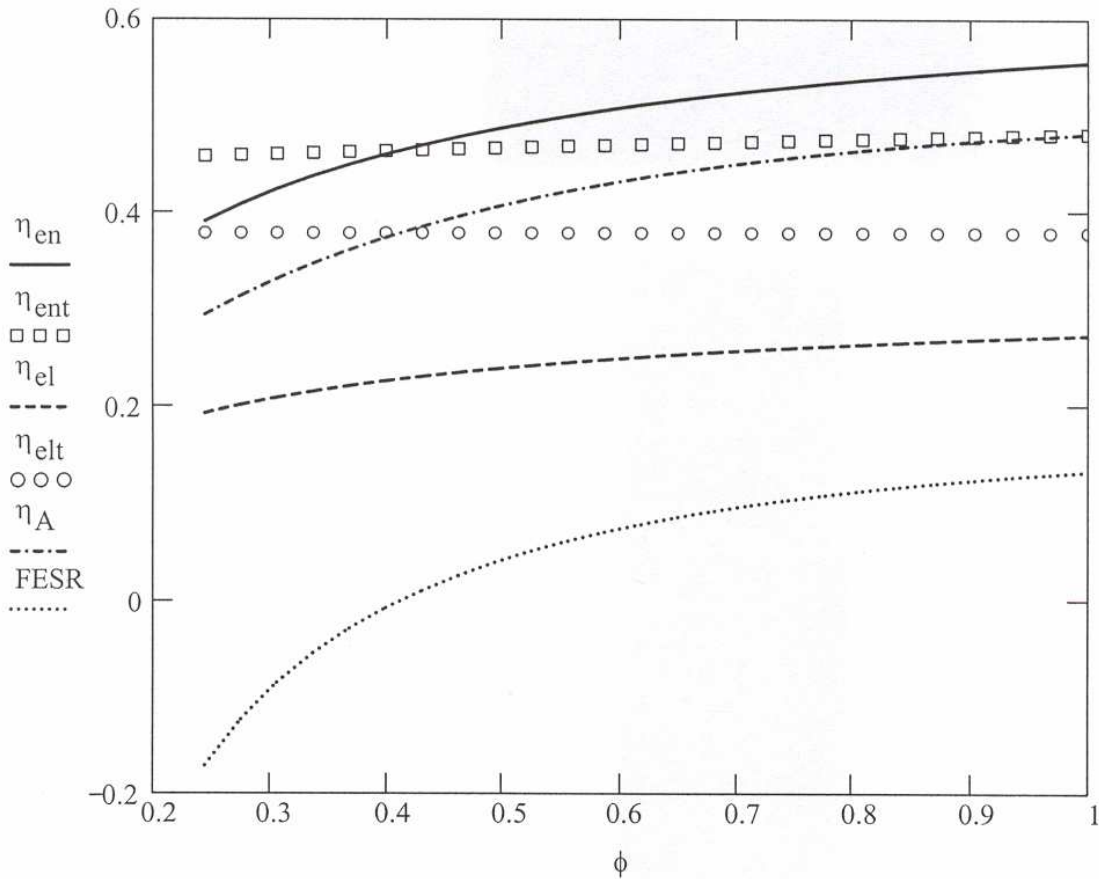
$$FESR = \frac{\dot{Q}_u / \eta_k + N_{el} / \eta_{elt} - \dot{Q}_d}{\dot{Q}_u / \eta_k + N_{el} / \eta_{elt}} \quad (8)$$

Sprawność energetyczna jest miarą użytecznego wykorzystania (na energię elektryczną i cele ogrzewcze) ciepła dostarczonego w paliwie. Przy wyznaczaniu pozornej sprawności elektrycznej moc elektryczną dzieli się przez strumień ciepła dostarczanego z paliwem silnikowym pomniejszony o strumień ciepła dostarczany do kotła w systemie tradycyjnym (w systemie kogeneracyjnym do produkcji ciepła nie potrzeba dodatkowego paliwa). Wskaźnik oszczędności paliwa jest miarą oszczędności paliwa w systemie kogeneracyjnym. Na rysunkach 1-3 przedstawiono zależności: sprawności elektrycznej i sprawności energetycznej układu kogeneracyjnego i układu tradycyjnego, pozornej sprawności elektrycznej układu kogeneracyjnego oraz wskaźnika oszczędności paliwa, dla zakresu stopni obciążenia generatora od 25 do 100% oraz dla stopni wykorzystania dostępnego ciepła w układzie kogeneracyjnym 25, 50 i 100%.



Rys. 2. Zależność wskaźników efektywności porównywanych systemów od stopnia obciążenia generatora dla przypadku, gdy całe ciepło dostępne w układzie kogeneracyjnym jest wykorzystywane użytecznie

Fig. 2. Measures of effectiveness of the compared systems versus load of the generator for the case of full utilization of the available heat



Rys. 3. Zależność wskaźników efektywności porównywanych systemów od stopnia obciążenia generatora dla przypadku, gdy 50% ciepła dostępnego w układzie kogeneracyjnym jest wykorzystywane użytecznie

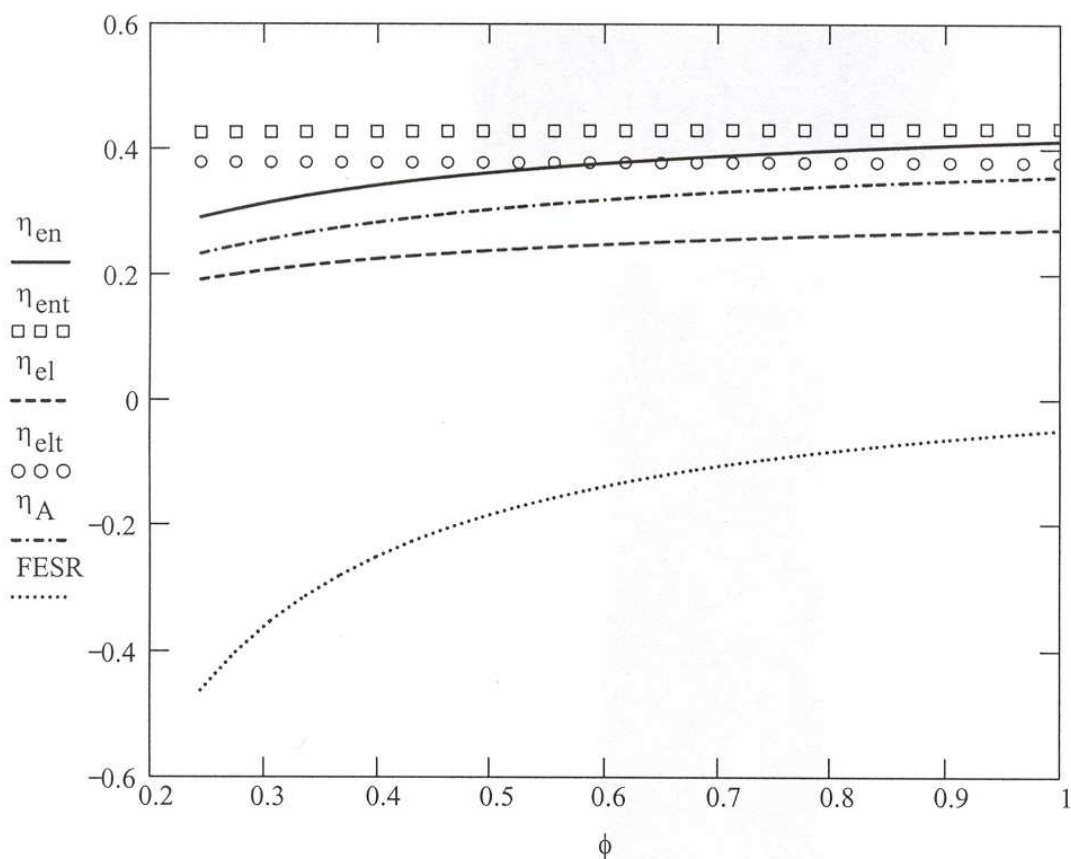
Fig. 3. Measures of effectiveness of the compared systems versus load of the generator for the case of 50 per cent utilization of the available heat

W przypadku wykorzystania na cele ogrzewcze całego dostępnego ciepła (rys. 2) sprawność energetyczna układu kogeneracyjnego, η_{en} , jest w całym zakresie obciążenia elektrycznego wyższa od sprawności energetycznej układu tradycyjnego

$$\eta_{ent} = \frac{N_{el} + Q_u}{N_{el} / \eta_{elt} + Q_u / \eta_k} \quad (9)$$

Oszczędności paliwa, których miarą jest $FESR$, sięgają w tym przypadku 32% przy nominalnym obciążeniu elektrycznym. Przy 50% wykorzystaniu dostępnego ciepła (rys. 3) i przy obciążeniu elektrycznym mniejszym niż 43% jest $\eta_{en} < \eta_{ent}$ oraz $FESR < 0$, czyli układ kogene-

racyjny jest przy małych obciążeniach elektrycznych mniej efektywny niż układ tradycyjny. Przy 25% wykorzystaniu dostępnego ciepła (rys. 4) w całym zakresie obciążenia elektrycznego jest $\eta_{en} < \eta_{ent}$ oraz $FESR < 0$.



Rys. 4. Zależność wskaźników efektywności porównywanych systemów od stopnia obciążenia generatora dla przypadku, gdy 25% ciepła dostępnego w układzie kogeneracyjnym jest wykorzystywane użytecznie

Fig. 4. Measures of effectiveness of the compared systems versus load of the generator for the case of 25 per cent utilization of the available heat

Wnioski

Analiza wykazała, że na efektywność układu kogeneracyjnego duży wpływ ma jego obciążenie. Obniżona sprawność komponentów siłowni spowodowana ich pracą w warunkach odbiegających od nominalnych znacząco wpływa na efektywność całego systemu. Przy niskim obciążeniu systemu kogeneracyjnego i/lub przy niepełnym wykorzystaniu jego mocy ogrzewczej jego efektywność może być niższa niż sprawność systemu tradycyjnego.

Bibliografia

- Kolanowski B. F. 2000. Small-scale cogeneration book. Prentice-Hall Int. London
- Malinowska W., Malinowski L. 2003. Parametric study of exergetic efficiency of a small-scale cogeneration plant incorporating heat pump. Applied Thermal Engineering, 23: 459-472
- COM(97) 514 final "A community strategy to promote combined heat and power (CHP) and to dismantle barriers to its development"
- O'Brien J. M., Bansal P. K. 2000. Modelling of cogeneration systems. Part 1: historical perspective. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A - Journal of Power and Energy, 214: 115-124
- Zheng L., Furimsky E. 2003. ASPEN simulation of cogeneration plants. Energy Conversion and Management, 44: 1845-1851
- Feng X., Cai Y-N, Qian L-L. 1998. A new performance criterion for cogeneration system. Energy Conversion and Management, 15: 1607-1609

PERFORMANCE OF AN ON-SITE COGENERATION PLANT FOR A FARM TAKING INTO ACCOUNT VARYING DEMAND FOR ELECTRIC POWER AND HEAT**Summary**

An analysis of the part-load performance of an on-site cogeneration plant with a reciprocating engine as a main mover is presented. The mathematical model of the plant is constructed based on the fundamental thermodynamic laws and relationships. The part-load performance analysis capability is obtained by incorporating part-load characteristics of the plant components into the model. The comparison of the part-load performances of the cogeneration plant and the traditional system in which electrical energy is supplied by the power grid and heat is produced in a hot water boiler is also made.

Key words: cogeneration, efficiency, performance, part-load operation