

Bolesław ZAPOROWSKI*, Radosław SZCZERBOWSKI**, Robert WRÓBLEWSKI**

Analiza efektywności ekonomicznej rozproszonych źródeł skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła opalanych gazem ziemnym oraz biomasą

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono analizę efektywności ekonomicznej układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy (źródeł rozproszonych), opalanych gazem ziemnym oraz wykorzystujących energię biomasy. Analizowane są następujące układy: a) z turbiną gazową, opalany gazem ziemnym, b) z silnikiem gazowym, opalany gazem ziemnym, c) z turbiną parową przeciwną, z bezpośrednim spalaniem biomasy, d) z turbiną z czynnikiem organicznym (*Organic Rankine Cycle* – ORC), z bezpośrednim spalaniem biomasy, e) z silnikiem gazowym, zintegrowany ze zgazowaniem biomasy, f) z turbiną gazową, zintegrowany ze zgazowaniem biomasy, oraz g) z silnikiem gazowym, zintegrowany z biologicznym generatorem biometanu. Dla tych układów zostały wyznaczone wielkości charakteryzujące ich efektywność ekonomiczną

SŁOWA KLUCZOWE: gaz ziemny, biomasa, elektrociepłownia, efektywność ekonomiczna

Wprowadzenie

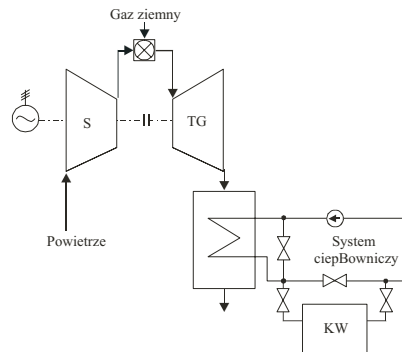
Jednym z ważnych celów rozwoju technologii wytwarzania energii elektrycznej jest obecnie zmniejszenie emisji CO₂ do atmosfery. Wynika on z Protokołu z Kioto do Ramowej

* Dr hab. inż., ** Dr inż. – Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Poznań.

Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz strategii zrównoważonego rozwoju. Cel ten w najbliższych latach w Polsce może być osiągnięty między innymi przez: zwiększenie sprawności elektrowni opalanych paliwami kopalnymi, zwiększenie udziału skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w produkcji energii elektrycznej ogółem oraz zwiększenie udziału energii ze źródeł odnawialnych, w tym biomasy, w wytwarzaniu energii elektrycznej oraz skojarzonym wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła. W związku z tym ważne znaczenie w polityce energetycznej Polski i Unii Europejskiej przypisuje się rozproszonym (małej mocy) źródłom skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Możliwe są w tym zakresie zarówno elektrociepłownie małej mocy opalane gazem ziemnym, mogące korzystać ze wsparcia w postaci świadectw pochodzenia z wysokosprawnej kogeneracji [1] (w roku 2008 maksymalnie 117 zł/MW·h) oraz elektrociepłownie wykorzystujące energię biomasy, mogące korzystać ze wsparcia w postaci świadectw pochodzenia dla energii elektrycznej wytwarzanej z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii [2] (w roku 2008 maksymalnie 248, 26 zł/MW·h). W chwili obecnej w Polsce biomasa jest wykorzystywana w elektroenergetyce prawie wyłącznie w procesie współspalania z węglem w elektrowniach i elektrociepłowniach parowych [3]. Biorąc pod uwagę, że biomasa może być produkowana (w postaci upraw energetycznych) lub powstaje jako odpady przemysłowe (przede wszystkim w przemyśle drzewnym) i komunalne na obszarze całego Kraju, zdaniem autorów uzasadnione jest stwierdzenie, że najwłaściwszym miejscem jej energetycznego wykorzystania powinny być rozproszone źródła skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, czyli elektrociepłownie małej mocy, o elektrycznej mocy zainstalowanej do 10 MW. Podstawą ich budowy powinno być lokalne zapotrzebowanie na ciepło użytkowe.

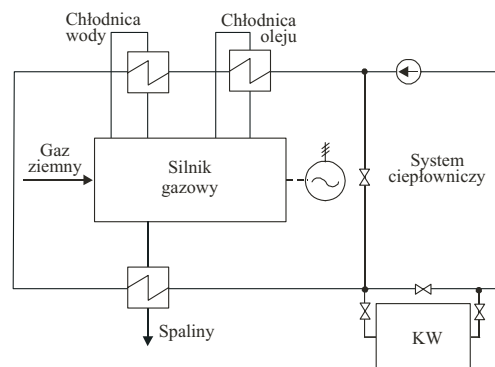
1. Układy skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy opalane gazem ziemnym oraz wykorzystujące energię biomasy

Na rysunkach 1–7 przedstawiono podstawowe schematy układów technologicznych elektrociepłowni małej mocy opalane gazem ziemnym oraz wykorzystujące energię chemiczną biomasy: dwa układy opalane gazem ziemnym (rys. 1 i 2), dwa układy z bezpośrednim spalaniem biomasy (rys. 3 i 4), dwa układy zintegrowane ze zgazowaniem biomasy (rys. 5 i 6) oraz układ zintegrowany z biologicznym wytwarzaniem biometanu (rys. 7) [4, 5, 6, 7].



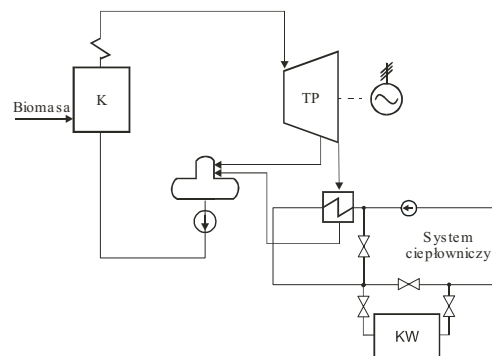
Rys. 1. Schemat układu elektrociepłowni z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym, opalanej gazem ziemnym

Fig. 1. Scheme of the system of CHP plant with simple cycle gas turbine fired with natural gas



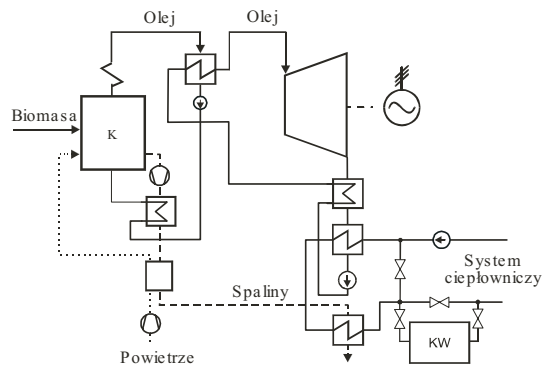
Rys. 2. Schemat układu elektrociepłowni z silnikiem gazowym, opalanej gazem ziemnym

Fig. 2. Scheme of the system of CHP plant with gas engine fired with natural gas



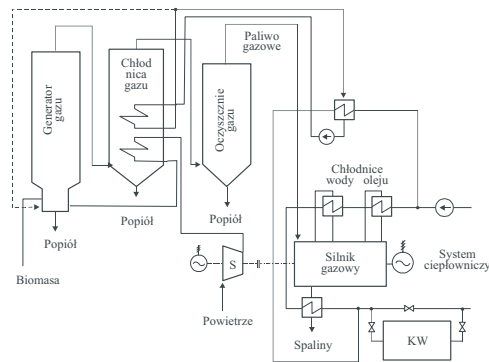
Rys. 3. Schemat układu elektrociepłowni z turbiną parową przeciwpłazną, opalanej biomasą

Fig. 3. Scheme of the system of CHP plant with back-pressure steam turbine fired with biomass



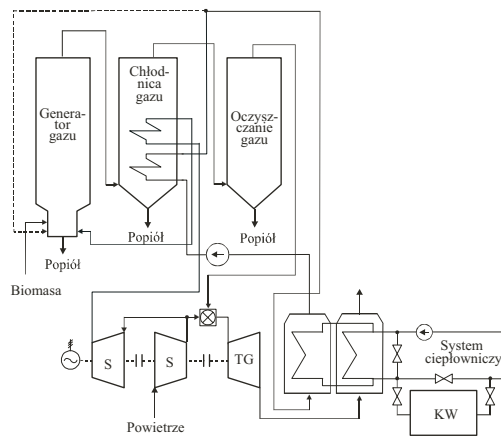
Rys. 4. Schemat układu elektrociepłowni ORC, opalanej biomasą

Fig. 4. Scheme of the system of CHP plant with ORC turbine fired with biomass



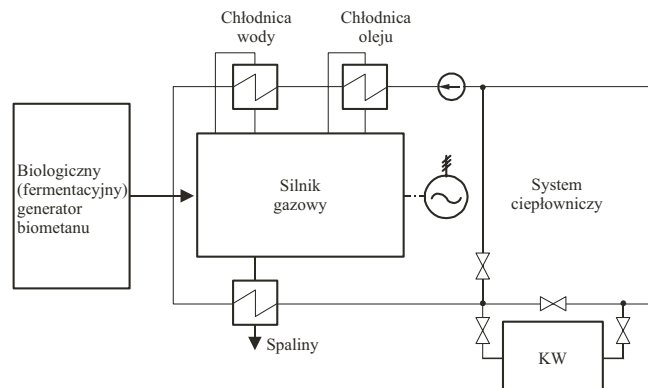
Rys. 5. Schemat układu elektrociepłowni z silnikiem gazowym, zintegrowanej ze zgazowaniem biomas

Fig. 5. Scheme of the system of CHP plant with gas engine integrated with biomass gasification



Rys. 6. Schemat układu elektrociepłowni z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym, zintegrowanej ze zgazowaniem biomas

Fig. 6. Scheme of the system of CHP plant with simple cycle gas turbine integrated with biomass gasification



Rys. 7. Schemat układu elektrociepłowni z silnikiem gazowym, zintegrowanej z biologicznym generatorem biometanu

Fig. 7. Scheme of the system of CHP plant with gas engine integrated with biological biomethan generator

2. Analiza efektywności energetycznej

Jako podstawowe kryterium oceny efektywności energetycznej skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, w pracy, przyjęto względną oszczędność energii pierwotnej (*Primary Energy Savings – PES*), uzyskiwaną dzięki zastosowaniu tej technologii, w porównaniu z wytwarzaniem rozdzielonym. Jako kryteria dodatkowe charakteryzujące efektywność energetyczną skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła wyznaczono również: średnioroczną sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu, średnioroczną sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu, średnioroczną sprawność ogólną (energetyczną) oraz średnioroczny wskaźnik skojarzenia [8]. Wyniki obliczeń tych wielkości dla analizowanych układów elektrociepłowni podano w tabeli 1. Przy wyznaczaniu względnej oszczędności energii pierwotnej przyjęto następujące wartości referencyjne sprawności wytwarzania energii elektrycznej w produkcji rozdzielonej (w elektrowni) $\eta_{eo} = 25\%$ i ciepła (w kotłowni) $\eta_{co} = 80\%$.

3. Analiza efektywności ekonomicznej

Dla wybranych do analizy układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła małej mocy opalanych gazem ziemnym oraz wykorzystujących energię chemiczną biomasy wykonano analizę porównawczą ich efektywności ekonomicznej. Jako wielkości charakteryzujące efektywność ekonomiczną poszczególnych układów przyjęto: jednostkowe zdyskontowane koszty wytwarzania energii elektrycznej (k_e) oraz wartość bieżącą netto (*Net Present Value – NPV*), które były wyznaczane za pomocą następujących algorytmów:

TABELA 1. Wyniki obliczeń wielkości charakteryzujących efektywność energetyczną elektrociepłowni małej mocy opalanych gazem ziemnym oraz biomasą

TABLE 1. Results of calculations of quantities characterizing of energy effectiveness of small scale CHP plants fired with natural gas and biomass

Wielkość	Rodzaj technologii (numer rysunku)						
	1	2	3	4	5	6	7
Średnioroczna sprawność wytwarzania energii elektrycznej w skojarzeniu, η_{eec} [%]	31,17	36,00	18,45	14,14	27,43	23,50	27,00
Średnioroczna sprawność wytwarzania ciepła w skojarzeniu, η_{ec} [%]	53,49	48,50	64,00	68,36	54,07	60,60	55,00
Średnioroczna sprawność ogólna, η_c [%]	84,66	84,50	82,45	82,50	81,50	84,10	82,0
Średnioroczny wskaźnik skojarzenia, σ_s	0,583	0,742	0,288	0,206	0,507	0,388	0,491
Względna oszczędność energii pierwotnej (paliwa), PES [%]	17,63	20,29	34,98	29,58	43,60	41,50	43,42

$$k_e = \frac{\sum_{t=m+1}^{t=s} (C_t - H_t)(1+p)^{-t}}{\sum_{t=m+1}^{t=s} A_e(1+p)^{-t}} \quad (1)$$

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^{t=s} (R_t - C_t)(1+p)^{-t} \quad (2)$$

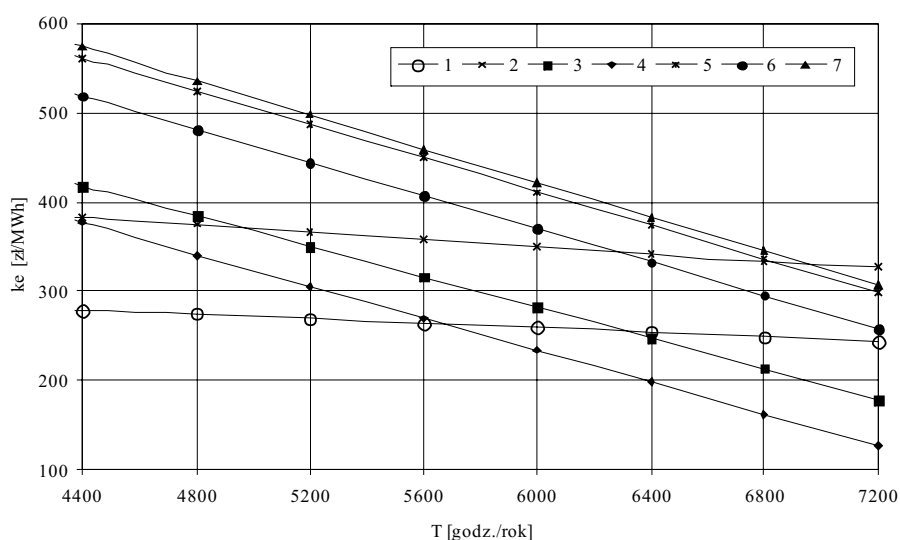
gdzie: A_e – roczna produkcja energii elektrycznej w elektrociepłowni,
 C_t – roczne koszty elektrociepłowni,
 H_t – roczne przychody elektrociepłowni ze sprzedaży ciepła,
 R_t – roczne przychody elektrociepłowni ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła,
 m – liczba lat budowy elektrociepłowni,
 n – liczba lat eksploatacji elektrociepłowni,
 p – stopa dyskontowa,
 $s = m + n$ – liczba lat cyklu ekonomicznego elektrociepłowni.

Obliczenia tych wielkości wykonano przyjmując jako dane wejściowe wielkości charakteryzujące efektywność energetyczną poszczególnych układów (tab. 1) oraz:

✧ jednostkowe nakłady inwestycyjne elektrociepłowni: z turbiną parową przeciwprężną 16 400 zł/kW, z obiegiem ORC 16 100 zł/kW, z silnikiem gazowym (zintegrowanej ze zgazowaniem biomasy) 16 200 zł/kW, z turbiną gazową (zintegrowaną ze zgazowaniem biomasy) 18 500 zł/kW oraz z silnikiem gazowym (zintegrowanej z biologicznym generatorem gazu) 16 500 zł/kW,

- ✧ okres eksploatacji elektrociepłowni: z silnikiem gazowym 15 lat, z obiegiem ORC i turbiną gazową 20 lat oraz turbiną parową 25 lat,
- ✧ cenę sprzedaży energii elektrycznej z uwzględnieniem przychodów za świadectwa pochodzenia 376 zł/MW i cenę sprzedaży ciepła 26,4 zł/GJ,
- ✧ cenę biomasy 0,15 zł/kg,
- ✧ stopę dyskontową 7%.

Na rysunku 8 zilustrowano zależność zdyskontowanych jednostkowych kosztów wytwarzania energii elektrycznej – k_e od czasu wykorzystania mocy zainstalowanej dla rozważanych układów, natomiast rysunek 9 przedstawia zależność wartości bieżącej netto – NPV od czasu wykorzystania mocy zainstalowanej w rozpatrywanych układach.



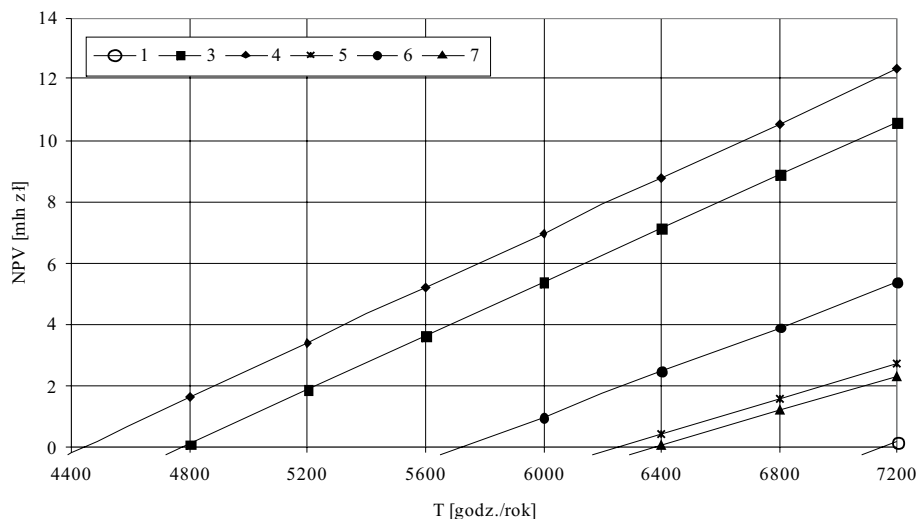
Rys. 8. Zależność zdyskontowanych, jednostkowych kosztów wytwarzania energii elektrycznej (k_e) od czasu wykorzystania mocy zainstalowanej elektrociepłowni (T) (numery krzywych odpowiadają numerom rysunków, na których są przedstawione schematy układów)

Fig. 8. Dependence of the unitary discount electricity generation cost on the time of utilization of nominal power of CHP plant (numbers of curves refer to numbers of figures representing the schemes of CHP plant)

Wnioski

Wykonane wielowariantowe badania symulacyjne efektywności ekonomicznej elektrociepłowni małej mocy opalanych gazem ziemnym oraz wykorzystujących energię biomasy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Ważnym parametrem wpływającym na efektywność ekonomiczną analizowanych układów elektrociepłowni małej mocy jest czas wykorzystania mocy zainstalowanej. Wartości minimalne tego czasu (T_{\min}), przy których poszczególne układy uzyskują dodatnią efektywność ekonomiczną (dodatnią wartość NPV) podano poniżej w nawiasach. Z pun-



Rys. 9. Zależność wartości bieżącej netto (*NPV*) od czasu wykorzystania mocy zainstalowanej elektrociepłowni (*T*) (numery krzywych odpowiadają numerom rysunków, na których są przedstawione schematy układów)

Fig. 9. Dependence of NPV on the time of utilization of nominal power of CHP plant (numbers of curves refer to numbers of figures representing the schemes of CHP plant)

ktu widzenia efektywności ekonomicznej analizowane układy elektrociepłowni można uszeregować w następującej kolejności: układ z turbiną ORC ($T_{\min} = 4430$ godz./rok), układ z turbiną parową przeciwną ($T_{\min} = 4770$ godz./rok), układ z turbiną gazową, pracującą w obiegu prostym, zintegrowany ze zgazowaniem biomasy ($T_{\min} = 5725$ godz./rok), układ z silnikiem gazowym, zintegrowany ze zgazowaniem biomasy ($T_{\min} = 6250$ godz./rok), układ z silnikiem gazowym, zintegrowany z biologicznym generatorem biometanu ($T_{\min} = 6400$ godz./rok), układ z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym opalany gazem ziemnym ($T_{\min} = 7150$ godz./rok) i układ z silnikiem gazowym opalany gazem ziemnym ($T_{\min} > 7200$ godz./rok),

2. Dla czasu wykorzystania mocy zainstalowanej $T = 6400$ godz./rok (praca całoroczna) jednostkowe, zdyskontowane koszty wytwarzania energii elektrycznej dla analizowanych układów elektrociepłowni wynoszą (rys. 8): układ z turbiną ORC opalany biomasą – 198 zł/MWh, układ z turbiną parową przeciwną opalany biomasą – 247 zł/MW·h, układ z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym, opalany gazem ziemnym – 254 zł/MW·h, układ z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym, zintegrowany ze zgazowaniem biomasy – 332 zł/MW·h, układ z silnikiem gazowym opalany gazem ziemnym – 341 zł/MW·h, układ z silnikiem gazowym zintegrowany ze zgazowaniem biomasy – 374 zł/MW·h i układ z silnikiem gazowym zintegrowany z biologicznym generatorem biometanu – 383 zł/MW·h. Natomiast dla czasu wykorzystania mocy zainstalowanej $T = 4400$ godz./rok (praca tylko w sezonie grzewczym) jednostkowe, zdyskontowane koszty wytwarzania energii elektrycznej dla analizowanych układów elektrociepłowni wynoszą: układ z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym, opa-

lany gazem ziemnym – 279 zł/MW·h, układ z turbiną ORC opalany biomasą – 376 zł/MW·h, układ z silnikiem gazowym opalany gazem ziemnym – 383 zł/MW·h, układ z turbiną parową przeciwprężną opalany biomasą – 418 zł/MW·h, układ z turbiną gazową pracującą w obiegu prostym, zintegrowany ze zgazowaniem biomasy – 518 zł/MW·h, układ z silnikiem gazowym zintegrowany ze zgazowaniem biomasy – 561 zł/MW·h i układ z silnikiem gazowym zintegrowany z biologicznym generatorem biometanu – 574 zł/MW·h

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy zamawiany.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 26.09.2007 r. w sprawie sposobu obliczania danych podanych we wniosku o wydanie świadectwa pochodzenia z kogeneracji oraz szczegółowego zakresu obowiązku uzyskania i przedstawienia do umorzenia tych świadectw, uiszczania opłaty zastępczej i obowiązku potwierdzania danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w wysokosprawnej kogeneracji. Dz.U. z 2007 r., nr 185, poz. 1314.
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 3.11.2006 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej oraz zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii. Dz.U. z 2006 r., nr 205, poz. 1510.
- [3] ŚCIAŻKO M., ZUBAŁA J., PRONOBIS M., 2006 – Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową. Energetyka nr 3, s. 207–220.
- [4] BINI R., DUVIA A., SCHWARZ A., GAIA M., BERTUZZI P., RIGHINI W., 2004 – Operational Results of the First Biomass CHP Plant in Italy Based on Organic Rankine Cycle Turbogenerator and Overview of a Number of Plants in Operation in Europe Since 1998. Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome, p. 1716–1721.
- [5] BOLHAR-NORDENKAMPF M., PRÖLL T., AICHERNIG C., HOFBAUER H., 2004 – Techno Economic Assessment Of Combined Heat And Power Production From Biomass, Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome, p. 2105–2108.
- [6] TEISLEV B., 2004 – Wood-Chips Updraft Gasifier Based Combined Heat and Power. Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome, p. 1772–1774.
- [7] JUNGMEIER G., SCHWAIGER H., PANOUTSOU C., HILLRING B., FLYKTMAN M., GERARD MM., KRAJNE N., MIHAILOV N., AKGUN F., BRUTON C., 2004 – Survey of Existing CHP Plants With Solid Biomass in Europe. Proceedings of Second World Biomass Conference, Rome, p. 1741–1744.
- [8] ZAPOROWSKI B., 2007 – Podstawy wyznaczania ilości energii elektrycznej wytworzonej w skjarzeniu o wysokiej sprawności. Energetyka, Zeszyt tematyczny XV, s. 37–41.

Bolesław ZAPOROWSKI, Radosław SZCZERBOWSKI, Robert WRÓBLEWSKI

Economic effectiveness analysis of distributed combined heat and power plants fired with natural gas and biomass

Abstract

The paper presents the analysis of economic effectiveness of small scale combined heat and power (CHP) plants fired with natural gas and using biomass energy. There are analysed the following of small scale CHP plants: a) CHP plant with gas turbine fired with natural gas, b) CHP plant with gas engine fired with natural gas, c) CHP plant with back-pressure steam turbine integrated with direct biomass combustion, d) CHP plant with Organic Rankine Cycle (ORC) integrated with direct biomass combustion, e) CHP plant with gas engine integrated with biomass gasification, f) CHP plant with gas turbine integrated with biomass gasification, and g) CHP plant with gas engine integrated with biological biomethan generator. For these type of CHP plants there are determined the quantities characterizing their economic effectiveness.

KEY WORDS: natural gas, biomass, combined heat and power plant, economic effectiveness