

Jacek Marecki

Politechnika Gdańska

PROBLEMY ROZWOJU SKOJARZONEGO WYTWARZANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPŁA

W pracy przedstawiono obecny stan skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w Polsce na tle tendencji światowych oraz omówiono główne układy technologiczne, pozwalające na takie wytwarzanie energii. Opisano, możliwe do uzyskania, oszczędności paliwa i warunki opłacalności tego typu procesu.

WSTĘP

Do podstawowych zadań układów skojarzonych należy pokrywanie zapotrzebowania na ciepło występującego zarówno u odbiorców komunalnych, jak i przemysłowych. Równocześnie w układach skojarzonych wytwarza się energię elektryczną, której produkcja jest ściśle związana z produkcją ciepła. Ważną zaletą układów skojarzonych jest ich wysoka efektywność ekonomiczna oraz zdolność do spełniania w większym stopniu stale rosnących wymagań z zakresu ochrony środowiska naturalnego w porównaniu z układami rozdzielonymi. Z tego względu należy się spodziewać, że układy skojarzone będą miały duże znaczenie w kształtowaniu systemów zasilania w energię, szczególnie w krajach dokonujących przeobrażeń w kierunku gospodarki rynkowej.

Podstawowe oszczędności energetyczne, występujące w układach skojarzonych, polegają na pełniejszym wykorzystaniu energii dostarczonej w paliwie lub inaczej ujmując, zminimalizowaniu ciepła odpadowego, które towarzyszy rozdzielonemu wytwarzaniu ciepła użytecznego i energii elektrycznej. Przy ocenie tych oszczędności należy mieć na względzie zarówno możliwości fizyczne, jak i ograniczenia techniczne i ekonomiczne, towarzyszące gospodarce skojarzonej.

Możliwości fizyczne są związane z parametrami termodynamicznymi nośnika energetycznego, wykorzystywanego w urządzeniach do realizacji skojarzone-

go wytwarzania. Ograniczenia techniczne wynikają przede wszystkim z różnych przebiegów charakterystyk czasowych zapotrzebowania na moc cieplną i elektryczną u odbiorców, a także ze znikomych możliwości magazynowania energii, zwłaszcza elektrycznej. Natomiast ograniczenia ekonomiczne muszą ujmować konkretną sytuację gospodarczą z uwzględnieniem cen paliw i jednostkowych nakładów inwestycyjnych oraz innych parametrów ekonomicznych, a także konkurencyjności układów skojarzonych w stosunku do rozdzielonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła.

1. OBECNY STAN SKOJARZONEGO WYTWARZANIA ENERGII W POLSCE

Polska należy do krajów, w których udział układów skojarzonych w łącznej produkcji ciepła w źródłach scentralizowanych znajduje się na średnim poziomie. W Holandii osiąga on ok. 90%, a w Niemczech – ok. 60%; natomiast we Francji udział ten jest stosunkowo niski i wynosi tylko ok. 15%.

W tabl. 1 podano podstawowe informacje dotyczące produkcji ciepła netto w źródłach scentralizowanych w Polsce w 1993 r. wg statystyki opublikowanej przez Centrum Informatyki Energetyki w 1994 r. Jak wynika z tabl. 1, udziały elektrociepłowni zawodowych i przemysłowych w łącznej produkcji ciepła wynosiły po ok. 30%. Pozostałe ok. 40% ciepła wyprodukowano w ciepłowniach zawodowych, przemysłowych i komunalnych.

Udziały ciepła wytworzonego w układach skojarzonych wynosiły odpowiednio:

- w energetyce zawodowej – ok. 74% ciepła wytworzonego w elektrociepłowniach i elektrowniach zawodowych i ok. 63% łącznej ilości ciepła wytwarzanego we wszystkich źródłach scentralizowanych, należących do energetyki zawodowej;
- w energetyce przemysłowej – ok. 75% ciepła wytworzonego w elektrociepłowniach przemysłowych i ok. 45% łącznej ilości ciepła wytworzonego w całej energetyce przemysłowej.

Produkcja energii elektrycznej w układach skojarzonych wynosiła w tym samym okresie:

- w elektrociepłowniach i elektrowniach zawodowych – ok. 13,1 TW·h, tj. ok. 11% łącznej produkcji energii elektrycznej w energetyce zawodowej;
- w elektrociepłowniach przemysłowych – ok. 6,4 TW·h, tj. ok. 75% łącznej produkcji energii elektrycznej w energetyce przemysłowej.

Produkcja ciepła netto w źródłach scentralizowanych w 1993 r.

Rodzaj scentralizowanych źródeł ciepła	Produkcja ciepła netto			
	PJ/rok	%	%	%
Elektrociepłownie i elektrownie zawodowe				} 29,3
• w skojarzeniu	149,8	74,4	63,2	
• bez skojarzenia	18,9	9,4	8,0	
• w kotłach ciepłowniczych	32,7	16,2	13,8	
Ciepłownie zawodowe	35,6	–	15,0	5,2
Razem energetyka zawodowa	237,0	–	100,0	34,5
Elektrociepłownie przemysłowe:				} 30,8
• w skojarzeniu	158,0	74,8	44,8	
• bez skojarzenia	53,2	25,2	15,1	} 20,6
Ciepłownie przemysłowe	138,1	–	39,2	
Koksownie przemysłowe	3,2	–	0,9	
Razem energetyka przemysłowa	352,5	–	100,0	51,4
Ciepłownie komunalne	96,8	–	–	14,1
Ogółem	686,3	–	–	100,0

Tablica 2

Struktura produkcji ciepła w źródłach scentralizowanych w 1993 r.

Rodzaj scentralizowanych źródeł ciepła	Udział w łącznym zużyciu paliwa na produkcję ciepła %			
	paliwa stałe	olej opałowy	gaz	inne
Elektrociepłownie, elektrownie i ciepłownie zawodowe	98,2	1,72	0,04	0,04
Elektrociepłownie przemysłowe	74,0	12,4	5,7	7,9
Ciepłownie przemysłowe	89,7	3,3	5,0	2,0
Ciepłownie komunalne	99,5	0,2	0,3	–

W tablicy 2 przedstawiono natomiast strukturę produkcji ciepła w źródłach scentralizowanych wg tej samej statystyki CIE z 1994 r. Jak wynika z powyższej tablicy, dominujący udział w łącznym zużyciu paliw na produkcję ciepła miały paliwa stałe, których udział wynosił od 74% do 99,5%. Znaczący udział innych rodzajów paliw występował tylko w elektrociepłowniach przemysłowych.

wych, w których 12,4% paliwa zużytego na produkcję ciepła stanowił olej opałowy. Udział gazu w elektrociepłowniach zawodowych był minimalny, a w elektrociepłowniach i ciepłowniach przemysłowych nie przekraczał 5–6%.

2. UKŁADY TECHNOLOGICZNE DO SKOJARZONEGO WYTWARZANIA ENERGII

Obecnie w ramach gospodarki skojarzonej możliwe są do wykorzystania następujące technologie wytwarzania:

- elektrociepłownia z turbiną parową: przeciwprężną, upustową oraz turbiną ciepłowniczą równoległą do turbiny głównej kondensacyjnej;
- elektrociepłownia wyposażona w turbiny gazowe z odzyskiem ciepła odpadowego;
- elektrociepłownia z kombinowanym układem gazowo-parowym;
- mała elektrociepłownia z silnikiem spalinowym (mały blok ciepłowniczy);
- ogniwa paliwowe z wykorzystaniem ciepła odpadowego.

Elektrociepłownia z turbiną przeciwprężną charakteryzuje się tym, że wytwarzana w niej moc elektryczna jest mocą wymuszoną, ściśle uzależnioną od zapotrzebowania na moc cieplną z wylotu turbiny. Pożądane jest, aby charakterystyka zapotrzebowania na moc elektryczną miała przebieg w czasie zbliżony do charakterystyki zapotrzebowania na moc cieplną. Podobne zależności występują w przypadku turbiny gazowej z pełnym wykorzystaniem ciepła spalin wylotowych, a także w przypadku małych bloków ciepłowniczych oraz ogniw paliwowych.

Innym rozwiązaniem elektrociepłowni parowej są układy z turbinami upustowymi: z turbiną upustowo-przeciwprężną i upustowo-kondensacyjną. W tych przypadkach stosunek wytwarzanej mocy elektrycznej do mocy cieplnej może się zmieniać w pewnym zakresie. Możliwe są też takie rozwiązania turbiny, w których przy pracy kondensacyjnej cały strumień pary dolotowej rozpręża się do ciśnienia panującego w skraplaczu.

Szczególne miejsce wśród układów skojarzonych, wyposażonych w turbiny parowe, zajmują elektrownie kondensacyjne, w których – w zależności od stopnia modyfikacji turbiny – możliwy jest pobór mocy cieplnej do celów ciepłowniczych. W krajach zachodnich spotykane są także układy, w których para z kolektora, zasilanego z wylotu średnioprężnej części turbiny, kierowana jest równoległe do niskoprężnej, kondensacyjnej części turbiny oraz do oddzielnej przeciwprężnej turbiny ciepłowniczej. We wszystkich elektrociepłowniach z turbinami parowymi poborowi mocy cieplnej z turbiny towarzyszy określony ubytek mocy elektrycznej w porównaniu z elektrownią wyposażoną w turbiny kondensacyjne na takie same parametry pary dolotowej.

Współczesne duże turbiny gazowe charakteryzują się wysoką temperaturą spalin wylotowych. Dzięki wykorzystaniu ciepła tych spalin możliwe jest nie tylko podgrzewanie wody sieciowej, ale również produkcja pary wodnej do celów technologicznych. Jako paliwa w układach z turbiną gazową używa się różnego rodzaju gazów palnych, jak również lekkiego oleju opałowego. W przyszłości spodziewany jest szerszy rozwój układów kombinowanych gazowo-parowych. Jeżeli układy te będą zintegrowane ze zgazowaniem węgla, pozwoli to również na wykorzystanie jako paliwa gazu pochodzącego z procesu zgazowania. Układy kombinowane gazowo-parowe, podobnie jak małe bloki ciepłownicze, odznaczają się wyższą sprawnością wytwarzania mocy elektrycznej w stosunku do prostych układów z turbiną gazową.

W przypadku małych bloków ciepłowniczych wykorzystuje się również wysokotemperaturowe ciepło odpadowe, a także ciepło niskotemperaturowe, pochodzące z chłodzenia cylindra silnika napędowego i ciepło pochodzące z chłodzenia oleju smarującego. Ciepło niskotemperaturowe zapewnia podgrzewanie wody do ok. 90°C. Poprzez rozdzielenie układów ciepła wysoko- i niskotemperaturowego możliwe jest również (poza podgrzewaniem wody sieciowej) wytwarzanie pary wodnej.

Silnikami napędowymi w małych blokach ciepłowniczych są przeważnie silniki spalinowe. W układach tych, podobnie jak w przypadku turbin gazowych, mogą być wykorzystane różne rodzaje paliw: olej napędowy, gaz ziemny, gaz z oczyszczalni ścieków i ze składowisk odpadów, biogaz i inne. Małe bloki ciepłownicze charakteryzują się niewielkimi mocami jednostkowymi – w zakresie od kilkudziesięciu, a częściej kilkuset kJ/s do kilku MJ/s. W niektórych krajach zachodnich, zwłaszcza w Niemczech, znalazły one dość szerokie rozpowszechnienie. Niewątpliwą zaletą tych układów jest możliwość ich instalowania w bezpośredniej bliskości odbiorców. Mogą też stanowić indywidualne źródła zasilania dla większych obiektów użyteczności publicznej, takich jak np. centra handlowe.

W przyszłościowych rozwiązaniach układów skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej należy się spodziewać także wykorzystania ogniw paliwowych, a w szczególności ogniw z elektrolitem w postaci kwasu fosforowego oraz ogniw wysokotemperaturowych. Przewiduje się, że takie właśnie rozwiązania będą charakteryzować się największą sprawnością wytwarzania mocy elektrycznej.

3. OSZCZĘDNOŚĆ PALIWA PRZY SKOJARZONYM WYTWARZANIU ENERGII

Główną korzyścią wynikającą z wprowadzania układów skojarzonych jest oszczędność paliwa, a tym samym energii chemicznej, dostarczanej w paliwie,

w porównaniu z układem rozdzielonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej. Porównuje się przy tym układ skojarzony realizowany w elektrociepłowni, w którym oba rodzaje energii wytwarzane są jednocześnie, z układem rozdzielonym, w którym energia elektryczna wytwarzana jest w elektrowni kondensacyjnej, natomiast ciepło w oddzielnym obiekcie – ciepłowni rejonowej lub przemysłowej. Warunkiem porównywalności obu rozwiązań jest, aby efekty produkcyjne (mierzone zazwyczaj w skali roku), a więc ilości produkowanego ciepła były w takich rozwiązaniach jednakowe.

Przyjmując średnią wartość wskaźnika skojarzenia w elektrociepłowniach i elektrowniach zawodowych w skali całego kraju w wysokości 0,3, a w elektrociepłowniach przemysłowych – w wysokości 0,15 oraz zakładając odpowiednie wartości sprawności tych obiektów, można różnicę rocznego zużycia paliwa umownego na korzyść gospodarki skojarzonej w obrębie źródeł energetyki zawodowej oszacować na poziomie 3,6 mln t p. u./rok, natomiast oszczędność paliwa w zakresie energetyki przemysłowej – na poziomie 2,1 mln t p. u./rok.

Oszczędności te mogłyby znacznie wzrosnąć, gdyby dzięki przedsięwzięciom modernizacyjnym w obrębie systemów ciepłowniczych udało się podnieść udział energii cieplnej dostarczanej do tych systemów ze źródeł skojarzonych do poziomu 75%, a także zwiększyć w dalszej perspektywie czasowej przeciętną wartość wskaźnika skojarzenia do poziomu 0,35, zwłaszcza w elektrociepłowniach przemysłowych.

Działania te powinny być prowadzone kompleksowo i uwzględniać wszelkie możliwości ograniczania popytu na ciepło grzejne, przede wszystkim na drodze poprawy izolacyjności przegród budowlanych i docieplania istniejących budynków. Pozwoliłoby to zmniejszyć jednostkowe zapotrzebowanie na ciepło w budownictwie mieszkaniowym docelowo do poziomu $150 \text{ kW}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{rok})$, co w konsekwencji prowadziłoby także do zmniejszenia zapotrzebowania na ciepło ze źródeł skojarzonych, zasilających systemy ciepłownicze. Biorąc zatem w pierwszej kolejności pod uwagę możliwość redukcji jednostkowego zapotrzebowania na ciepło i uwzględniając wielkość ogrzewanej powierzchni lokali mieszkalnych w Polsce, można ocenić, że wymagana produkcja ciepła (przy pominięciu wzrostu substancji mieszkaniowej) w sferze energetyki zawodowej powinna się zmniejszyć do ok. 180 PJ/rok. Zakładając natomiast wzrost udziału źródeł skojarzonych i zwiększenie wskaźnika skojarzenia w elektrociepłowniach, można ocenić docelową oszczędność paliwa dzięki gospodarce skojarzonej w źródłach energetyki zawodowej na poziomie 3,7 mln t p. u./rok.

W wyniku szeroko zakrojonych prac modernizacyjnych i restrukturyzacyjnych sektora energetyki przemysłowej można się spodziewać docelowego wzrostu udziału źródeł skojarzonych w ogólnej produkcji ciepła do poziomu ok. 55%. Przy założeniu, że nastąpiłby jednocześnie wzrost wskaźnika skojarzenia do wartości ok. 0,35, dałoby to oszczędność w zużyciu paliwa w wysokości ok. 5,4 mln t p. u. przy nie zmienionym poziomie ogólnej produkcji ciepła w źródłach przemysłowych.

Łączny efekt energetyczny wprowadzania gospodarki skojarzonej w rozważanym zakresie osiągnąłby zatem ok. 9,1 mln t p. u./rok. Należy przy tym podkreślić, że zakres ten odpowiadałby roli, jaką obecnie gospodarka skojarzona pełni w przodujących krajach europejskich. Dla porównania – wyznaczony przy podobnych założeniach efekt energetyczny wprowadzenia gospodarki skojarzonej w Niemczech wyniósł ok. 10 mln t p. u./rok, przy czym planami modernizacyjnymi objęto głównie ciepłownie na terenie byłej NRD, nie uwzględniono natomiast zmian w zakresie energetyki przemysłowej.

Warto przy tym podkreślić, iż wyznaczonemu efektowi energetycznemu w postaci zaoszczędzonego paliwa towarzyszy w sposób naturalny bardzo korzystny efekt ekologiczny, związany ze zmniejszeniem emisji zanieczyszczeń szkodliwych dla środowiska.

4. OPŁACALNOŚĆ SKOJARZONEGO WYTWARZANIA ENERGII

Opłacalność skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej zależy głównie od ilości zaoszczędzonego paliwa ΔF , którą oblicza się ze wzoru

$$\Delta F = F_{EK} + F_{KC} - F_{EC},$$

gdzie:

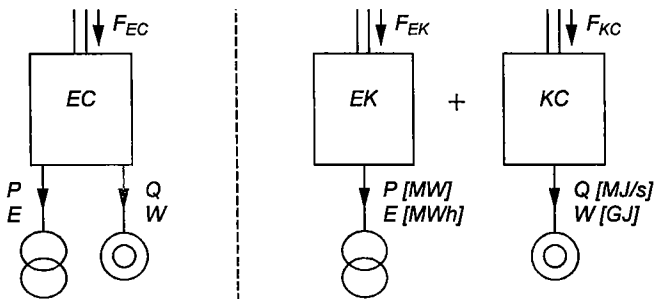
- F_{EK} – zużycie paliwa na wytwarzanie energii elektrycznej E w równoważnej elektrowni kondensacyjnej w systemie elektroenergetycznym,
- F_{KC} – zużycie paliwa na wytwarzanie energii ciepłej W w równoważnej kotłowni ciepłowniczej,
- F_{EC} – zużycie paliwa na skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej E i ciepłej W w rozpatrywanej elektrociepłowni.

Na rys. 1 przedstawiono schemat porównania układu skojarzonego wytwarzania energii z równoważnym układem rozdzielonym. Zaznaczono na nim wyżej wymienione ilości zużywanego paliwa oraz wytwarzaną moc i energię, odpowiednio elektryczną i ciepłą, a mianowicie:

- w elektrociepłowni (EC):
moc elektryczną P i energię E ,
moc ciepłą Q i energię W ,
- w elektrowni kondensacyjnej (EK):
moc elektryczną P i energię E ,
- w kotłowni ciepłowniczej (KC):
moc ciepłą Q i energię W .

Oprócz różnicy w zużyciu paliwa ΔF należy przy określaniu opłacalności układów skojarzonych wziąć pod uwagę różnicę kosztów stałych, które zależą od nakładów inwestycyjnych w porównywanych obiektach energetycznych. Nakłady te są z reguły wyższe w przeliczeniu na jednostkę mocy w stosunku

do nakładów na budowę równoważnej elektrowni i równoważnej kotłowni ciepłowniczej.



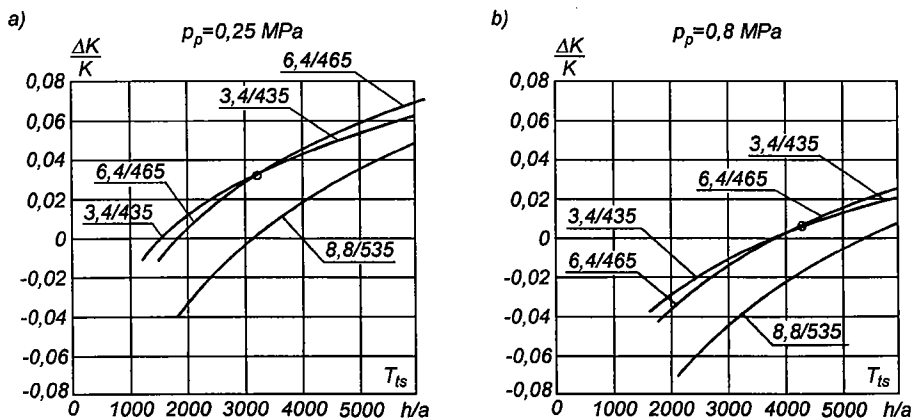
Rys. 1. Schemat porównania układu skojarzonego wytwarzania energii z równoważnym układem rozdzielonym

Wobec tego warunek opłacalności skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej można sformułować za pomocą różnicy całkowitych kosztów rocznych ΔK , określonej wzorem

$$\Delta K = K_{EK} + K_{KC} - K_{EC},$$

gdzie:

- K_{EK} – koszty roczne wytwarzania energii elektrycznej w równoważnej elektrowni kondensacyjnej w systemie elektroenergetycznym;
- K_{KC} – koszty roczne wytwarzania energii ciepłej w równoważnej kotłowni ciepłowniczej;
- K_{EC} – koszty roczne skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej w rozpatrywanej elektrociepłowni.



Rys. 2. Opłacalność elektrociepłowni przeciwpięprężnej z dwoma kotłami po 32 t/h, w zależności od czasu użytkowania szczytowego zapotrzebowania na ciepło: a) przy $p_p = 0,25$ MPa; b) przy $p_p = 0,8$ MPa

Skojarzone wytwarzanie energii jest więc opłacalne, jeśli $\Delta K > 0$. Na rys. 2 pokazano zależność względnej różnicy kosztów $\Delta K/K$ od czasu użytkowania T_{is} szczytowego zapotrzebowania na moc cieplną w modelowej elektrociepłowni przemysłowej, wyposażonej w 2 kotły parowe o wydajności po 32 t/h i jedną turbinę przeciwprężną odpowiedniej mocy, przy różnych zestawach parametrów dolotowych p_0 , t_0 i przeciwcisnieniu p_p odpowiednio równym 0,25 MPa i 0,8 MPa.

Z wykresów tego typu można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Opłacalność skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła rośnie ze wzrostem czasu użytkowania T_{is} .
2. Graniczna wartość czasu użytkowania, przy której $\Delta K = 0$, rośnie ze wzrostem parametrów dolotowych i wylotowych turbiny przeciwprężnej.
3. Optymalne parametry pary dolotowej w rozpatrywanym przykładzie wynoszą 3,4 MPa, 435°C przy małym czasie użytkowania T_{is} , a dla większych wartości T_{is} wzrastają do 6,4 MPa, 465°C.

W podobny sposób można przeanalizować wpływ nakładów inwestycyjnych i cen paliwa na opłacalność elektrociepłowni, która maleje ze wzrostem tych nakładów, a rośnie ze wzrostem cen paliwa.

PROBLEMS OF PROGRESS IN A COMBINED GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY AND HEAT

Summary

The present state of progress in the combined generation of electrical energy and heat in Poland in relation to world trends was discussed. The main technological systems which allow such generation were presented. Possible fuel savings and conditions for attaining profits in this kind of generation were described.

ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ТЕПЛА

Краткое содержание

В работе представлен современный уровень комбинированного производства электроэнергии и тепла в Польше по сравнению с мировыми тенденциями и обсуждены главные технологические системы, дающие возможность такого производства электроэнергии. Описаны возможные сбережения топлива и условия рентабельности в таком процессе.