

Tadeusz CHMIELNIAK

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Politechnika Śląska

ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice

chmielniak@rie5.ise.polsl.gliwice.pl

NOWE TECHNOLOGIE ENERGETYCZNE. ZAKRES BADAŃ

Streszczenie. W artykule omówiono możliwe kryteria klasyfikacji technologii energetycznych. Wskazano na możliwe kierunki ich rozwoju. Przedstawiono niektóre kierunki badań w dziedzinie dyscyplin naukowych wspierających doskonalenie istniejących technologii i warunkujących powstanie nowych rozwiązań.

NEW POWER ENGINEERING TECHNOLOGIES

Summary. This paper present some classification criteria of power engineering technology. New development directions of this technologies has been shown.

1. Wprowadzenie

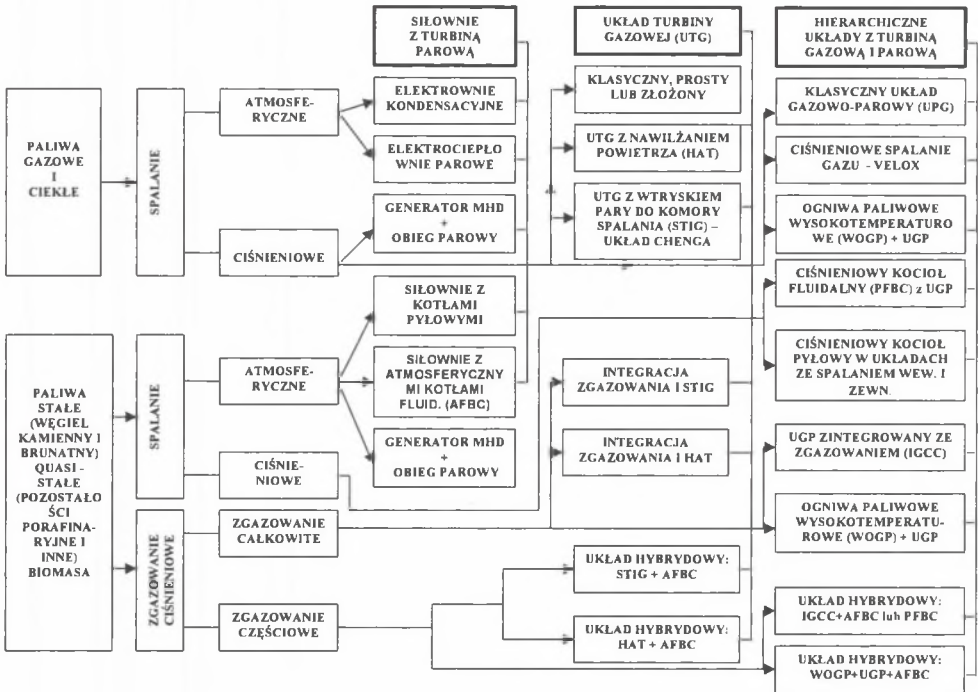
Nowe technologie energetyczne (w bardzo ogólnym sensie) są ważnym przedmiotem zainteresowań Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej. Badania w tym zakresie zostały wzbogacone po utworzeniu Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki. Zdobyte doświadczenia badawcze, nagromadzone nowe informacje oraz efekty działalności przemysłowej umożliwiły uruchomienie nowych specjalności i kierunków dyplomowania dotyczących technologii energetycznych. Instytut był głównie zaangażowany w uruchomienie i prowadzenie kształcenia w specjalności: „Czyste technologie energetyczne”. Równocześnie podjęto nowe badania ukierunkowane nie tylko na tworzenie metodologii analizy techniczno-ekonomicznej i ekologicznej, ale także służące wzbogacaniu danych fizycznych o procesach konwersji charakterystycznych dla nowych i modernizowanych technologii (nowe bloki energetyczne dużej mocy, układy hierarchiczne, ogniwa paliwowe, zagadnienia monitorowania i diagnostyki itd.).

W artykule przedstawiono ogólną charakterystykę kierunków rozwoju technologii energetycznych oraz próbę naszkicowania tematyki badawczej, która wydaje się być ważna dla dalszego rozwoju wybranych dziedzin technologii energetycznych, a także dla prowadzenia i kształcenia w tym zakresie.

2. Kierunki rozwoju technologii energetycznych

Istnieje wiele kryteriów klasyfikacji technologii energetycznych. Jednym z nich może być rodzaj paliw. Wyróżniamy więc technologie wykorzystujące paliwa węglowe, węglowodorowe (gazowe i ciekłe) i jądrowe oraz technologie konwersji odnawialnych

źródeł energii. Sposób konwersji paliw w końcową postać energii (ciepło, energia elektryczna) może być bezpośredni lub obejmować wiele ogniw. Przykładem konwersji bezpośredniej jest zamiana energii chemicznej paliwa w energię elektryczną w ogniwach paliwowych i energii promieniowania elektromagnetycznego słońca w energię elektryczną w ogniwach fotowoltaicznych. Zamiana energii chemicznej paliw organicznych w energię elektryczną w elektrowniach ciepłych obejmuje spalanie (generacja ciepła),



Rys. 1. Rodzaje technologii energetycznych (paliwa organiczne)

Fig. 1. Classification of power engineering technologies

przemianę ciepła – energia mechaniczna (w silniku ciepłym) oraz przemianę energia mechaniczna – energia elektryczna (generator elektryczny). Łańcuch przemian jest długi i o efektywności całego procesu decyduje sprawność poszczególnych modułów konwersji. Ciągłe doskonalenie silników ciepłych (turbin parowych i gazowych), kotłów, generatorów elektrycznych i innych maszyn i urządzeń oraz układów automatyki i sterowania jest podstawą budowy instalacji energetycznych (działających zgodnie z różnymi koncepcjami obiegów, układów otwartych) nowych generacji, których cechą szczególną jest nie tylko wysoka sprawność i niskie obciążenie środowiska ale również zwiększona elastyczność i niezawodność ruchu. Rysunek 1 ilustruje ogólną strukturę technologii utilizingujących paliwa organiczne. Podstawą klasyfikacji jest rodzaj paliwa oraz

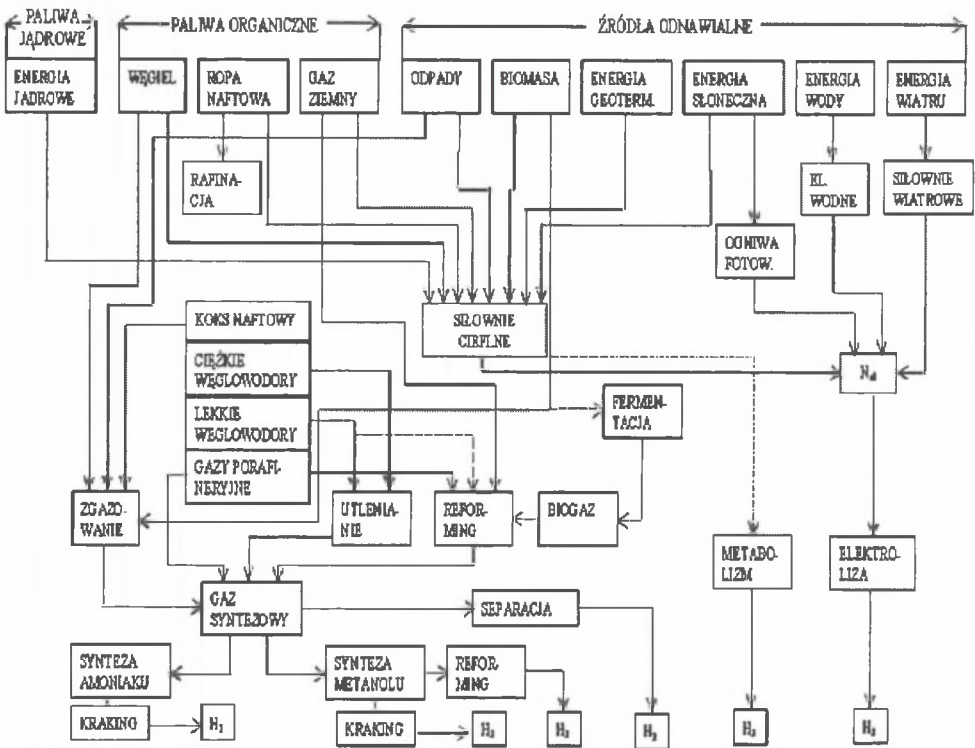
przyjęty układ cieplny turbiny parowej i gazowej. Paliwa gazowe i ciekłe mogą być spalane w elektrowniach i elektrociepłowniach. Najczęściej są jednak wykorzystywane w układach gazowo-parowych, które są współcześnie technologiami energetycznymi o największej sprawności energetycznej (58-60 % w odniesieniu do wartości opałowej). W niedalekiej przyszłości ważne znaczenie uzyskają zapewne wysokotemperaturowe ogniwa paliwowe w układach z turbinami gazowymi i parowymi. W układach klasycznych autonomiczne układy turbin gazowych znajdują zastosowanie do pokrywania szczytowego zapotrzebowania w systemie energetycznym. Interesujące są próby poprawy ich sprawności przez wprowadzenie nawilżania powietrza przed jego wprowadzeniem do komory spalania (układ HAT) lub budowy układów z wtryskiem do komory spalania pary generowanej w kotle odzyskowym zasilanym mieszaniną spalin i pary z wylotu turbiny (układ Chenga).

Z rysunku 1 wynika, że istnieje bardzo wiele możliwych węglowych technologii energetycznych z turbiną gazową. Pierwsza możliwość generacji takich struktur powstaje przy ciśnieniowym spalaniu węgla w kotłach fluidalnych i pyłowych. Technologia pierwsza, dostępna komercyjnie, jest stosowana głównie dla elektrociepłowni. Rozwiązania z ciśnieniowym spalaniem w kotle pyłowym są sprawdzane w skali półtechnicznej zarówno dla spalania wewnętrznego, jak i zewnętrznego.

Układy hierarchiczne (składające się współcześnie głównie z prostego otwartego układu turbiny gazowej i obiegu turbiny parowej sprzężonych przez kocioł odzyskowy) dopuszczają utylizację różnych paliw. Ciśnieniowe procesy zgazowania węgla, biomasy, pozostałości po przerobieniu ropy naftowej i innych substancji, w tym również odpadów komunalnych, zintegrowane z klasycznym układem gazowo-parowym oraz z wysokotemperaturowymi ogniwami paliwowymi, rys. 1, stanowią bardzo zróżnicowaną grupę technologii o poważnym potencjale dalszego rozwoju. Szczególnie ważną rolę może odegrać ta grupa technologii w procesie zmniejszania emisji CO₂ do atmosfery poprzez sterowanie procesem generacji gazu syntezowego oraz separacji CO₂ [1,2,3]. Zgazowanie częściowe jest podstawą tak zwanych układów hybrydowych [4].

Technologie zaznaczone na rys. 1 nie przedstawiają wszystkich możliwych połączeń i sprzężeń poszczególnych modułów i urządzeń generacji energii elektrycznej i ciepła. Szczególnie interesujące koncepcje mogą być tworzone z wykorzystaniem ogniw paliwowych z turbinami gazowymi (w tym także mikroturbinami), różnych technologii otrzymywania gazu syntezowego i wodoru oraz metanolu.

Zastosowanie wodoru jako paliwa w energetyce jest jedną z podstawowych opcji jej rozwoju w przyszłości (energetyka wodorowa). Możliwe procesy jego produkcji pokazuje rys. 2. Wykorzystanie wodoru to niskie obciążenie środowiska oraz możliwości budowy nowych struktur energetycznych o wysokiej sprawności produkcji energii elektrycznej (ogniwa paliwowe, złożone struktury hierarchiczne z turbiną gazową i parową itd.).



Rys. 2. Możliwe sposoby wytwarzania wodoru
Fig. 2. Feasible methods of hydrogen production

3. Zakres badań i analiz

3.1. Siłownie kondensacyjne

Sprawność technologii, w których pracują silniki cieplne (siłownie kondensacyjne, instalacje turbin gazowych, układy hierarchiczne z turbinami gazowymi i obiegiem parowym itd.) można zapisać ogólnie w postaci [5]:

$$\eta \sim \bar{\eta}_c - T_{II} \sum_j \xi_j, \quad (1)$$

gdzie:

$$\bar{\eta}_c = 1 - \frac{\bar{T}_{II}}{\bar{T}_I} \quad (2)$$

$$\xi_j = \frac{S_{gen,j}}{\dot{Q}_I} \quad (3)$$

S_{gen} - generacja entropii w poszczególnych procesach obiegu, \dot{Q}_1 - ciepło doprowadzone do obiegu, \bar{T}_1 - uśredniona entropowo temperatura procesu doprowadzenia ciepła do obiegu, \bar{T}_{II} - uśredniona entropowo temperatura wyprowadzenia ciepła z obiegu.

Zależności (1) ÷ (3) wskazują, że istnieją dwa podstawowe źródła poprawy efektywności energetycznej rozpatrywanych technologii. Pierwsze z nich jest związane z wpływem na \bar{T}_c . Wzrost średniej temperatury doprowadzenia ciepła do obiegu (\bar{T}_1) i obniżenie temperatury odprowadzenia ciepła (\bar{T}_{II}) umożliwiają zwiększenie sprawności. Podwyższenie temperatury \bar{T}_1 w klasycznych blokach siłowni parowych uzyskujemy poprzez: wzrost parametrów pary świeżej, stosowanie wtórnych przegrzewów pary, stosowanie regeneracji (podwyższenie temperatury wody zasilającej). Stosowanie wysokich wartości temperatury wymaga materiałów o odpowiednich charakterystykach, zależy więc głównie od postępu w inżynierii materiałowej. W tym zakresie dokonano w ostatnim dziesięcioleciu istotnego postępu, wprowadzając do energetyki nowe stałe stopowe i staliwa [6,7]. Współcześnie w budowie są instalacje, w których parametry pary wynoszą p_0 (ciśnienie pary świeżej) = 30 MPa, t_0 (temperatura pary świeżej) 600°C, t_p (temperatura pary wtórnie przegrzanej) 600°C. Prowadzone badania w ramach dużych projektów międzynarodowych (zobacz na przykład program Thermie 700 Advanced Power Plant dofinansowany przez Unię Europejską) mają za cel osiągnięcie temperatur rzędu 700/720°C i ciśnień 38 MPa. Nowe materiały stanowią warunek konieczny rozwoju bloków kondensacyjnych nowej generacji. Nowe parametry pary istotnie zwiększające \bar{T}_1 mają także duży wpływ na konstrukcje podstawowych urządzeń pracujących w obiegu, głównie kotłów, turbin oraz pomp wody zasilającej i wymienników regeneracyjnych. W poszukiwaniu optymalnych konstrukcji ważną rolę spełniają badania mające na celu wzrost efektywności cieplnej, dyspozycyjności oraz trwałości tych urządzeń.

Obniżenie \bar{T}_{II} zależy od struktury układu chłodzenia skraplacza (rodzaj medium chłodzącego, rodzaj obiegu czynnika chłodzącego), doboru liczby wylotów do skraplacza oraz organizacji schematu cieplnego instalacji, głównie organizacji układu regeneracji. Z postaci (1) wynika także, że im niższa temperatura \bar{T}_{II} , tym mniejszy jest wpływ na sprawność strat związanych z generacją entropii w poszczególnych częściach obiegu. Zabieg zmiany wskaźnika ξ_j należy do drugiej grupy sposobów poprawy sprawności. Stosunki ξ są miarą doskonałości procesów konwersji energii w urządzeniach bloku (głównie organizacji procesów aerodynamicznych oraz wymiany ciepła).

Powyższe uwagi wskazują, że wprowadzenie do eksploatacji siłowni kondensacyjnych o dużych sprawnościach wymaga zarówno doskonalenia obiegów i schematów cieplnych, jak i badań maszyn i urządzeń energetycznych. Wprowadza i dyskutuje się nowe struktury schematów cieplnych. Udoskonalenia są następstwem lepszej integracji z układami oczyszczania spalin [8] oraz dążenia do zmniejszenia strat egzergii w układzie regeneracyjnym [9]. Analizy termodynamiczne i ekonomiczne mogą być źródłem także innych rozwiązań. Duży wpływ na konkurencyjność technologii węglowych ma cena paliwa. Decyduje ona w dużej mierze o granicznej sprawności układu, przy której uzyskuje się konkurencyjne ceny jednostki energii elektrycznej. Na podstawie analizy wielu danych (dotyczących Europy) można napisać:

$$\eta_{el,n}^{(opt)} = 0,055 e_p + 41,5, \quad (20 < e_p < 70), \quad (4)$$

gdzie: $\eta_{el,n}^{(opt)}$ [%] - optymalna sprawność netto, e_p – jednostkowy koszt paliwa, $\frac{euro}{t}$.

Z zależności (1) wynika na przykład, że przy cenie węgla 30 euro za tonę węgla struktura technologiczna elektrowni powinna zapewniać sprawność 43,1 %. Wzrost ceny do 70 euro prowadzi, zgodnie z (1) do sprawności 45,3 %. Zależność (1) nie jest uniwersalna, jest aproksymacją ułatwiającą oceny wstępne.

3.2. Układy turbin gazowych

Prace prowadzone w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych w zakresie turbin gazowych dotyczą głównie:

- analizy i optymalizacji struktur technologicznych prostych i złożonych zespołów turbin gazowych,
- modelowania procesów przepływowych i cieplnych w poszczególnych modułach zespołu turbin gazowych,
- określenie charakterystyk układów turbin gazowych przy niepełnym obciążeniu i zmianie parametrów otoczenia,
- analiza wpływu chłodzenia na charakterystyki układu,
- analizy stanu naprężeń i określenie wpływu różnych parametrów eksploatacji na trwałość układu przepływowego turbiny i komory spalania,

Pierwszą syntezą prac prowadzonych w instytucie była opublikowana w 2001 roku monografia: Turbiny gazowe [10]. Inne wyniki badań zostały przedstawione między innymi w [11-18].

Zamierzenia badawcze są związane z zagadnieniami:

- metodologii rozwiązania zadania wpływu, chłodzenia i wytrzymałości łopatek turbin gazowych,
- metod identyfikacji linii ekspansji z uwzględnieniem różnych sposobów chłodzenia części przepływowej,
- monitorowania pracy i diagnozy stanu technicznego instalacji turbin gazowych,

3.3. Hierarchiczne układy energetyczne

3.3.1. Układy gazowo-parowe

Celem badań prowadzonych w Instytucie a dotyczących klasycznych układów gazowo-parowych była do tej pory:

- Optymalizacja techniczno-ekonomiczna struktury układów i parametrów ich pracy dla różnych stanów obciążenia [zob. np. 19-20],
- Dobór struktury technologicznej, urządzeń i parametrów dla danego wykresu zapotrzebowania na ciepło lub chłód w przypadku układów skojarzonych [np. 21,22],
- Metodologia modelowania statycznego i dynamicznego złożonych układów energetycznych w celu uzyskania informacji wykorzystywanej w sformułowaniu zadań optymalizacji eksploatacji i sterowania pracą układu [np. 23,24].

Opalane gazem układy gazowo-parowe będą zapewne stosowane w strefie obciążenia podstawowego przez najbliższe 10-20 lat. Podstawą takiego sądu jest możliwość uzyskania w niedalekiej przyszłości sprawności energetycznej rzędu 60 % oraz emisji $\text{NO}_x < 10$ ppm. Wszystkie czołowe firmy budujące turbiny gazowe zapowiadają ich nowe generacje.

W Polsce w ostatnim okresie czasu uruchomiono kilka hierarchicznych instalacji produkcji ciepła i energii elektrycznej (Gorzów Wlk., Lublin, Rzeszów). Z tego powodu w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych podejmowane są prace nad budową systemów monitorowania i diagnostyki instalacji gazowo-parowych, z uwzględnieniem układów kontroli trwałości poszczególnych jej węzłów. W rozwiązaniu tego zadania wykorzystuje się modele poszczególnych węzłów instalacji opracowanych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych.

Osobną grupę klasycznych układów gazowo-parowych stanowią układy małej mocy z turbiną gazową lub silnikiem gazowym tłokowym. Mogą one stanowić technologię dla rozproszonych źródeł produkcji energii elektrycznej i ciepła. Główne kierunki badań i przedsięwzięć technicznych dotyczą zagadnień:

- poprawy sprawności, elastyczności ruchowej i niezawodności zespołów turbin gazowych małej mocy (karnotyzacja, regeneracja, dobór materiałów, racjonalne charakterystyki zmiennego obciążenia),
- nowych konstrukcji generatorów elektrycznych (umożliwiających bezprzekładniową pracę przy wysokiej prędkości kątowej),
- nowych konstrukcji wymienników ciepła i regeneratorów,
- doskonalenia systemów odbioru ciepła w układach z turbinami gazowymi i silnikami tłokowymi,
- obniżenia hałasu i emisji.

Z problematyką układów małej mocy ściśle związane jest także zagadnienie konstrukcyjne mikroturbin gazowych, w tym także turbin o mocy nie przekraczającej 1 kW. Odpowiadająca małym mocom skala geometryczna rodzi nie tylko problemy konstrukcyjne, ale także przepływowe i termodynamiczne (spalanie, wymiana ciepła) [zob. np. 25,26,27].

W stadiach budowy i eksploatacji jest wiele układów gazowo-parowych zintegrowanych ze zgazowaniem węgla i innych substancji (odpady po procesach rafinacyjnych ropy, biomasa, inne odpady). Ich struktura technologiczna jest zależna głównie od sposobu zespolenia instalacji zgazowania oraz technologii oczyszczania gazu z układem generacji energii elektrycznej. Główny wysiłek badawczy konstrukcyjno-technologiczny jest skupiony na opracowaniu wysokotemperaturowego oczyszczania gazu, optymalizacji procesów wymiany ciepła, opanowania technologii spalania dużych strumieni gazów niskokalorycznych, konstrukcji wymienników ciepła, doskonaleniu procesów zgazowania paliw o zróżnicowanej strukturze. Ważnym, podobnie jak dla wszystkich procesów wysokotemperaturowych, nurtem badań jest minimalizacja procesów zmężeń i optymalizacji eksploatacji przy zmiennych obciążeniach.

Obecnie wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem biomasy jako paliwa w różnych technologiach energetycznych. Zgazowanie [28] biomasy umożliwia budowę układów gazowo-parowych lub jej konwersję w inne rodzaje paliw (głównie metanol). Podobnie jak w przypadku instalacji ze zgazowaniem węgla istotne znaczenie dla efektywności produkcji energii elektrycznej ma struktura integracji procesu przygotowania paliwa i obiegu gazowo-parowego. Ważne jest przy tym opanowanie procesów zgazowania dla mokrej biomasy. Dyskusja możliwych kierunków rozwoju układów gazowo-parowych

zintegrowanych ze zgazowaniem wskazuje na budowę instalacji o zróżnicowanej strukturze, w tym generatorami umożliwiającymi zgazowanie różnych surowców, zgazowaniem ukierunkowanym na generację gazu o założonym składzie (np. dla ułatwienia separacji CO₂), a także na budowę kompleksów energetyczno-chemicznych. Ostatnie decyzje inwestycyjne instalacji dużej mocy wskazują na zgazowanie gorszych jakościowo substancji (węgle niskiej jakości, odpady z przemysłu rafineryjnego itp.). Można sądzić, że brak jest w Polsce dziś przesłanek do budowy instalacji dużej mocy ze zgazowaniem węgla. Nie wyklucza to jednak budowy szczególnych układów ze zgazowaniem różnych substancji przeznaczonych do celów energetycznych i chemicznych. Zainteresowania badawcze Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych są ukierunkowane w tym zakresie głównie na modelowaniu procesów zgazowania (w tym biomasy), opracowania procedur i programów obliczeniowych dla optymalnej syntezy tych procesów z układami generacji energii elektrycznych i ciepła oraz adaptacji turbin gazowych do spalania paliw niskokalorycznych.

4. Układy dwupaliwowe (wielopaliwowe)

Ogólnie można wyróżnić następujące rodzaje klasycznych układów dwupaliwowych:

- układy szeregowy z czołową turbiną gazową (spaliny wylotowe z turbiny gazowej są kierowane do komory spalania kotła parowego opalanego węglem),
- układy sprzężone równoległe (przez układ woda-para; sprzężenie polega na obejściu regeneracyjnych wymienników ciepła i/lub kotła parowego w części parowej poprzez zastosowanie wymienników ciepła typu spaliny-woda lub kotła odzyskowego zasilanego gazami z turbiny gazowej),
- układy mieszane łączące cechy obu powyższych instalacji (w grupie tej istnieje duża liczba możliwych do realizacji obiegów).

W pierwszym przypadku spaliny wylotowe z turbiny gazowej (o 13 – 18% zawartości tlenu) zasilają palniki kotła pyłowego (instalacja może współpracować także z kotłem fluidalnym). Przy spalaniu węgla kamiennego ze średnią zawartością części lotnych w celu zapewnienia prawidłowego procesu spalania układ musi być wyposażony w wentylator powietrza. Konieczna ilość powietrza przy zastosowaniu wysokoparametrowych turbin gazowych (temperatura wlotowa do turbiny gazowej $t > 1100^{\circ}\text{C}$, temperatura spalin wylotowych z turbiny gazowej $t = 540 - 590^{\circ}\text{C}$) stanowi 1/4 całej mieszaniny: spaliny + powietrze. Fakt ten, zwiększając potrzeby własne, obniża sprawność układu w porównaniu z UPG. Osiągalna sprawność (zależna od N_{TG}/N_{TP} oraz temperatury na wlocie do turbiny gazowej, parametrów pary świeżej i struktury części parowej itd.) jest rzędu 43 – 45%. Wadą układu jest konieczność stosowania (przy istniejących i przewidywanych normach emisji) układów odsiarczania i odazotowania (jeśli nie wystarczają metody czynne). Za zaletę układu można uważać stosunkowo duże możliwości połączenia z istniejącymi układami konwencjonalnymi. Rozpatrywany układ może być szczególnie interesujący dla węgla brunatnych (duża zawartość części lotnych, niekonieczne stosowanie metod biernych usuwania NO_x).

Równoległe układu sprzężone z termodynamicznego i technologicznego punktu widzenia mieszczą się między dwoma autonomicznymi układami: gazowym i parowym

a jednopaliwowym układem gazowo-parowym z kotłem odzyskowym. Możliwe są bardzo różnorodne kombinacje sprzężeń. Ogólnie można wyróżnić:

- układy z podgrzewem wody zasilającej (w części niskoprężnej, wysokoprężnej, URN i URW),
- z produkcją pary wysokoprężnej i średnioprężnej w kotle odzyskowym (KO), (GP w części WP – wysokoprężnej i SP – średnioprężnej),
- układu z produkcją pary wysokoprężnej i średnioprężnej w KO z dodatkowym umiejscowieniem w KO przegrzewacza (GP pary WP i PP),
- układy z produkcją pary średnioprężnej i niskoprężnej w KO (SP/NP),
- układy z produkcją pary średnioprężnej i podgrzewem wody zasilającej w kotle odzyskowym.

Każda z tych struktur ma swoje wady i zalety. O wyborze układu decydują różne kryteria. W procesach modernizacyjnych ważne jest uzyskanie maksymalnej sprawności przy minimalnych zmianach układu parowego. Budowa nowych źródeł umożliwia daleko idącą optymalizację.

Mając na uwadze głównie modernizacyjny potencjał kombinowanych układów wielopaliwowych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych opracowani kody obliczeniowe umożliwiające analizę i optymalną syntezę układów równoległych [29,30]. Na ich podstawie dokonano termodynamiczno-ekonomicznej analizy modernizacji głównych polskich bloków rozpatrujący różne równoległe i szeregowo struktury instalacji kombinowanych [np. 31-33].

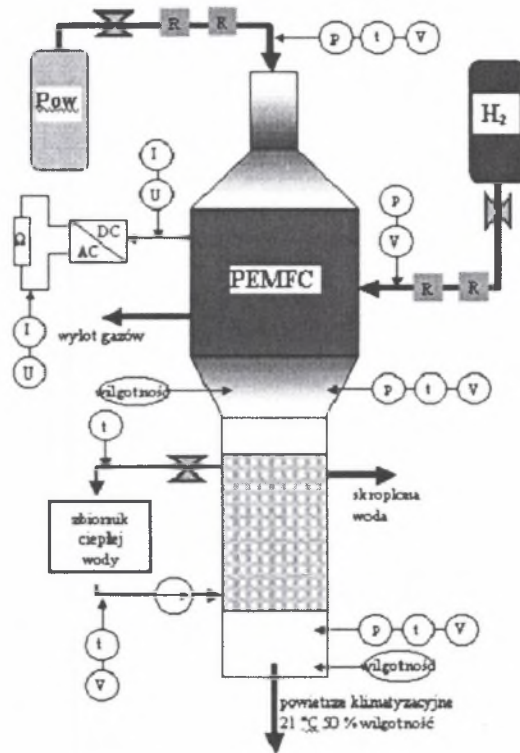
Wiele możliwości technologicznych tkwi w sprzężeniu turbiny gazowej z klasycznymi elektrociepłowniami węglowymi [17].

5. Ogniw paliwowe

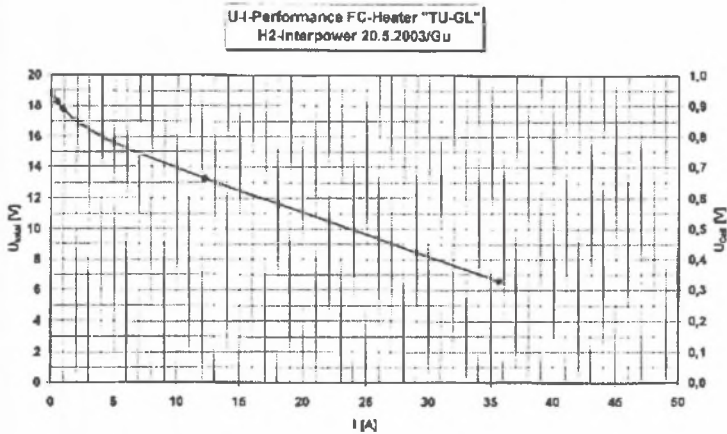
W ogniwach paliwowych zachodzi bezpośrednia konwersja energii chemicznej paliwa w energię elektryczną. Ten typ konwersji jest istotną zaletą ogniw, bowiem efektywność zamiany jednej formy energii w drugą nie podlega ograniczeniu wynikającemu z teorii silników cieplnych. Istnieje więc potencjalna możliwość uzyskiwania sprawności przekraczających efektywność konwersji ciepła w energię mechaniczną przy obecnie opanowanych temperaturach doprowadzenia ciepła do obiegu, w którym pracuje silnik cieplny (turbina gazowa, parowa).

Intensywny rozwój ogniw obserwujemy po 1960r. W polu widzenia podejmowanych prac naukowych i rozwojowych były zarówno aplikacje w transporcie jak i w energetyce. Współcześnie oba obszary zastosowań są nadal aktualne. W energetyce rozpatruje się zastosowanie ogniw paliwowych w jednostkach małych i średnich mocy, w tym także jako rozproszone źródła ciepła i energii elektrycznej. Istnieje wiele kryteriów podziału ogniw paliwowych. Podział podstawowy to ogniw bezpośredniego wykorzystania danego paliwa i pośredniego wykorzystania jego konwersji (reformingu). Typowym reprezentantem pierwszej grupy jest ogniwo zasilane wodorem i tlenem. Ogniwo, do którego doprowadzamy metan lub biogaz oraz utleniacz, będzie należeć do drugiego rodzaju ogniw. Ważnym kryterium podziału jest temperatura pracy ogniwa. Wyróżniamy ogniw niskotemperaturowe (25-100°C), średnotemperaturowe (100-500°C), wysokotemperaturowe (500-1000°C) i szczególnie wysokotemperaturowe powyżej 1000°C.

Technologicznym kryterium podziału jest rodzaj elektrolitu. Główne rodzaje ogniw przedstawiono w tabl. 1.



Rys. 3. Ogólny schemat instalacji badawczej ogniwa PEMFC o mocy 200W
Fig. 3. Schematic diagram of 200W PEMFC fuel cell research stand



Rys. 4. Charakterystyka napięciowo - prądowa ogniwa PEMFC 200W
Fig. 4. Voltage - current characteristic of 200W PEMFC fuel cell

Tablica 1

Rodzaje ogniw paliwowych

Rodzaj ogniwa	Elektrolit	Temperatura pracy	Zakres możliwych zastosowań
Ogniwa alkaliczne (AFC – Alkaline Fuel Cell)	Roztwór KOH (35-50%)	60-90°C	Transport, Astronautyka
Ogniwa polimerowe (PEFC – Polymer Electrolyte Fuel Cell)	Membrana polimerowa (np. polimer sulfano-fluoro-węglowy)	50-80°C	Transport Astronautyka Energetyka
Ogniwa z kwasem fosforowym jako elektrolitem (PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell)	Kwas fosforowy o dużym stężeniu	160-220°C	Energetyczne źródła rozproszone
Ogniwa węglanowe (MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell)	Stopiona mieszanina węglanów litu i sodu ($\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Na}_2\text{CO}_3$) lub litu i potasu ($\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{K}_2\text{CO}_3$)	620-650°C	Energetyka
Ogniwa tlenkowo-ceramiczne (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell)	Dwutlenek cyrkonu stabilizowany itrem ($\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$)	800-1000°C	Energetyka

Przegląd schematów technologicznych ogniw paliwowych z turbinami gazowymi niewielkiej mocy zawarto w [33].

Obecnie w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych uruchamiane jest stanowisko do badania ogniwa typu membranowego (PEMFC) o mocy 200 W, rys. 3. Charakterystykę napięciowo - prądową ogniwa ilustruje rys. 5. Celem badań jest optymalizacja odbierania ciepła z ogniwa i badanie układu z wymiennikiem ciepła przy zmiennym obciążeniu.

6. Uwagi końcowe

W artykule zarysowano główne tendencje rozwoju technologii energetycznych na paliwa organiczne. Przeglądu dokonano biorąc pod uwagę zainteresowania badawcze Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Opracowanie nie obejmuje wielu innych kierunków rozwoju technologii związanych zarówno z propozycjami nowych rozwiązań układów turbin gazowych, technologii użytkowania różnych paliw oraz technologii źródeł odnawialnych. Starano się podkreślić fakt, że o postępie w energetyce decyduje stan wielu dyscyplin naukowych i technologii. Dla wielu nowych rozwiązań głównym wyzwaniem jest budowa silników i urządzeń energetycznych nowej generacji.

Bibliografia

1. Chmielniak T.J., Chmielniak T.M.: Sposoby ograniczenia emisji CO₂ z procesów energetycznego przetwarzania paliw kopalnych (w Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy. Wyd. Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zabrze, Kraków 2003).
2. Smith D.: Drym IGCC aims to be CO₂ – removal-ready. MPS, April 2003, 45-49.
3. Pruszek R., Göttlicher G.: Concepts of CO₂ Removal from Fossil Fuel-Base Power Generation Systems. UNI GH ESSEN, 1966.
4. Weinzierl K.: Neue Kraftwerkskonzepte für Steinkohle. VGB-Konferenz Kraftwerkstechnik 2000, VGB TB 120, 1990.
5. Chmielniak T.J., Łukowicz H., Wróblewski W., Dykas S.: Diagnostyka termiczna układów siłowni ciepłych. Raport wewnętrzny Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, kwiecień 2000.
6. Chmielniak T., Kosman G.: Problemy rozwoju turbin parowych dla wysokich parametrów pary. Zbiór referatów seminarium: Podstawowe problemy maszyn i urządzeń energetycznych (Komitet Problemów Energetyki PAN, Jabłonna 27-28.03.2003), 5-12.
7. Pawlik M.: Aktualne kierunki rozwoju konwencjonalnych elektrowni parowych. Zbiór referatów seminarium: Podstawowe problemy maszyn i urządzeń energetycznych (Komitet Problemów Energetyki PAN, Jabłonna 27-28.03.2003), 61-70.
8. Heitmüller R.J., Fischer H., Sigg J.: Kocioł parowy na węgiel brunatny 1000 MW dla Elektrowni Niederaushen. Prace Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych. S. Konferencje 4, Gliwice 1999, 113-130.
9. Krzyślak P.: Podnoszenie sprawności ciepłych układów turboparowych. Monografie 25, Politechnika Gdańska, 2002.
10. Chmielniak T., Rusin A., Czwiertnia K.: Turbiny gazowej. Ossolineum, Wrocław, Warszawa 2001.
11. Chmielniak T.J., Chmielniak T.M.: Power Optimization of an Engine Working in a closed Brayton Cycle. Archives of Thermodynamics Vol 18 (1997), 3-4, p.81-94.
12. Antas S., Chmielniak T.: Change of Surge Margin of a Turbohaft Engine Compressor in Manufacturing Conditions. Int. J. of Turbo-and Jet Engines Vol 18, 2, 2001, p. 105-115.
13. Chmielniak T., Pająk Sz.: Analiza złożonych układów turbin gazowych. Mat. I Konf. N-T Energetyka Gazowa, T.1, s. 43-62, 2000.
14. Kotowicz J., Chmielniak T.: Methods of Determining the Admissible Price of Fuels for Combined Heat and Power Cenerating Plants Fired with Natural Gas. Archiwum Energetyki, 3 (2001).
15. Chmielniak T., Jaśko K.: Analiza techniczno-ekonomiczna prostego układu turbiny gazowej. Czasopismo Techniczne 5-M, 2001, 9-17.
16. Antas S., Chmielniak T., Kujda J.: A Method for Calculation of Charakteructics of one-Stage and Two-Stage Axial-Flow Machianery. Trans. of the Inst. of Fluid-Flow Machinery, No 111, 2002, p.17-36.
17. Chmielniak T., Kosman G., Kosman W.: Analysis of Cycle Configuration for the Modernization of Combined Heat and Power Plant by Fitting a Gas Turbine System. Proc. of ASME Turbo Expo 2003, Paper GT-2003-38240.

18. Chmielniak T., Wróblewski W., Nowak G., Węcel A.: Coupled Analysis of Cooled Gas Turbines Blades. Proc. of ASME Turbo Expo 2003, Paper GT-2003-38657.
19. Chmielniak T., Kotowicz J.: Analysis of Combined gas-steam cycles with supplementary firing. *Archiwum Energetyki* 3-4, 1997, 71-83.
20. Kotowicz J.: Analiza efektywności elektrowni gazowo-parowych; układ z trójciśnieniowym kotłem i przegrzewem międzystopniowym. *Archiwum Energetyki* 1-2, 2002, 29-49.
21. Chmielniak T.J.: Analiza porównawcza instalacji małych elektrociepłowni gazowych z silnikami tłokowymi i turbinami gazowymi. *Informacja INSTAL* 1 (191), 2000, 14-16.
22. Kotowicz J., Chmielniak T.: Methods of determining the admissible process of fuels for combined heat and power generating plants fired with natural gas. *Archiwum Energetyki* 3 (2001).
23. Chmielniak T., Kotowicz J., Remiorz L.: Wielowarstwowy, obiektowy system analizy układów gazowo-parowych. *Materiały Konferencyjne XVII Zjazdu Termodynamików*, Kraków 1999, 171-182.
24. Kotowicz J., Chmielniak T., Remiorz L.: Modelowanie optymalnych układów gazowo-parowych z wykorzystaniem algorytmów neuronowych. *Gospodarka Paliwami i Energią* 10, 2001.
25. Rodgers C.: 25-5 kW_e Microturbine Design Aspects, ASME Paper 2000-GT-0626 (2000).
26. Isomura K. I inni: Development of Micro-turbo Charger and Micro-Combustor gas Feasibility Studies of Three-Dimensional Gas Turbine at Micro-Scale. ASME Paper GT-2003-38151 (2003).
27. Wilson D.G.: Regenerative Heat Exchangers for Microturbines, and an Improved Type. ASME Paper GT 2003-3887 (2003).
28. Cansouni S., Larson E.D.: Biomass-Gasifier/Aeroderivative Gas Turbine Combined Cycles: Part A – Technologies and Performance Modeling. Part B – Performance Calculations and Economic Assessment. *J. of Eng. For Gas Turbines and Power*, Vol. 118 (1996). 507-525.
29. Łyczko J.: Modernizacja i optymalizacja dwupaliwowych sprzężonych równoległe układów parowo-gazowych. Praca doktorska, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Gliwice, 1999.
30. Chmielniak T.J., Kotowicz J., Łyczko J.: Parametric Analysis of a Dual Fuel Parallel Coupled Combined Cycle. *The Int. J. ENERGY* 26 (2001), 1063-1074.
31. Chmielniak T.J., Kotowicz J., Łyczko J.: Numeryczna analiza dwupaliwowych układów gazowo-parowych sprzężonych równoległe – wpływ wybranych parametrów struktury sprzężenia na sprawność układu. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika* z. 181, s. 31-38.
32. Chmielniak T.J., Dykas S.: Numeryczna analiza możliwości modernizacyjnych bloku parowego 200 MW przez nadbudowę turbiny GT8C. *Mat. Konf. Elektrownie i Elektrociepłownie Gazowe*, Poznań 200, 2000, 3-10.
33. Chmielniak T.J.: *Technologie energetyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej (w druku).