

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI
ZAKŁAD ELEKTROWNI I GOSPODARKI
ELEKTROENERGETYCZNEJ

LABORATORIUM
GOSPODARKI ELEKTROENERGETYCZNEJ

INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA 2

Sporządzanie bilansów mocy i energii oraz obliczanie sprawności na przykładzie rozdzielonego i skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej oraz ciepła

Opracował : dr inż. Eugeniusz Tomaszewicz

WARSZAWA 2012 r.

1. CEL I ZAKRES ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest poznanie :

- metody sporządzania bilansów mocy i energii oraz obliczanie sprawności w układach skojarzonego (kogeneracji) i rozdzielonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej,
- unijnych i krajowych regulacji prawnych oraz metod obliczeniowych wyznaczania wartości kryterialnych do oceny energii elektrycznej wytworzonej w kogeneracji,
- mechanizmu przydzielania „świadectw pochodzenia z wysokosprawnej kogeneracji” jako sposobu wspierania krajowej i unijnej polityki proefektywnościowej w energetyce.

Zakres ćwiczenia obejmuje:

- przeprowadzenie wariantowych obliczeń dla zadania doboru typu, mocy i liczby zespołów kogeneracyjnych tłokowych w tzw. jednostce kogeneracyjnej (elektrociepłowni) według kryterium maksymalnej liczby świadectw pochodzenia z wysokosprawnej kogeneracji,
- odnotowanie spostrzeżeń i wniosków z przeprowadzonych obliczeń i analiz.

2. WPROWADZENIE

Celem Dyrektywy Unii Europejskiej 2004/8/EC z dnia 11 lutego 2004 roku w sprawie promowania kogeneracji jest zwiększenie efektywności energetycznej i poprawa bezpieczeństwa dostaw energii poprzez stworzenie ram dla promowania i rozwoju produkcji ciepła i energii elektrycznej w wysokosprawnej kogeneracji w oparciu o zapotrzebowanie na ciepło użytkowe aby uzyskać oszczędność energii pierwotnej na wewnętrznym rynku energii z uwzględnieniem specyfiki poszczególnych krajów. Dyrektywa definiuje pojęcia wysokosprawnej kogeneracji, wskaźnika względnej oszczędności energii pierwotnej *PES* (*Primary Energy Savings*), podaje wzory i metody obliczania oraz graniczne warunki dla wspierania finansowego udokumentowanej oszczędności paliwa pierwotnego.

Polską implementację tej Dyrektywy stanowią odpowiednie zapisy w Prawie energetycznym oraz Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 26 września 2007 r. w sprawie sposobu obliczania danych we wniosku o wydanie świadectwa pochodzenia z kogeneracji oraz szczegółowego zakresu obowiązku uzyskania i przedstawienia do umorzenia tych świadectw, uiszczenia opłaty zastępczej i obowiązku potwierdzenia danych dotyczących ilości energii elektrycznej wytworzonej w wysokosprawnej kogeneracji¹. W Rozporządzeniu metody obliczeniowe, wzory i kryteria przyjęto w zasadzie takie same jak w Dyrektywie, natomiast kwestie związane z finansami, obiegiem dokumentacji i dostępności paliw, dopasowano do warunków krajowych. W Polsce za wydawanie koncesji, funkcjonowanie i rozliczanie tzw. świadectw pochodzenia odpowiedzialny jest Prezes Urzędu Regulacji Energetyki.

Prawo energetyczne nakłada obowiązek, aby w bilansie energii elektrycznej każdego przedsiębiorstwa obrotu, energia elektryczna z poszczególnych promowanych rodzajów kogeneracji (z instalacji powyżej 1 MW, z instalacji poniżej 1 MW, zużywające gaz, biogaz, itd.) były wykupione w odpowiedniej ilości potwierdzonej świadectwami. Za brakujące ilości energii przedsiębiorstwa muszą wносить dodatkową opłatę zastępczą, w której ceny jednostkowe, w zależności od rodzaju brakującej energii, wynoszą od 15% do 120% wartości

¹ Dziennik Ustaw Nr 185 z 2007r. poz.1314.

średniej ceny energii elektrycznej na konkurencyjnym rynku energii². Kupując energię i świadectwa bezpośrednio w elektrociepłowniach przedsiębiorstwa uzyskują ceny niższe. Dla elektrociepłowni opłata za świadectwa pochodzenia to dodatkowe wpływy.

W Rozporządzeniu określono typy urządzeń, które mogą występować jako jednostka kogeneracyjna: układ gazowo – parowy z odzyskiem ciepła, turbiny parowe przeciwpiężne i upustowo – kondensacyjne, turbiny gazowe z odzyskiem ciepła, silniki spalinowe, mikroturbiny gazowe, ogniwa paliwowe i inne technologie kogeneracyjne. Mikrokogeneracja jest definiowana jako jednostka kogeneracyjna o znamionowej mocy elektrycznej poniżej 50 kW. Przy większej liczbie jednostek moce sumuje się. Jednostka kogeneracji na małą skalę to jednostka lub grupa jednostek o łącznej znamionowej mocy elektrycznej poniżej 1 MW.

Aktualnie w Polsce świadectwo pochodzenia z kogeneracji wydaje się dla energii elektrycznej wytworzonej w wysokosprawnej kogeneracji w wyróżnionych trzech typach jednostki kogeneracji:

- 1) opalanej paliwami gazowymi lub o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej źródła poniżej 1 MW;
 - 1a) opalanej metanem kopalnianym lub biogazem;
- 2) innej niż wymienione w punktach 1 i 1a.

Dyrektywa i Rozporządzenie ustanawiają, że granice bilansowe obejmują wyłącznie proces skojarzony. Takie elementy układu jak kotły ciepłownicze (rezerwowe lub szczytowe) oraz bloki kondensacyjne są wyłączone poza granice bilansowe. Do energii napędowej zalicza się materiały palne oraz parę i ciepło dostarczane do układu. Nie uwzględnia się w energii doprowadzonej entalpii powrotnego kondensatu. Jako ciepło użytkowe można uznać tylko tę część ciepła wyprowadzonego z układu skojarzonego, które będzie użytecznie wykorzystane (na cele grzewcze i technologiczne wraz ze stratami przesyłowymi), a które musiałyby być pozyskane z innych źródeł gdyby nie było układu skojarzonego

Średnioroczną sprawność ogólną jednostki kogeneracyjnej η oblicza się według wzoru:

$$\eta = \frac{3,6 A_b + Q_{uq}}{Q_b} \cdot 100$$

gdzie:

η - średnioroczna sprawność ogólna jednostki kogeneracyjnej [%],

A_b – całkowita ilość energii elektrycznej brutto wytworzona w kogeneracji (mierzona na zaciskach generatora) [MWh],

Q_{uq} – ilość ciepła użytkowego (oddanego na cele grzewcze lub technologiczne) wytworzona w kogeneracji [GJ],

Q_b - ilość energii chemicznej zawartej w paliwie zużytym w danej jednostce kogeneracji obliczana ze wzoru: $Q_b = B \cdot Q_r$; gdzie B to ilość zużytego paliwa o wartości opałowej Q_r (dla silników tłokowych podaje się zwykle jednostkowe zapotrzebowanie paliwa w odniesieniu do wytworzonej energii elektrycznej j_{pA} [kJ/kWh] – czyli dla każdego silnika $Q_{bi} = j_{pA} \cdot A_{bi}$, [GJ].

Uwaga! Jeżeli w danej jednostce kogeneracyjnej znajduje się kilka zespołów kogeneracyjnych to do wzoru na sprawność ogólną jednostki kogeneracyjnej wstawiamy sumy: $A_b = \sum A_{bi}$; $Q_{uq} = \sum Q_{uqi}$; $Q_b = \sum Q_{bi}$ ze wszystkich i-tych zespołów należących do danej jednostki.

² W 2010 r. średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym wyniosła 195,32 zł/MWh.

Wartość graniczna średniorocznej sprawności ogólnej dla układów gazowo – parowych i jednostek z turbinami upustowo-kondensacyjnymi wynosi 80%, a dla pozostałych typów technologii skojarzonych 75%. W przypadku gdy obliczona wartość średniorocznej sprawności ogólnej jednostki kogeneracyjnej jest mniejsza od wartości granicznej to ilość energii elektrycznej wytworzonej w kogeneracji wysokosprawnej A_{bq} oblicza się według wzoru:

$$A_{bq} = C \frac{Q_{uq}}{3,6} \text{ [MWh]}$$

gdzie:

C – współczynnik określający stosunek ilości energii elektrycznej z kogeneracji do ilości ciepła użytkowego w kogeneracji [GJ/GJ].

Czyli rozpatrywaną jednostkę kogeneracyjną dzieli się na część skojarzoną i część nie wytwarzającą produktów w skojarzeniu (*non-CHP part*). Rozporządzenie podaje warunki przeprowadzania pomiarów energii elektrycznej, ciepła użytkowego oraz współczynnika C . W przypadku nowych zespołów kogeneracyjnych o mocy elektrycznej poniżej 1 MW, o ustalonym współczynniku C i ustalonym stosunku mocy do paliwa, dopuszcza się pomiar tylko wartości wytworzonej energii elektrycznej. Energia elektryczna jest mierzona bezpośrednio na zaciskach generatora (brutto - bez odejmowania energii zużytej na potrzeby własne). Układy skojarzone, których eksport ciepła użytkowego jest osiągany kosztem częściowego ubytku produkcji energii elektrycznej (jak np. w turbinie upustowo – kondensacyjnej) nazywa się procesami z ubytkiem energii elektrycznej. Efekt ubytku energii elektrycznej ocenia się za pomocą, określanego pomiarowo, wskaźnika ubytku β . Nowe elektrociepłownie powinny być projektowane optymalnie pod rzeczywisty rynek ciepła użytkowego.

Energia elektryczna wytworzona w kogeneracji A_b jest równa ilości energii elektrycznej wytworzonej w wysokosprawnej kogeneracji $A_{bq} = A_b$ pod warunkiem uzyskania przez jednostkę kogeneracji oszczędności energii pierwotnej PES w odpowiedniej wysokości. Wartość wskaźnika względnej oszczędności energii pierwotnej PES oblicza się w odniesieniu do wytwarzania rozdzielonego ze wzoru:

$$PES = \left[1 - \frac{1}{\frac{\eta_{qc}}{\eta_{refc}} + \frac{\eta_{qe}}{\eta_{refe}}} \right] \cdot 100$$

gdzie:

PES - wartość wskaźnika względnej oszczędności energii pierwotnej [%],

$\eta_{qc} = Q_{uq}/Q_b \cdot 100$ – sprawność wytwarzania ciepła użytkowego w kogeneracji [%],

η_{refc} – referencyjna wartość sprawności dla wytwarzania rozdzielonego ciepła [%],

$\eta_{qe} = 3,6 \cdot A_b / Q_b \cdot 100$ - sprawność wytwarzania energii elektrycznej w kogeneracji [%],

η_{refe} - referencyjna wartość sprawności dla wytwarzania rozdzielonego energii elektr. [%].

Referencyjne wartości sprawności dla wytwarzania rozdzielonego energii elektrycznej i ciepła podano w załączniku nr 2 Rozporządzenia, w zależności od typu paliwa i roku, w którym jednostka kogeneracyjna zaczęła funkcjonować. Wartości sprawności dobrano w taki sposób by uwzględnić aktualny i stymulować dalszy wzrost efektywności w energetyce. Dla gazu ziemnego jako paliwa w latach 2006 – 2011 - referencyjna wartość sprawności dla

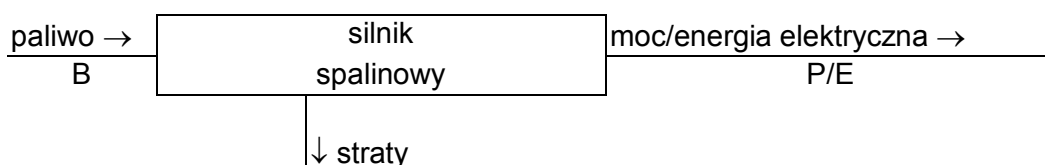
wytwarzania rozdzielonego energii elektrycznej $\eta_{\text{refe}}=52,5\%$, a referencyjna wartość sprawności dla wytwarzania rozdzielonego ciepła $\eta_{\text{refc}}=90\%$. Przy czym w załączniku nr 2 Rozporządzenia podano współczynniki do korygowania o straty przesyłowe referencyjnej wartości sprawności dla wytwarzania rozdzielonego energii elektrycznej η_{refe} w zależności od napięcia sieci do jakiej jednostka kogeneracyjna jest przyłączona (tutaj w wykonywanych obliczeniach ten ważny aspekt pominiemy).

Energię elektryczną wytworzoną w kogeneracji A_b można uznać za energię elektryczną wytworzoną w wysokosprawnej kogeneracji $A_{bq}=A_b$ (i wydać **świadcstwo pochodzenia z kogeneracji**) jeżeli obliczone wartości wskaźnika względnych oszczędności energii pierwotnej PES spełniają warunki:

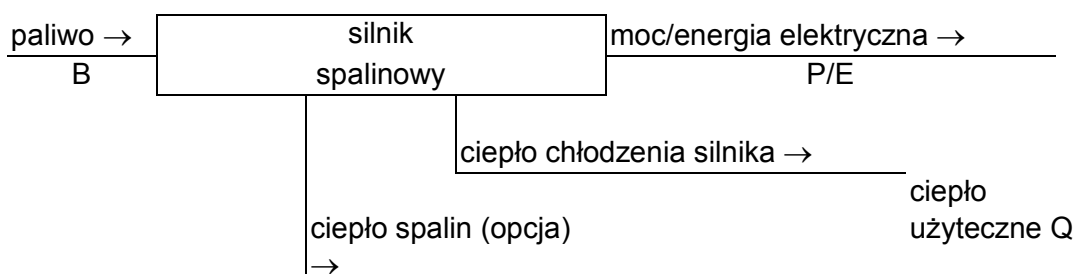
- dla instalacji o mocy powyżej 1 MW - $PES \geq 10\%$;
- dla instalacji o mocy mniejszej lub równej 1 MW - $PES \geq 0$.

Na schematach zamieszczonych poniżej przedstawiono dwa krańcowo różne sposoby wykorzystania silnika tłokowego. „A” to układ prosty (rozdzielony) gdzie z zespołu napędzanego silnikiem spalinowym pobierana jest tylko moc i energia elektryczna. Moc i energia cieplna dostarczana jest odbiorcy z osobnego źródła (tutaj nie narysowanego). „B” to układ kogeneracyjny, z którego pobieramy moc i energię elektryczną oraz wykorzystujemy na cele użyteczne (na cele grzewcze i technologiczne) ciepło z układu chłodzenia silnika i ciepło spalin (opcjonalnie).

A) układ prosty
(rozdzielony)



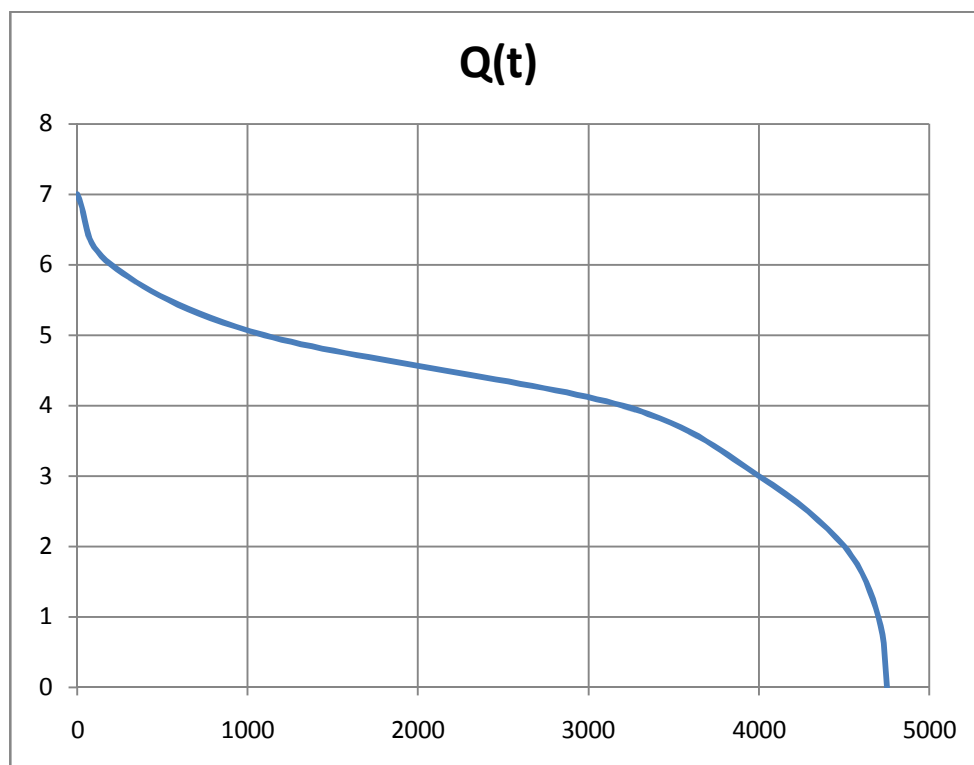
B) układ skojarzony (kogeneracja)



Przy czym układ kogeneracyjny może pracować według: a) grafika obciążeń cieplnych (ang. *bottoming cycle*) lub b) grafika obciążeń elektrycznych (ang. *toping cycle*). W pierwszy przypadku (a) generowane jest tyle mocy/energii elektrycznej ile wynika z zadanego

obciążenia cieplnego i czas trwania pracy zespołu kogeneracyjnego jest równy czasowi trwania obciążenia cieplnego. W drugim przypadku (b) układ musi mieć możliwość wyrzucania ciepła do otoczenia (odstawiania wymiennika ciepła spalin oraz załączania osobnej chłodnicy silnika), by móc generować moc/energię elektryczną przy całkowitym braku zapotrzebowania na moc/energię cieplną.

W tym ćwiczeniu jako paliwo rozpatrywany będzie tylko gaz ziemny sieciowy jako nominalne paliwo dla rozpatrywanych silników³.



Rys.2 Roczny uporządkowany wykres obciążeń cieplnych dla rozważanej jednostki kogeneracyjnej (elektrociepłowni).

Podstawą do projektowania – określenia typu, mocy, liczby i parametrów urządzeń jednostki kogeneracyjnej (elektrociepłowni) jest roczny uporządkowany wykres obciążeń cieplnych $Q(t)$.

3. ZADANIE DO WYKONANIA

Należy dobrać moc szczytowego źródła energii cieplnej Q_{szcz} (kotła wodnego opalanego gazem ziemnym sieciowym) oraz ilość i moce silników spalinowych tłokowych, pracujących w układzie kogeneracji jak na schemacie B, w taki sposób aby zaprojektowana jednostka kogeneracyjna mogła uzyskać maksymalnie możliwą ilość świadectw pochodzenia z kogeneracji wysokosprawnej przy zadanym rocznym uporządkowanym wykresie obciążeń cieplnych $Q(t)$.

Prowadzący zajęcia poda dane do obliczeń i analiz:

³ Preferowane w Dyrektywie i Rozporządzeniu używanie gazu z odmetanowania kopalń lub biogazów obniża moc i sprawność elektryczną a podwyższa moc cieplną i sprawność całkowitą układu. W załączniku nr 2 do Rozporządzenia podano metodę uwzględniania tych zjawisk w obliczeniach.

- a) Skalę mocy na podanym wyżej rocznym uporządkowanym wykresie obciążeń cieplnych $Q(t)$, (np. $1=0,25$ GJ/h lub $1,00$ GJ/h...);
- b) Dane znamionowe dwóch typów gazowych silników kogeneracyjnych tłokowych (odpowiednio dla porównywanych wariantów zespołów kogeneracyjnych A i B):
 - P_A – znamionowa moc elektryczna, kW
 - Q_A – znamionowa moc cieplna, GJ/h
 - j_{pA} – znamionowe jednostkowe zapotrzebowanie paliwa (wymiarowane zawsze w odniesieniu do mocy/energii elektrycznej), kJ/kWh .
 - P_B – znamionowa moc elektryczna, kW
 - Q_B – znamionowa moc cieplna, GJ/h
 - j_{pB} – znamionowe jednostkowe zapotrzebowanie paliwa, kJ/kWh.
- c) Roczny czas pracy każdego i – tego silnika w wariantach zespołów kogeneracyjnych A i B (T_{Ai} , T_{Bi} , $i=1,2,\dots$) należy wyznaczyć z podanego wykresu $Q(t)$ według jego znamionowej mocy cieplnej. Wtedy: $Q_{uAi}=Q_A \cdot T_{Ai}$; $A_{bAi}=P_A \cdot T_{Ai}$; $Q_{bi}=P_{Ai} \cdot T_{Ai} \cdot j_{pA}$.
Uwaga! Zespół kogeneracyjny może składać się z kilku silników, a wtedy każdy z nich będzie miał inny roczny czas użytkowania !
- d) Przeprowadzić obliczenia wartości wytworzonych energii elektrycznych i cieplnych, sprawności ogólnych, wartości wskaźników PES oraz wartości energii elektrycznej wytworzonej w wysokosprawnej kogeneracji dla obu wariantów.

Zaleca się korzystanie z arkusza kalkulacyjnego Excel, ponieważ zapewnia przejrzystość, możliwość korzystania z funkcji oraz ułatwia usuwanie ewentualnych błędów obliczeniowych (przeliczanie jednostek !) i pomyłek.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Wariant A							
2	Znamionowa moc elektryczna zespołu 1a P_{a1} , kW							500
3	Znamionowa moc cieplna zespołu 1a, Q_{a1} , GJ/h							2,16
4	Roczny czas wykorzystania mocy znamionowej zespołu 1a, T_{a1} , h							4200
5	Roczna produkcja energii elektrycznej zespołu 1a, $A_{1a}=P_{a1} \cdot T_{a1}$, kWh							2100000
6								
7								

Np. roczną wartość wytworzonej energii elektrycznej przez zespół 1 wariantu A: $A_{1a}=P_{a1}T_{a1}$ wyliczamy w komórce H5 wpisując symbol = a po nim iloczyn adresów z odpowiednimi wartościami liczbowymi, tutaj będzie to zapis =H2*H4 (adresy wstawiają się same jeśli klikniemy myszką te komórki). Oczywiście trzeba jeszcze sprawdzić miana wartości we wszystkich trzech komórkach (tutaj kW*h=kWh).

W podsumowaniu i wnioskach końcowych należy podać ilości energii elektrycznej spełniającej warunki świadectw kogeneracji wysokosprawnej A_{bq} , łączne ilości wytworzonych energii elektrycznej i cieplnej, wartości sprawności ogólnych oraz wartości wskaźników PES dla obu wariantów jednostek kogeneracyjnych (A i B). Wybrać wariant lepszy (wg kryterium większej wartości sprawności ogólnej) – z uzasadnieniem. Ponadto należy krótko omówić wpływ poszczególnych warunków na uzyskany wynik końcowy.

Zespoły kogeneracyjne tłokowe

Lp.	P	Qu		Qdost.		C=P/Qu	η_{el}	$\eta_{całk}$	j _{pal}
	kW	kW	GJ/h	kW	GJ/h		%	%	kJ/kWh
A	245	407	1,465	709	2,552	0,6	34,5	92	10416
B	240	373	1,343	666	2,398	0,64	36	92	9992
C	300	488	1,757	860	3,096	0,61	34,8	91,6	10320
D	450	680	2,448	1345	4,842	0,66	33,6	84	10760
E	469	623	2,243	1241	4,468	0,75	37,7	88	9527