



Politechnika Wroclawska

Badanie turbiny parowej

Instrukcja do ćwiczenia nr 15

Badanie maszyn - laboratorium

Opracował: dr inż. Andrzej Tatarek

1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest przeprowadzenie badań kontrolnych turbiny parowej 13UC108 w warunkach normalnej eksploatacji, zainstalowanej w bloku ciepłowniczym BC-100 w Zespole Elektrociepłowni Wrocławskich KOGENERACJA S.A. Zakres ćwiczenia obejmuje przeprowadzenie pomiarów określonych wielkości zgodnie z arkuszem pomiarowym załączonym do instrukcji (Załącznik A). Po przeprowadzeniu pomiarów wykonuje się zestawienie bilansu energii oraz wyznacza sprawność turbiny i turbozespołu.

2. Wiadomości podstawowe

Zasada działania turbiny parowej polega na zamianie energii cieplnej czynnika gazowego (pary wodnej) najpierw na energię kinetyczną, a następnie na pracę mechaniczną.

Odpowiednio do tego w skład turbiny parowej wchodzi:

- **elementy ekspansyjne**, w których zachodzi przemiana energii cieplnej czynnika na energię kinetyczną;
- **łopatki wirnikowe**, gdzie energia kinetyczna gazu zamienia się na pracę.

Przyrządy ekspansyjne, zwane dyszami lub kierownicami, połączone są konstrukcyjnie z nieruchomym korpusem turbiny. Łopatki wirnikowe stanowią część wirnika, wykonującego ruch obrotowy.

Stopień turbiny jest to jeden zespół obejmujący wieniec przyrządów ekspansyjnych (wieniec kierowniczy) oraz wieniec łopatek wirnikowych.

Generalnie buduje się turbiny wielostopniowe, czyli turbiny składające się z pewnej liczby stopni umieszczonych szeregowo. Obecnie turbiny jednostopniowe należą do wyjątków.

Zasadniczo turbiny parowe buduje się jako tzw. turbiny o przepływie osiowym, w skrócie nazywane turbinami osiowymi.

Ze względu na sposób pracy stopnia turbiny rozróżnia się:

- **system akcyjny**, w którym cały możliwy spadek entalpii zamienia się na energię kinetyczną w dyszach. Ciśnienie za dyszami równe jest ciśnieniu za wieńcem wirnikowym, nie zachodzi w nim żadna ekspansja;
- **system reakcyjny** polega na tym, że część spadku entalpii, jaki jest możliwy w stopniu turbiny zamienia się na energię kinetyczną w dyszach, czynnik przepływając przez wieniec wirnikowy ekspanduje nadal.

3. Dane charakterystyczne turbiny

Podstawą ekonomiczności siłowni cieplnej jest zarówno sprawność zainstalowanych urządzeń, jak i właściwa eksploatacja. Aby stwierdzić, w jakim stopniu są spełnione założenia, prowadzi się badania dające ocenę sprawności siłowni lub poszczególnych maszyn i urządzeń. Szczególne znaczenie mają badania turbin parowych – kluczowych elementów siłowni cieplnej. Sprawność turbiny w istotny sposób decyduje o sprawności całej siłowni cieplnej.

Do określenia turbiny wystarczają podstawowe dane charakterystyczne:

- rodzaj turbiny z punktu widzenia sposobu wykorzystania energii cieplnej pary odprowadzonej z turbiny (kondensacyjna, przeciwprężna, upustowo-kondensacyjna, upustowo-przeciwprężna);
- moc znamionowa;
- prędkość obrotowa;
- ciśnienie i temperatura pary dolotowej;
- w układach z międzystopniowym przegrzewem – temperatura pary wtórnie przegrzanej;
- w turbinach przeciwprężnych – ciśnienie pary wylotowej;
- w turbinach upustowych – ciśnienie i ilość pary upustowej;

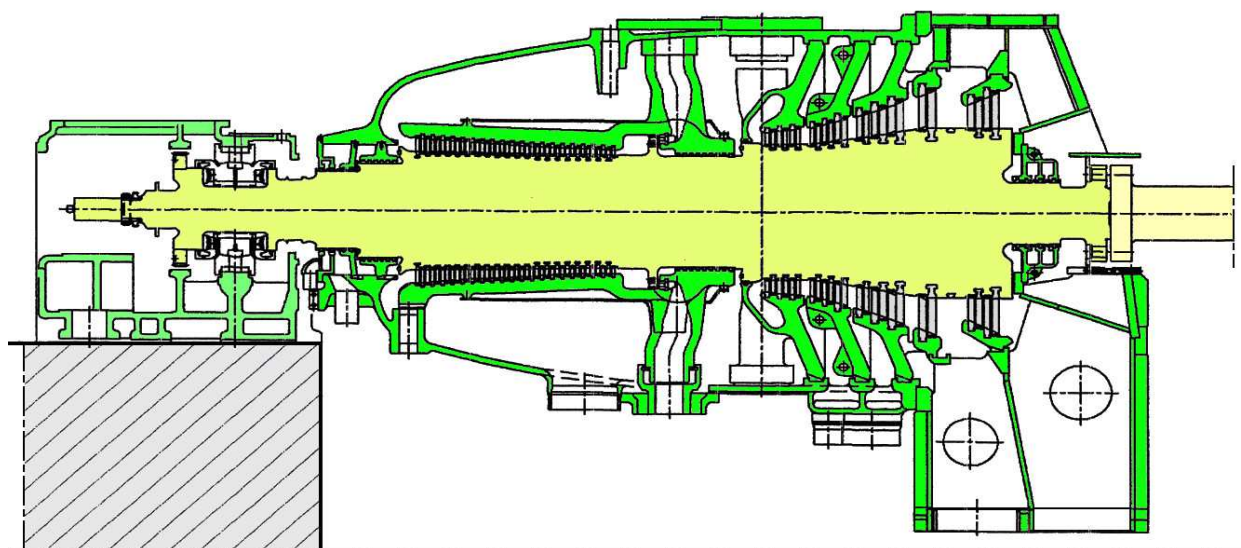
Tabela. 1. Miejsce pomiaru parametrów określających stan czynnika

Lp.	Czynnik	Miejsce pomiaru
1.	para dolotowa	przed zaworem szybkozamykającym
2.	para wylotowa	w turbinie przeciwprężnej – w króćcu wylotowym lub bezpośrednio za nim; w turbinie kondensacyjnej – w gardzieli skraplacza
3.	skropliny ze skraplacza	w rurociągu skroplin u wylotu ze skraplacza
4.	skropliny podgrzane w podgrzewaczach regeneracyjnych	w rurociągu skroplin za ostatnim podgrzewaczem
5.	para upustowa	rurociąg bezpośrednio za wylotem z turbiny
6.	woda chłodząca dopływająca do skraplacza	w pobliżu kołnierza na wejściu wody chłodzącej do skraplacza
7.	woda chłodząca odpływająca ze skraplacza	w pobliżu kołnierza na wyjściu wody chłodzącej ze skraplacza

4. Turbina parowa 13UC108

4.1. Opis turbiny

Turbina parowa 13UC108 jest konstrukcją jednokadłubową, osiową, ze stopniami reakcyjnymi, upustowo-ciepłownicza. Wał turbiny wykonany jest z monolitycznej odkuwki z wysokostopowej stali chromowej. Do wału został przyspawany pierścień koła regulacyjnego. W obszarze ołopatkowania części wysokoprężnej (WP) i średnioprężnej (SP) na wale zostały wytoczone obwodowe wręby łopatkowe do mocowania łopatek wirnika. Łopatki wirnika wykonane są z prętów walcowanych ze stali ferrytycznej z wysokim dodatkiem chromu, jako całofrezowane (nóżka, część profilowana i bandaż łopatki wykonane są z jednego kawałka materiału). Na zewnętrznej części bandaża wytoczone są labirynty uszczelnienia nadbandażowego, które współpracują z blaszkami uszczelniającymi zatamowanymi w kadłubie wewnętrznym (część WP) i obejmach (część SP). Turbina posiada 20 stopni w części WP i 12 w części SP.



Rys. 1. Przekrój turbiny parowej 13UC108

Ołopatkowanie stacjonarne w części WP wykonane jest identycznie jak wirnika z tym, że łopatki zamocowane są we wrębach kadłuba wewnętrznego. Ponadto w kadłubie zamontowano blaszki uszczelnienia nadbandażowych współpracujących z labiryntami uszczelnienia bandażowych łopatek wirnika. Dławnica środkowa jest wykonana jako integralna z kadłubem wewnętrznym.

Ołopatkowanie stacjonarne części SP wykonano jako cztery obejmy (odlewy stalowe). Obejmy są dzielone w płaszczyźnie podziału i skręcane na kołnierzach śrubami dwustronnymi.

Turbina posiada dwa wyloty pary do podgrzewaczy ciepłowniczych oraz cztery upusty. Z pierwszego upustu para pobierana jest do celów technologicznych i grzewczych, z pozostałych trzech kierowana jest do wymienników regeneracyjnych niskoprężnych.

Punkt stały turbiny znajduje się w osi wylotu do podgrzewacza ciepłowniczego XA.

Turbozespół podparty jest na trzech łożyskach w tym jedno jest łożyskiem oporowo-nośnym (umieszczone na koźle w bloku przednim). W bloku przednim zainstalowana jest także obracarka (napędzana silnikiem elektrycznym) zapobiegająca skrzywieniu wirnika podczas postoju turbozespołu.

4.2. Dane techniczne turbiny

Typ turbiny: reakcyjna, osiowa, jednokadłubowa, upustowo-ciepłownicza

- Parametry pary dolotowej do turbiny przed zaworami odcinającymi:
 - ciśnienie znamionowe 12,75 MPa
 - temperatura znamionowa 535 °C
- Masowe natężenie przepływu pary świeżej przed zaworami odcinającymi $\geq 119,44$ kg/s
- Obroty znamionowe 3000 obr/min
- Odbiór pary z wylotu turbiny 6,944 kg/s
- Temperatura wody sieciowej na wlocie do podgrzewacza XA 35 °C
- Masowe natężenie przepływu wody sieciowej 1805,5 kg/s
- Moc elektryczna dla pracy ciepłowniczej mierzona na zaciskach generatora $N_{el} \geq 104,1$ MW
- Jednostkowe zużycie ciepła dla pracy ciepłowniczej $q \leq 10836$ kJ/kWh
- Moc elektryczna dla pracy w pseudokondensacji mierzona na zaciskach generatora $N_{el} \geq 108,1$ MW
- Jednostkowe zużycie ciepła dla pracy na pseudokondensację $q \leq 10435$ kJ/kWh
- Parametry wody sieciowej przy pracy ciepłowniczej dla ilości $m=944,4$ kg/s:
 - temperatura na wlocie do podgrzewacza XA $t_{w1}=50$ °C
 - temperatura na wylocie z podgrzewacza XB $t_{w3}=102,6$ °C
- Dane wirnika:
 - masa załopatkowanego wirnika 20 780 kg
 - długość wirnika z regulatorem bezpieczeństwa i czopem montażowym 6880 mm
 - największa średnica - 10 stopień 1640,1 mm

4.3. Dane układu ciepłowniczego

- Ilość wody sieciowej przepływającej przez XA, XB znam./max 3400/6500 t/h
- Temperatura znamionowa wody sieciowej na wlocie do wymiennika podstawowego XA 50 °C

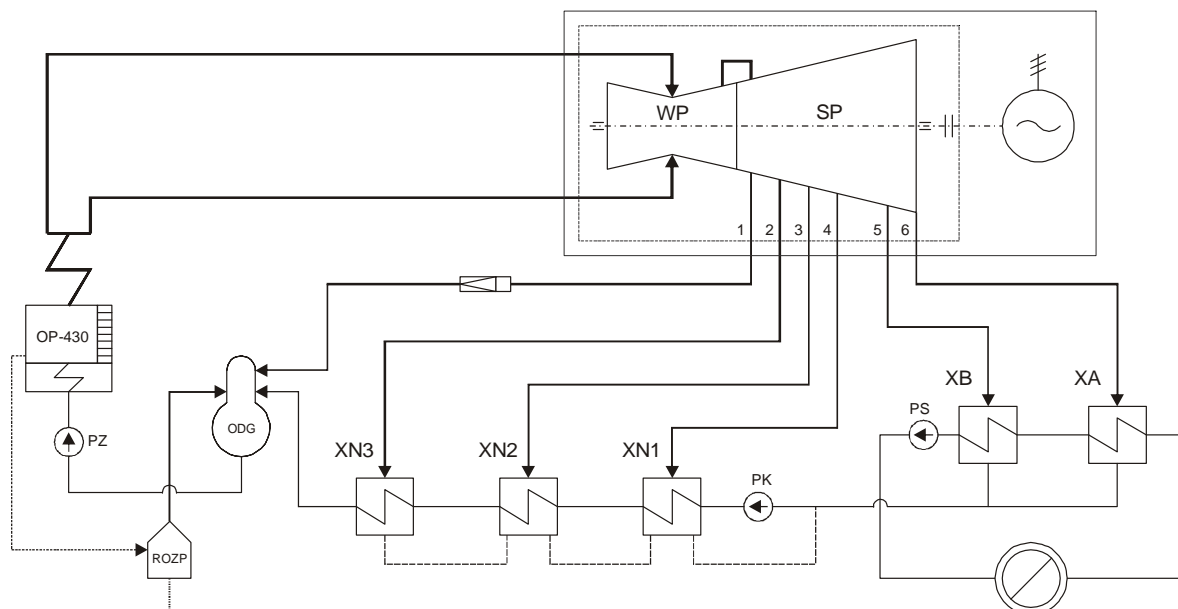
- Zakres zmian temp. wody sieciowej na wlocie do wymiennika podstawowego XA 35÷85 °C
- Temp. znamionowa wody sieciowej na wylocie 80 °C,
- Zakres zmian temp. wody sieciowej na wylocie 50÷130 °C,
- Ciśnienie wody sieciowej max. 1,6 MPa

4.4. Dane wymienników ciepłowniczych

	Wymiennik XA	Wymiennik XB
Typ	poziome, jednostrefowe, powierzchniowe	
Pow. wymiany ciepła	3102 m ²	2906 m ²
Ciśn. znam. pary (względne)	70 kPa	45 kPa
Materiał orurowania	MnŻ101 (dla XA i XB)	
Przestrzeń wodna	28 m ³	27 m ³
Przestrzeń parowa	55 m ³	38 m ³
Max ciśn. pary wylotowej do XA		0,23 MPa

5. Badanie cieplne turbin parowych

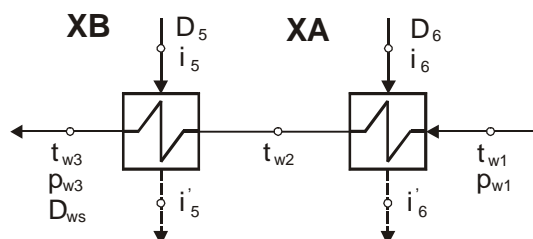
5.1. Schemat układu cieplnego bloku ciepłowniczego BC-100



Rys. 2. Schemat układu cieplnego bloku ciepłowniczego BC-100 wraz z zaznaczonymi osłonami bilansowymi turbiny i turboszespołu. ODG – odgazowywacz, ROZP – rozprężacz, XN1-XN3 – podgrzewacze regeneracyjne, XA i XB – podgrzewacze wody sieciowej, PZ – pompa zasilająca, PK – pompa kondensatu, PS – pompa wody sieciowej

5.2. Obliczenia cieplno-bilansowe bloku ciepłowniczego BC-100

Z przeprowadzonych pomiarów (zob. tabela pomiarowa) wynika, że w układzie kontrolno-pomiarowym bloku BC-100 nie ma pomiaru strumienia masy pary pobieranej z drugiego upustu (D_2) oraz strumieni masy pary (D_5 i D_6) kierowanej na wymienniki ciepłownicze (podgrzewacze wody sieciowej) XA i XB.



Rys. 3. Wymienniki ciepłownicze XA i XB

Bilans cieplny wymiennika ciepłowniczego (sieciowego) XA

Z bilansu wymiennika wyznaczamy strumień masy pary D_6 w kg/s:

$$D_6 \cdot \eta_w \cdot (i_6 - i_6') = D_{ws} \cdot c_w \cdot (t_{w2} - t_{w1})$$

gdzie:

η_w – sprawność wymiennika ciepłowniczego, do obliczeń przyjmujemy równą 0,98;

i_6 – entalpia pary przegrzanej odczytana dla t_6 i p_6 ; jeśli rozprężanie pary w turbinie kończy się na linii $x=1$, wtedy do obliczeń przyjmujemy i_6'' , czyli entalpię pary nasyconej suchej odczytaną dla ciśnienia nasycenia, kJ/kg;

i_6' – entalpia wody w stanie nasycenia odczytana dla ciśnienia p_6 (lub temperatury t_6) nasycenia, kJ/kg;

D_{ws} – strumień masy wody sieciowej, kg/s;

c_w – średnie ciepło właściwe wody, do obliczeń przyjmujemy 4,187 kJ/kg·K;

t_{w1} – temperatura wody sieciowej przed wymiennikiem XA, °C;

t_{w2} – temperatura wody sieciowej za wymiennikiem XA, °C.

Bilans cieplny wymiennika ciepłowniczego (sieciowego) XB

Z bilansu wymiennika wyznaczamy strumień masy pary D_5 w kg/s:

$$D_5 \cdot \eta_w \cdot (i_5 - i_5') = D_{ws} \cdot c_w \cdot (t_{w3} - t_{w2})$$

gdzie:

η_w – sprawność wymiennika ciepłowniczego, do obliczeń przyjmujemy równą 0,98;

i_5 – entalpia pary przegrzanej odczytana dla t_5 i p_5 ; jeśli rozprężanie pary w turbinie kończy się na linii $x=1$, wtedy do obliczeń przyjmujemy i_5'' , czyli entalpię pary nasyconej suchej odczytaną dla ciśnienia nasycenia, kJ/kg;

i_5' – entalpia wody w stanie nasycenia odczytana dla ciśnienia p_5 (lub temperatury t_5) nasycenia, kJ/kg;

t_{w2} – temperatura wody sieciowej przed wymiennikiem XB, °C;

t_{w3} – temperatura wody sieciowej za wymiennikiem XB, °C.

Bilans masowy turbiny

Z bilansu wyznaczamy strumień masy pary pobierany w drugim upuście

$$D_2 = D_p - (D_1 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6), \quad \text{kg/s}$$

Bilans cieplny turbiny (pierwsza osłona bilansowa)

$$Q_D = N_u + Q_{ciep} + Q_{reg} + S_m + S_r$$

Strumień ciepła doprowadzony do turbiny w parze przegrzanej

$$Q_D = D_p \cdot i_p, \quad \text{kW}$$

gdzie: D_p – strumień masy pary kierowany na turbinę (suma lewa + prawa strona), kg/s;

i_p – entalpia pary przegrzanej w kJ/kg odczytana dla temperatury t_p i ciśnienia p_p .

Strumień ciepła odprowadzany na wymienniki ciepłownicze XA i XB

$$Q_{ciep} = D_5 \cdot i_5 + D_6 \cdot i_6, \quad \text{kW}$$

gdzie: D_5 – strumień masy pary kierowany na wymiennik ciepłowniczy XB, kg/s;

i_5 – entalpia pary w pierwszym wylocie ciepłowniczym, kJ/kg;

D_6 – strumień masy pary kierowany na wymiennik ciepłowniczy XA, kg/s;

i_6 – entalpia pary w drugim wylocie ciepłowniczym, kJ/kg;

Strumień ciepła odprowadzany do regeneracyjnych podgrzewaczy wody zasilającej

$$Q_{reg} = D_1 \cdot i_1 + D_2 \cdot i_2 + D_3 \cdot i_3 + D_4 \cdot i_4, \quad \text{kW}$$

gdzie: $D_1 \div D_4$ – strumienie pary w upustach 1÷4, kg/s;

$i_1 \div i_4$ – entalpie pary w upustach 1÷4, kJ/kg;

Moc wewnętrzna turbiny

$$N_i = D_p \cdot (i_p - i_1) + (D_p - D_1) \cdot (i_1 - i_2) + (D_p - D_1 - D_2) \cdot (i_2 - i_3) + (D_p - D_1 - D_2 - D_3) \cdot (i_3 - i_4) + (D_p - D_1 - D_2 - D_3 - D_4) \cdot (i_4 - i_5) + (D_p - D_1 - D_2 - D_3 - D_4 - D_5) \cdot (i_5 - i_6), kW$$

Moc użyteczna turbiny

$$N_u = \eta_m \cdot N_i, \quad kW$$

gdzie: η_m – sprawność mechaniczna, do obliczeń przyjmujemy równą 0,96

Moc tracona w wyniku strat mechanicznych

$$S_m = N_i - N_u = (1 - \eta_m) \cdot N_i, \quad kW$$

Reszta strat

$$S_r = Q_D - (N_u + Q_{ciep} + Q_{reg} + S_m), \quad kW$$

Sprawność wewnętrzna turbiny

$$\eta_i = \frac{N_i}{N_t}$$

gdzie: N_t – moc teoretyczna turbiny jest funkcją strumienia masy pary i izentropowego spadku entalpii, kW;

N_i – moc wewnętrzna przekazana przez parę wirnikowi turbiny jest funkcją strumienia masy pary i rzeczywistego spadku entalpii, kW;

Sprawność ogólna turbiny

$$\eta_{OT} = \eta_i \cdot \eta_m$$

Bilans cieplny turbozespołu (druga osłona bilansowa)

$$Q_D = N_{el} + Q_{ciep} + Q_{reg} + S_m + S_g + S_r$$

Moc elektryczna turbozespołu

$$N_{el} = \eta_g \cdot N_u, \quad kW$$

gdzie: η_g – sprawność generatora, do obliczeń przyjmujemy równą 0,986

Straty mocy w generatorze

$$S_g = N_u - N_{el} = (1 - \eta_g) \cdot N_u = (1 - \eta_g) \cdot \eta_m \cdot N_i, \quad kW$$

Reszta strat turbozespołu

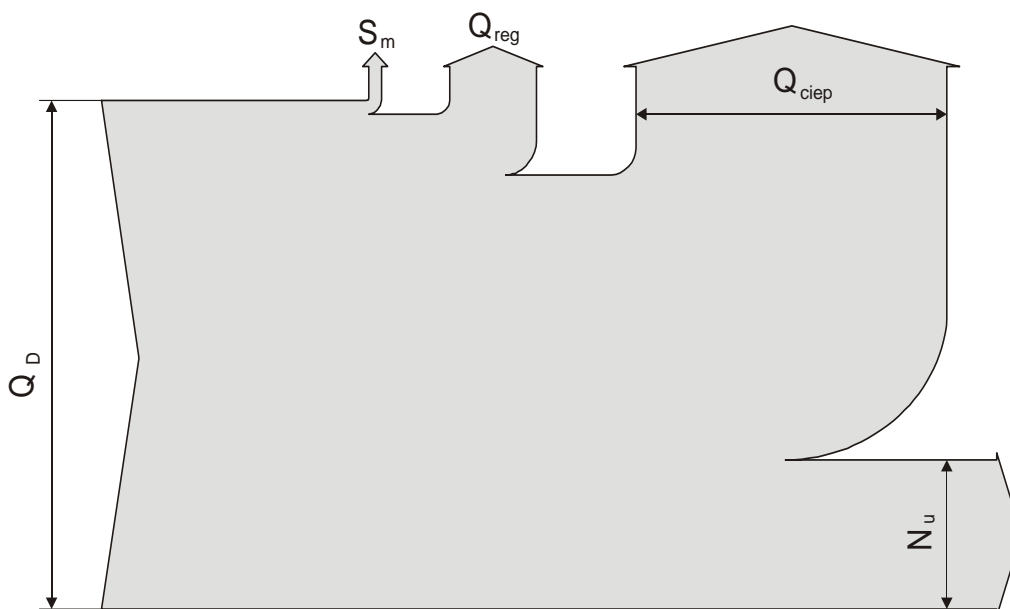
$$S_r = Q_D - (N_{el} + Q_{ciep} + Q_{reg} + S_m + S_g), \quad \text{kW}$$

Sprawność ogólna turbozespołu

$$\eta_{OTZ} = \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g$$

5.3. Graficzne przedstawienie bilansu turbiny i turbozespołu – wykres Sankeya

W sprawozdaniu należy sporządzić wykres Sankeya dla turbiny (pierwsza osłona bilansowa) i turbozespołu (druga osłona bilansowa). Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wykres dla turbiny.



Rys. 4. Wykres Sankeya – bilans energii w turbinie

5.4. Graficzne przedstawienie rozprężania pary w turbinie

Na fragmencie wykresu $i-s$ dla pary wodnej (Załącznik B), należy zaznaczyć kolejne etapy rozprężania pary w turbinie.

Ćwiczenie nr 15. Badanie turbiny parowej

.....
Imię i nazwisko.....
Nr grupy.....
Data $p_b = \dots\dots\dots$ hPa

Arkusz pomiarowy

	Wielkość mierzona	Symbol	Jednostka	Wartość
Para świeża	Strumień masy pary świeżej	D_p	Mg/h	
	Temperatura pary świeżej	t_p	°C	
	Ciśnienie pary świeżej	p_p	MPa	
Upusty pary	Strumień masy pary w upuście nr 1	D_1	Mg/h	
	Temperatura pary w upuście nr 1	t_1	°C	
	Ciśnienie pary w upuście nr 1	p_1	MPa	
	Strumień masy pary w upuście nr 2	D_2	Mg/h	
	Temperatura pary w upuście nr 2	t_2	°C	
	Ciśnienie pary w upuście nr 2	p_2	MPa	
	Strumień masy pary w upuście nr 3	D_3	Mg/h	
	Temperatura pary w upuście nr 3	t_3	°C	
	Ciśnienie pary w upuście nr 3	p_3	kPa	
	Strumień masy pary w upuście nr 4	D_4	Mg/h	
	Temperatura pary w upuście nr 4	t_4	°C	
	Ciśnienie pary w upuście nr 4	p_4	kPa	
Wyloty ciepłownicze	Strumień masy pary w I wylocie ciepl.	D_5	kg/s	
	Temperatura pary w I wylocie ciepl.	t_5	°C	
	Ciśnienie pary w I wylocie ciepl.	p_5	kPa	
	Strumień masy pary w II wylocie ciepl.	D_6	kg/s	
	Temperatura pary w II wylocie ciepl.	t_6	°C	
	Ciśnienie pary w II wylocie ciepl.	p_6	kPa	
Parametry wody sieciowej	Temperatura wody sieciowej przed wymiennikiem XA	t_{w1}	°C	
	Ciśnienie wody sieciowej przed wymiennikiem XA	p_{w1}	MPa	
	Temperatura wody sieciowej pomiędzy wymiennikami XA i XB	t_{w2}	°C	
	Temperatura wody sieciowej za wymiennikiem XB	t_{w3}	°C	
	Ciśnienie wody sieciowej za wymiennikiem XB	p_{w3}	MPa	
	Strumień masy wody sieciowej	D_{ws}	Mg/h	

