

Modelowanie turbin parowych

Cel modelowanie turbin

- Modelowanie pracy w zmienionych warunkach pracy

Warunki

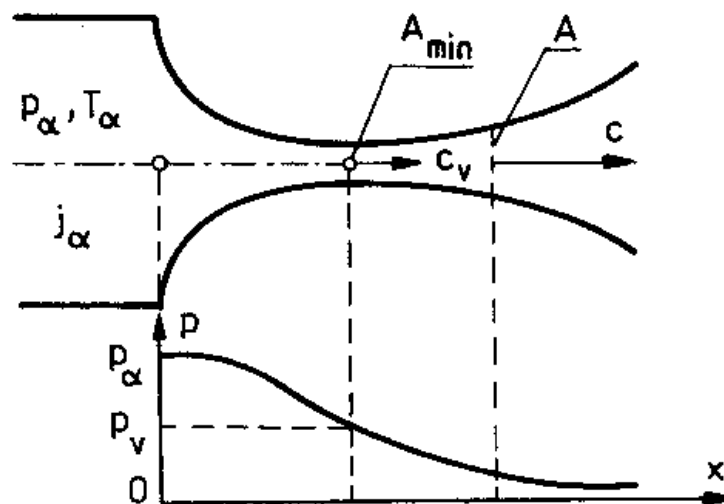
- Zmienne
- Zmienione
- Jakie cech/parametry powinny być modelowane?
 - przepływ
 - Jakość procesu rozprężania

Elementy składowe

- Dysza
- Stopień turbinowy
- Grupa stopni turbinowych
- Zawór
- Rozrząd pary

Dysza prosta w zmienionych warunkach

Rys.2.1. Schemat zmian przekroju poprzecznego dyszy przy rozprężaniu od parametrów p_α, T_α bez prędkości początkowej do bardzo małego ciśnienia; A_{\min} - minimalny przekrój dyszy



$$\Phi_m = \frac{\dot{m}}{A} = c \cdot \frac{1}{v} = c \cdot \rho \quad - \text{gęstość strumienia masy}$$

\dot{m} – strumień masy, A – powierzchnia przekroju, c – prędkość przepływu
 v – objętość właściwa, ρ - gęstość właściwa

Dysza prosta w zmienionych warunkach

$$\Phi_m = \frac{\dot{m}}{A} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_\alpha}{v_\alpha}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_\alpha}\right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{p}{p_\alpha}\right)^{\frac{n+1}{n}}}$$

Funkcja powyższa uzyskuje wartość max dla

$$\beta = \left(\frac{p}{p_\alpha}\right)_v = \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Odpowiadająca mu prędkość przepływu

$$c_v = \sqrt{2j_\alpha \frac{n-1}{n+1}}$$

„v” – oznacza wielkości dla najmniejszego przekroju

Dysza prosta w zmienionych warunkach

Można wyznaczyć przelotność dyszy zbieżnej przekroju A na wylocie

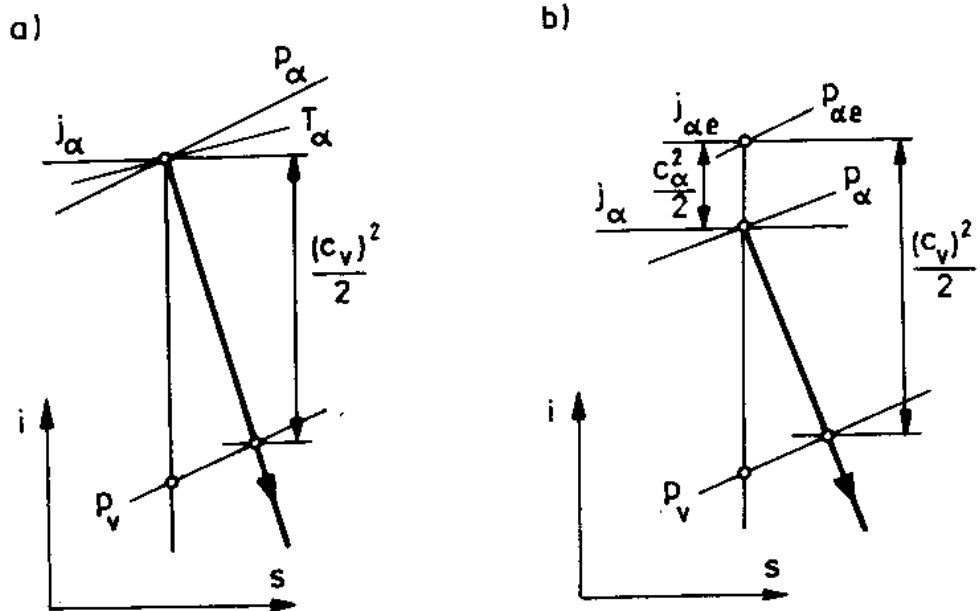
$$B = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_v} = \sqrt{\frac{n+1}{n-1} \left(\frac{n+1}{2} \right)^{\frac{2}{n-1}}} \sqrt{\left(\frac{p_\omega}{p_\alpha} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{p_\omega}{p_\alpha} \right)^{\frac{n+1}{n}}}$$

Dla

$$\varepsilon = \left(\frac{p_\omega}{p_\alpha} \right) \geq \beta$$

Dysza prosta w zmienionych warunkach

Powyższe wyliczenia zostały wykonane przy założeniu, że prędkość początkowa jest równa zero



Rys.2.2. Schemat procesu rozprężania w dyszy:
a) bez prędkości początkowej, b) z prędkością początkową c_α

Przelotność palisady profili i wieńca łopatkowy

Różnice względem dyszy

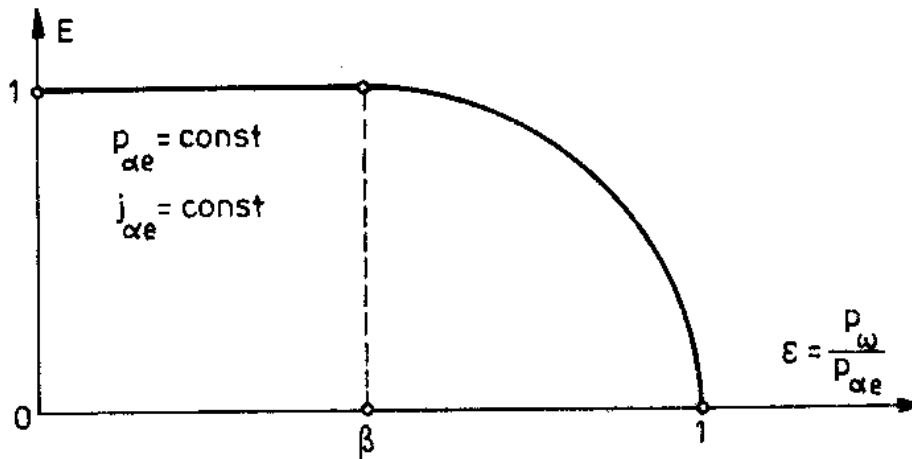
- niekołowy przekrój poprzeczny
- zakrzywienie osi tego kanału
- istnienie skośnego ciśnienia na wylocie

$$\dot{m} = \mu \cdot B \cdot \dot{m}_v$$

μ - współczynnik kontrakcji

Przelotność palisady profili i wieńca łopatkowy

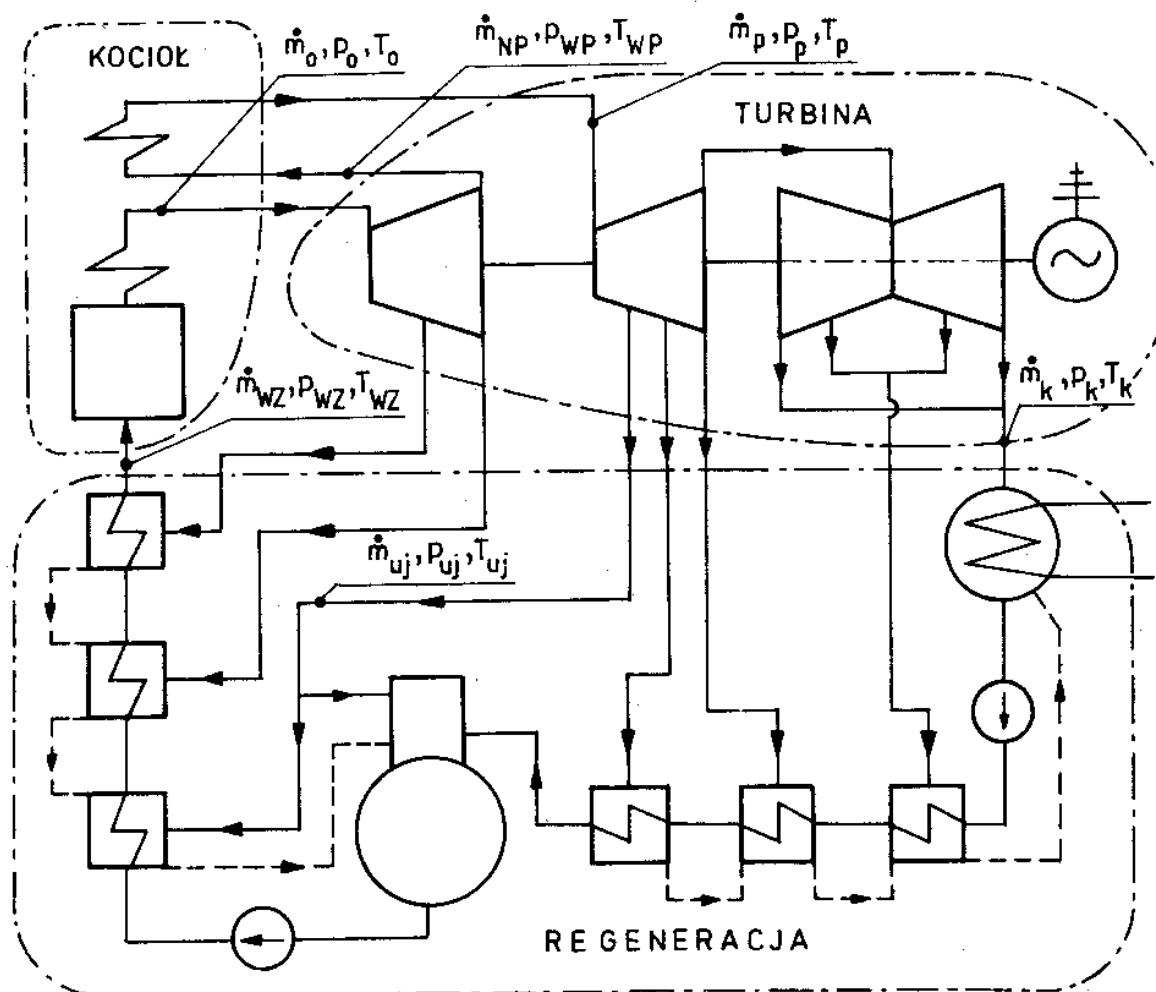
Bendeman



Rys.2.3. Zależność względnego strumienia masy przepływającego przez palisadę od stosunku ciśnień, przy ustalonych parametrach dołotowych

$$E = \frac{\mu \cdot \dot{m}_v \cdot B}{(\mu \cdot \dot{m})_v} = \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon - \beta}{1 - \beta} \right)^2}$$

Turbina jako element siłowni



Rys.7.1. Przykładowy schemat cieplny bloku z zaznaczeniem jego podziału na moduły: kocioł, turbinę i układ regeneracji. Zaznaczono wielkości łączące modele wyróżnionych modułów

Główne zmienne wejściowe i wyjściowe

1) kocioł

wejścia:

- strumień masy \dot{m}_{wz} , temperatura T_{wz} oraz ciśnienie p_{wz} wody zasilającej,
- strumień masy \dot{m}_{wp} , temperatura T_{wp} i ciśnienie p_{wp} pary kierownej z części wysokoprężnej turbiny do międzystopniowego przegrzewacza,

wyjścia:

- strumień masy \dot{m}_o , temperatura T_o i ciśnienie p_o pary dolotowej,
- strumień masy \dot{m}_p , temperatura T_p i ciśnienie p_p pary wtórnie przegrzanej;

2) turbina

wejścia:

- wielkości wymienione jako wyjścia kotła,
- ciśnienie p_k w skraplaczu,
- strumień masy pary upustowej \dot{m}_{uj} ;

wyjścia:

- ciśnienia p_{uj} i temperatury T_{uj} pary upustowej,
- strumień masy \dot{m}_k i entalpia i pary odlotowej,
- strumień masy \dot{m}_{wp} , temperatura T_{wp} i ciśnienie p_{wp} ,
- moc elektryczna P_{el} ;

3) układ regeneracji

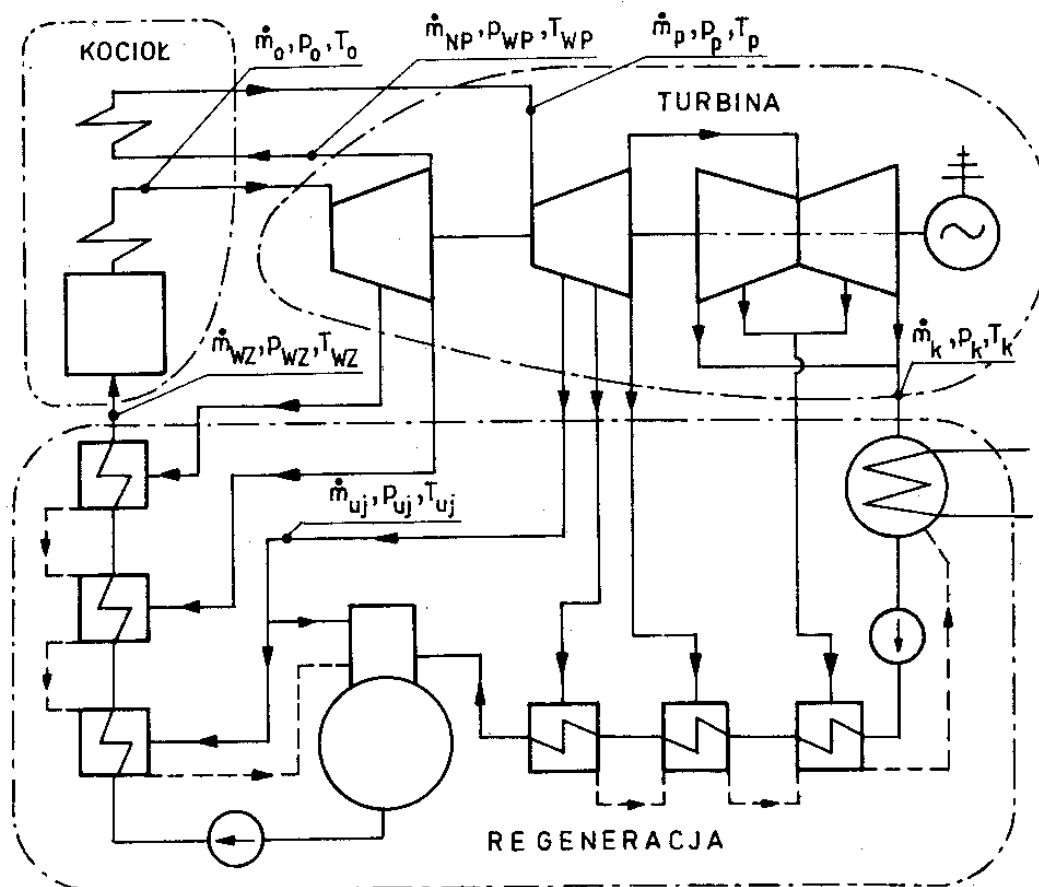
wejścia:

- ciśnienia p_{uj} i temperatury T_{uj} ,
- strumień masy \dot{m}_k i entalpia i_k ;

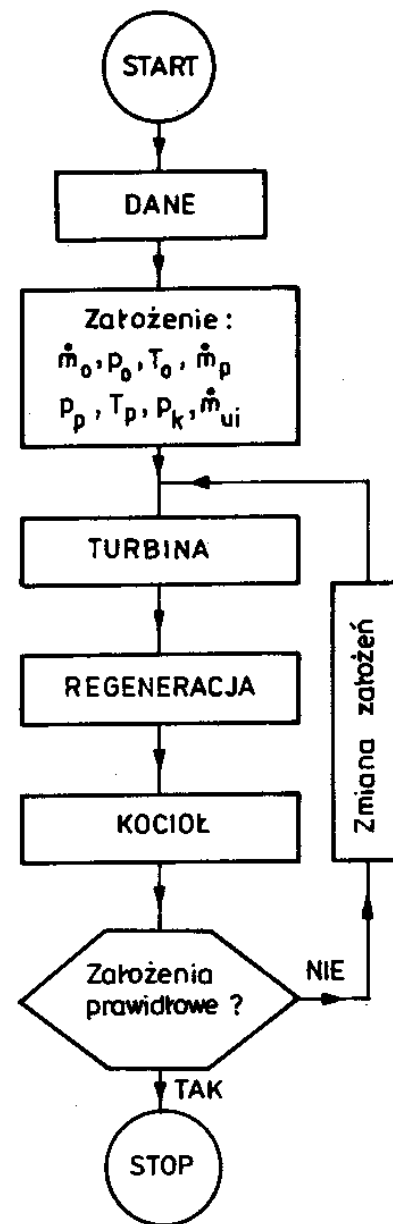
wyjścia:

- strumień masy \dot{m}_{uj} pary upustowej,
- strumień masy \dot{m}_{wz} , temperatura T_{wz} i ciśnienie p_{wz} .

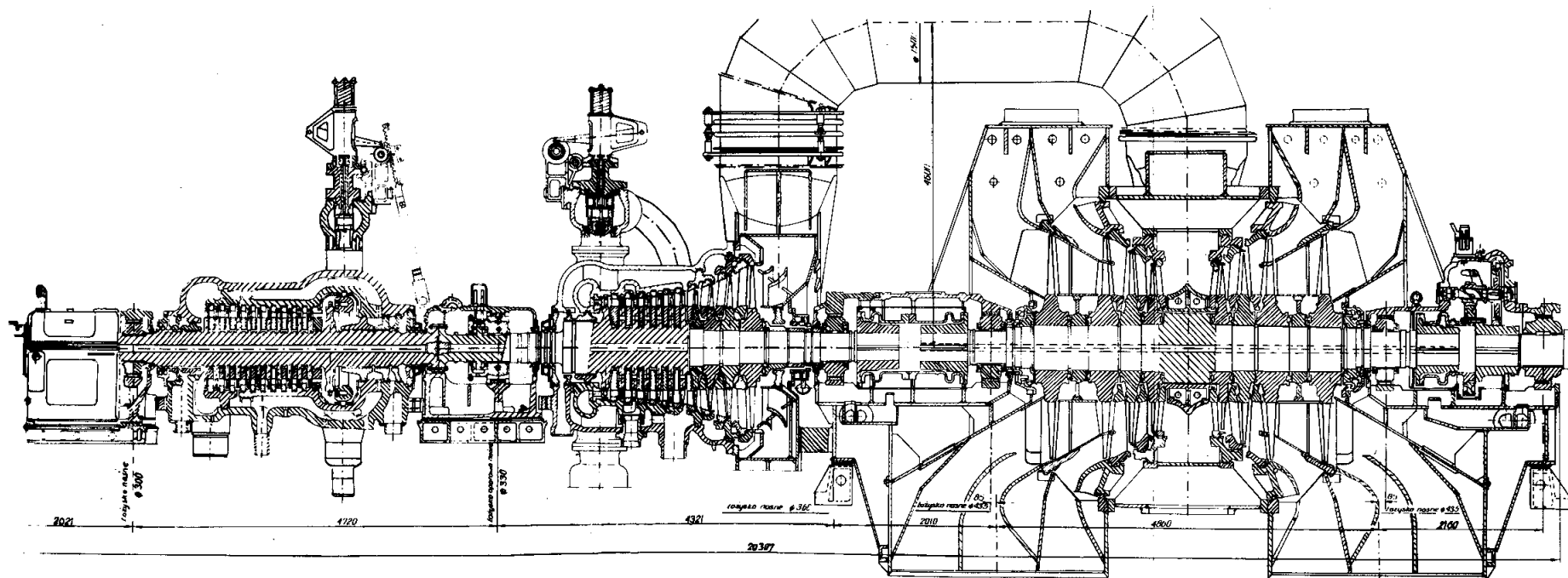
Schemat rozwiązania zadania



Rys.7.1. Przykładowy schemat cieplny bloku z zaznaczeniem jego podziału na moduły: kocioł, turbinę i układ regeneracji. Zaznaczono wielkości łączące modele wyróżnionych modułów



Przykład Turbina 13K215



Rys.7.3. Rysunek układu przepływowego turbiny 13K215

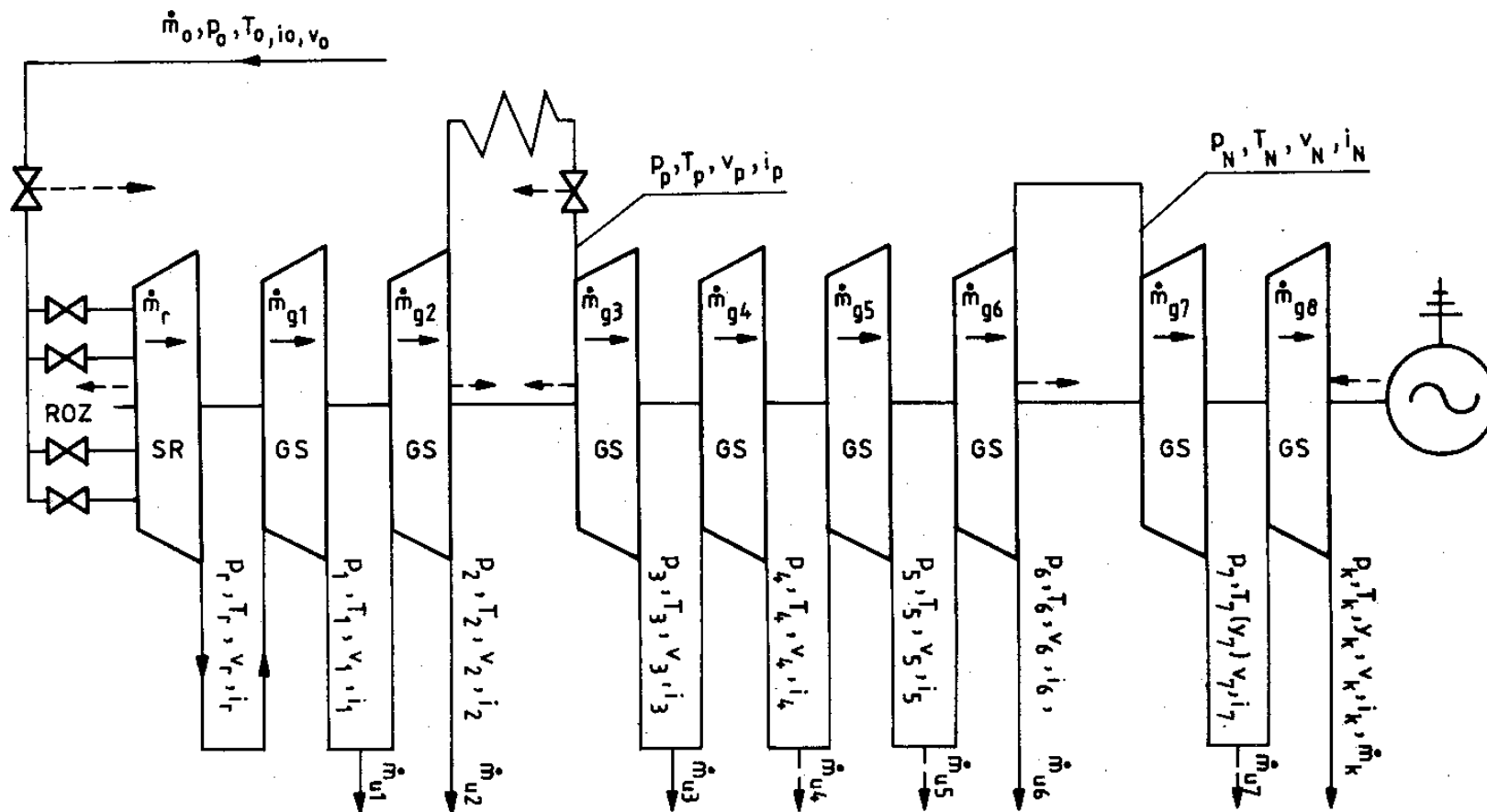
Wielkości wejściowe

- Parametry pary dolotowej p_o , T_o ,
- Temperatura pary wtórnie przegrzanej T_p ,
- Ciśnienie w skraplaczu p_k ,
- Strumień masy pary dolotowej m_o ,
- Strumień masy pary upustowej m_{uj} .
 - Pominęto masy wody wtryskowej

Wielkości wyjściowe

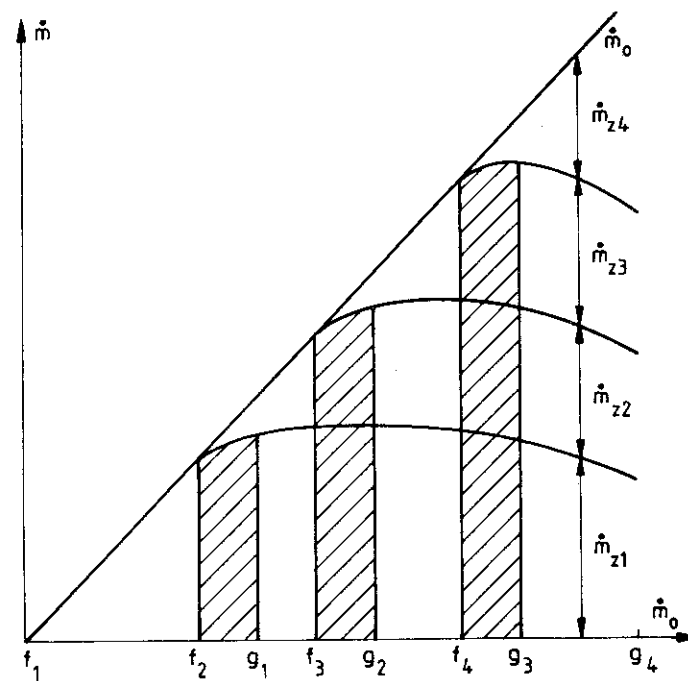
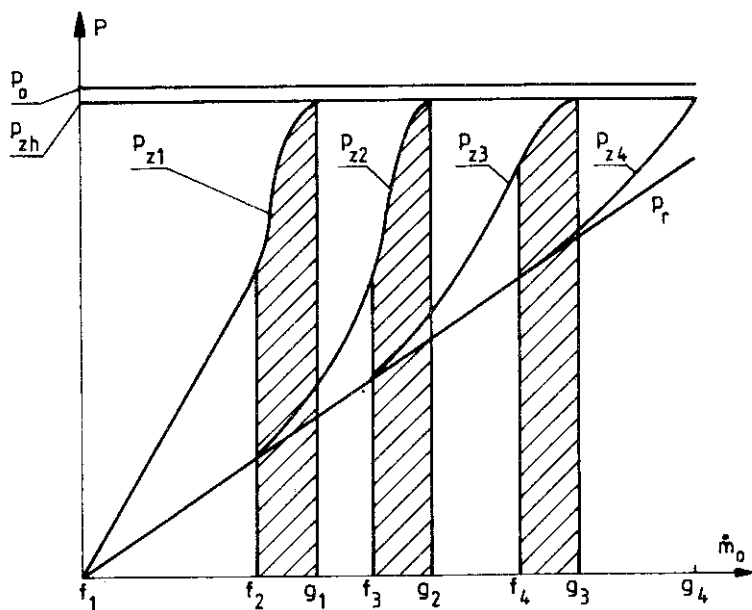
- Moc elektryczna
- Strumień masy pary do skraplacza
- Parametry termodynamiczne

Schemat zastępczy



Rys.7.4. Schemat zastępczy układu przepływowego turbiny 13K215; ROZ - rozrząd pary, SR - stopień regulacyjny, GS - grupa stopni

Przykład grupowego rozrządu pary



Rys.7.5. Przykładowe charakterystyki grupowego rozrządu pary z przykryciem zaworowym

Obliczenia grupowego rozrządu pary

- Strumień masy przez zawór = przez współpracujące dysze
1. Wyznaczenie znamionowego krytycznego strumienia masy pary w poszczególnych dyszach
 2. Przechodzi się do warunków zmienionych - wyznacza się największe możliwe strumienie masy pary w poszczególnych całkowicie otwartych zaworach (przyjmuje się pewną stratę ciśnienia na zaworze całkowicie otwartym)

Obliczenia grupowego rozrządu pary c.d

3. Określenie liczby zaworów całkowicie otwartych oraz zaworów częściowo otwartych
4. Określenie przepływu i ciśnienia za zaworem częściowo otwartym (ciśnienie z równania przelotności)

Obliczenia stopnia regulacyjnego

- Wielkości zadane
 - Strumienie masy pary przez poszczególne grupy dysz
 - Ciśnienie i entalpia za zaworem, ciśnienie za stopniem.
- Wielkość wyjściowa
 - Moc stopnia
 - Pozostałe parametry termodynamicznych

Etapy obliczeń stopnia regulowanego

- Izentropowy spadek entalpii
- Wskaźniki prędkości jako funkcja dH_{izen}

$$x = \frac{u}{c_\varphi}$$

u – prędkość, c_φ - umowna prędkość dla izentropowego spadku

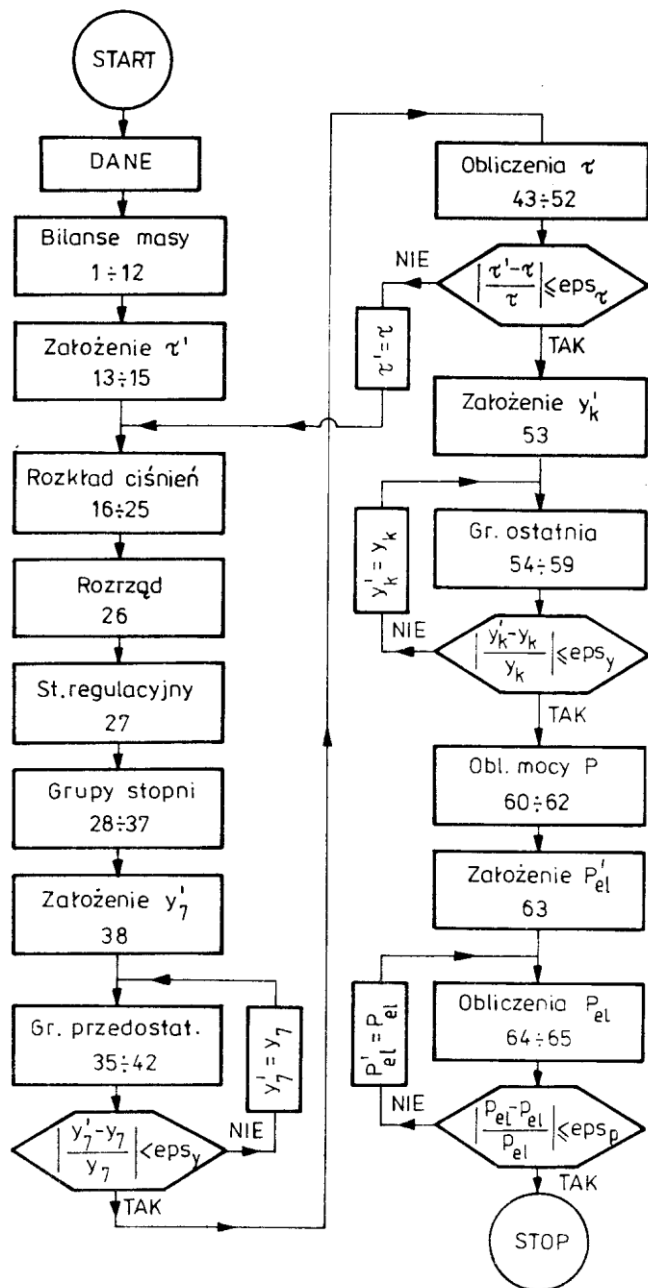
- Do obliczeń niezbędna jest znajomość charakterystyki sprawnościowej jako funkcji wskaźniki prędkości i stosunku ciśnień przed i za grupą stopni
- Moc obwodowa stopnia
- Określenie strat wybijania, tarcia i wentylacji → charakterystyki fabryczne
- Moc wewnętrzną stopnia

Obliczenie grupy stopni nieregulowanych

- Wielkości zadane
- Strumień masy przepływający przez grupę
 - Temperatura pary przed grupą stopni
 - Ciśnienie za grupą stopni
- Wyznaczane
 - Moc grupy stopni
 - Pozostałe parametry termodynamiczne
- **Wyznaczenie ciśnienia przed grupą stopni**
 - Obliczenia ciśnienia przed grupą stopni dokonuje się z odpowiedniego równania przelotności dla grupy stopni turbinowych
 - Najczęściej jednak nie znana jest temperatura przed grupą stopni i musi ona być wyznaczona iteracyjnie

Wyznaczeni mocy grupy stopni

- Wyznaczenie izentropowego spadku entalpii
 - Turbina pracuje ze stałą prędkością obrotową
 - Wszystkie środkowe stopnie zachowują w zasadzie stały stosunek ciśnienie na wlocie do ciśnienia na wylocie
- Przy takich założeniach sprawność równa się sprawności znamionowej



Schemat obliczeń turbiny parowej

Rys.7.7. Schemat blokowy rozwiązania modelu matematycznego turbiny 13K215. W poszczególnych blokach wpisano numery zależności modelu - zgodnie z rozdz. 7.2.4

Model grupy stopni turbinowych – model fizyczny

- Bilans masy

$$m_a - m_b = 0$$

- Bilans energii

$$h_a m_a - h_b m_b - P_{wew} = 0$$

- Równanie przelotności

Równanie przelotności 1

- Przepływ podkrytyczny, gdy przyływ nominalny jest również podkrytyczny

gdzie

$$\frac{p_x \left[\mu_{(x,y)} - \left(\frac{p_y}{p_x} - \sigma_{(x,y)} \right)^2 \right]}{v_p(h_x, p_x)} \alpha - \frac{m_{(x,y)}^2}{m_{zn(x,y)}^2} = 0$$

$$\alpha = \frac{v_p(h_{zn}, p_{zn})}{p_{zn_x} \left[\mu_{(x,y)} - \left(\frac{p_{zn_y}}{p_{zn_x}} - \sigma_{(x,y)} \right)^2 \right]}$$

$$\mu_{(x,y)} = \left(1 - \sigma_{(x,y)} \right)^2$$

Równanie przelotności 2

- Przepływ podkrytyczny, gdy przyływ nominalny jest nadkrytyczny

$$\frac{p_x \left[\mu_{(x,y)} - \left(\frac{p_y}{p_x} - \sigma_{(x,y)} \right)^2 \right]}{v_p(h_x, p_x)} \alpha - \frac{m_{(x,y)}^2}{m_{zn_{(x,y)}}^2} = 0 \quad (\text{jak wcześniej})$$

gdzie

$$\alpha = \frac{v_p(h_{zn}, p_{zn})}{p_{zn} \mu_{(x,y)}}$$

Równanie przelotności 3

- Przepływ nadkrytyczny, gdy przyływ nominalny jest podkrytyczny

$$\frac{p_x}{v_p(h_x, p_x)} \alpha - \frac{m_{(x,y)}^2}{m_{zn(x,y)}^2} = 0$$

gdzie

$$\alpha = \frac{v_p(h_{zn}, p_{zn}) \mu_{(x,y)}}{p_{zn_x} \left[\mu_{(x,y)} - \left(\frac{p_{zn_y}}{p_{zn_x}} - \sigma_{(x,y)} \right)^2 \right]}$$

Równanie przelotności 4

- Przepływ nadkrytyczny, gdy przyływ nominalny jest również nadkrytyczny

$$\frac{p_x}{v_p(h_x, p_x)} \alpha - \frac{m_{(x,y)}^2}{m_{zn(x,y)}^2} = 0$$

gdzie α

$$\alpha = \frac{v_p(h_{zn}, p_{zn})}{p_{zn_x}}$$

Inna postać równania przelotności

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_o} - \frac{p_a}{p_{a_{zn}}} \cdot \frac{h_{a_{zn}}}{h_a} \cdot \sqrt{\frac{1 - \pi^2 - \frac{\beta_{go}}{1 - \beta_{go}} \cdot (1 - \pi)^2}{1 - \pi_{zn}^2 - \frac{\beta_{go}}{1 - \beta_{go}} \cdot (1 - \pi_{zn}^2)^2}} = 0$$

- Przy założeniu $\beta_{go}=0$ równanie przyjmuje następującą postać

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_o} - \frac{p_a}{p_{a_{zn}}} \cdot \frac{h_{a_{zn}}}{h_a} \cdot \sqrt{\frac{1 - \pi^2}{1 - \pi_{zn}^2}} = 0$$

Charakterystyka sprawnościowa grupy stopni turbinowych

$$\frac{\eta_{i(a,b)}}{\eta_{io(a,b)}} - 1 - 5\mathcal{G} + \mathcal{G} \left[\left(\frac{\pi}{\pi_o} \right)^4 + 4 \left(\frac{\pi_o}{\pi} \right) \right] = 0 \quad \pi = \frac{p_b}{p_a}$$

- Gdzie

$$\mathcal{G} = \upsilon \cdot e^{\left(\frac{9.66 p_{ob}}{p_{oa}} \right)}$$

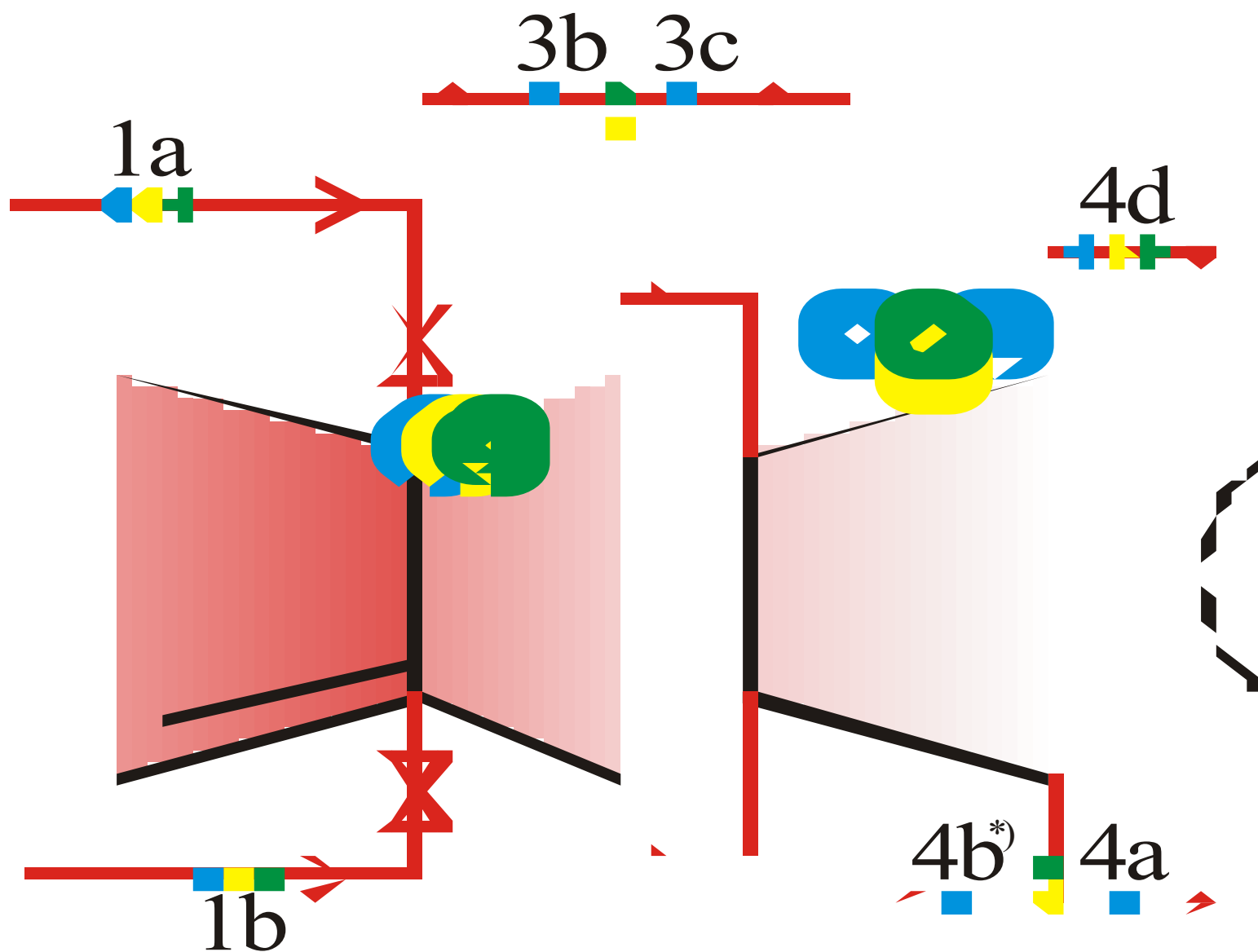
$u = 0,000286$ dla turbiny akcyjnej,

$u = 0,000333$ dla turbiny o małej reakcyjności $0,15 \div 0,3$,

$\upsilon = 0,000869$ dla turbiny reakcyjnej o reakcyjności ok. $0,5$

- Entalpia za grupą stopni turbinowych

Jak to działa ?



Zmiana zależności w funkcji ciśnienia przed turbiną

