

**Modelowanie osiągnięć silników
lotniczych
wykład nr 2 – 3
Dekompozycja silnika –
modelowanie komponentów**

Dr inż. Robert JAKUBOWSKI
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej

Obliczenia silnika - modele

- Punkt obliczeniowy – punkt determinujący charakterystyczne wymiary silnika – nie wymaga map charakterystyk, ale należy określić zakładane sprawności i wydatki masowe w przekrojach kontrolnych.
- Obliczenia poza punktem obliczeniowym wymagają map charakterystyk oraz zdefiniowanych w punkcie obliczeniowym charakterystycznych wymiarów silnika

MODELOWANIE OSIĄGÓW TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO

- Do oceny osiązków używa się modeli jednowymiarowych z uwzględnieniem map charakterystyk zespołów silnika
- W celu opracowania elastycznego systemu – umożliwiającego łatwą adaptację dla różnych form przepływowych silnika – dokonuje się dekompozycji modelu na tzw. „bloki funkcjonalne” które umożliwiają składowanie różnych form przepływowych silnika.

MODELOWANIE OSIĄGÓW TURBINOWEGO SILNIKA ODRZUTOWEGO

- Dla bloków funkcjonalnych definiuje się więzy mechaniczne i przepływowo-ciepłne wykorzystywane w trakcie tworzenia modelu silnika (tzw. wejścia wyjścia)
- W zależności od rozwiązywanych problemów badawczych/obliczeniowych oraz stawianych wymagań co do dokładności i szybkości działania modelu wykorzystuje się model o różnym stopniu złożoności (dokładność opisu zjawisk fizycznych w silniku)

Model czynnika roboczego

- Model gazu doskonałego
- Model gazu półdoskonałego
- Model gazu rzeczywistego

Gaz doskonały

- Gaz hipotetyczny, którego drobiny nie przyciągają się wzajemnie, są nieskończenie małe i sztywne (nie występują drgania wewnątrz drobin). Cechuje się on stałymi wartościami wielkości opisujących jego właściwości

$$c_p, c_v, k = \textit{idem}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

Równanie Clapeyrona

$$pv = RT$$

$$R = c_p - c_v$$

R [J/(kgK)] – indywidualna stała gazowa – zależy od składu gazu

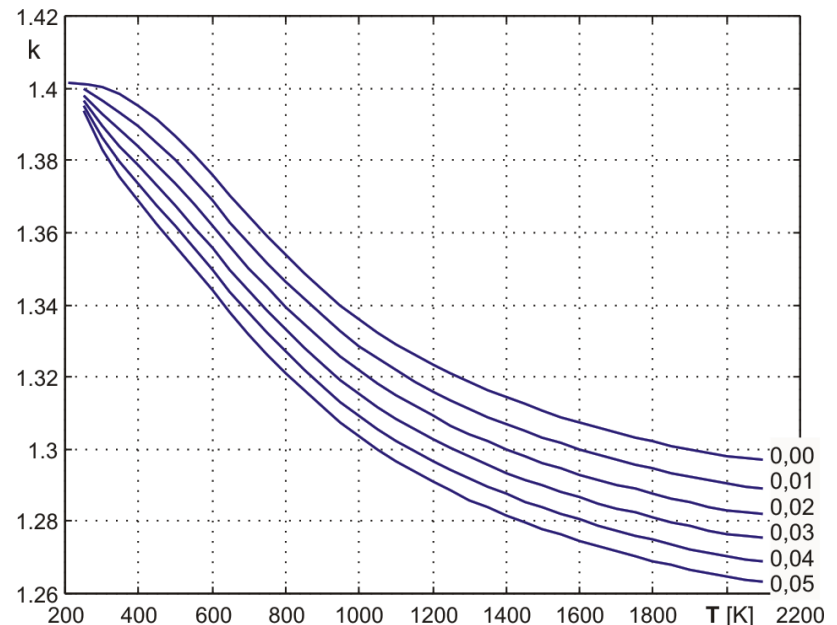
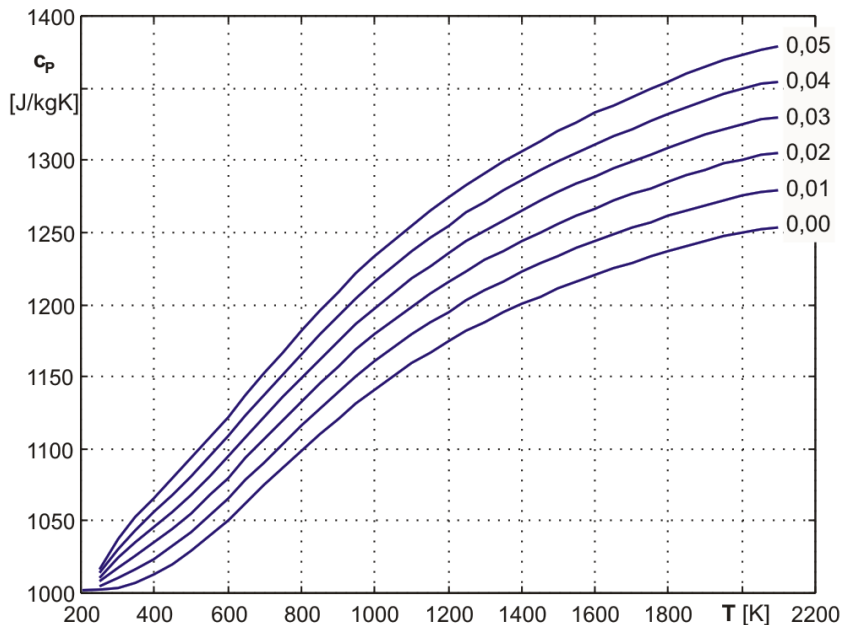
Dla zwiększenia dokładności obliczeń różnicuje się wartości stałych gazowych w zależności od komponentów np. w części zimnej i gorącej silnika

Gaz półdoskonały

- Gaz w którym uwzględnia się drgania drobin. Wielkości opisujące właściwości gazu zależą od temperatury i składu gazu

$$c_p, c_p, k = f(T, \tau_{pal})$$

$$R = f(\tau_{pal})$$



Zależność pojemności cieplnej c_p oraz wykładnika izentropy k dla spalin powstałych ze spalania paliwa o uśrednionym składzie chemicznym $C_{12}H_{23,5}$ od temperatury dla różnych wartości względnego zużycia paliwa τ_{pal} (dla powietrza $\tau_{pal}=0$)

$$\bar{c}_p = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT / (T_2 - T_1)$$

$$\bar{k} = \int_{T_1}^{T_2} k dT / (T_2 - T_1) = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_p - R}$$

Gaz rzeczywisty

- W gazach rzeczywistych oprócz temperatury uwzględnia się wpływ ściśliwości na właściwości gazów

Równanie stanu gazu

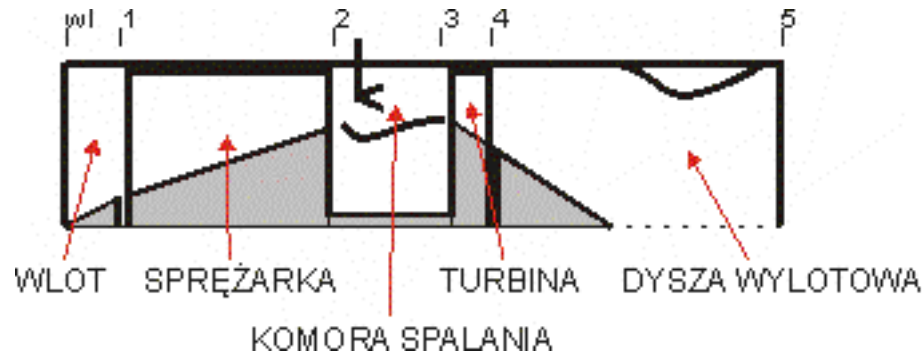
$$pv = zRT$$

z – współczynnik ściśliwości gazu

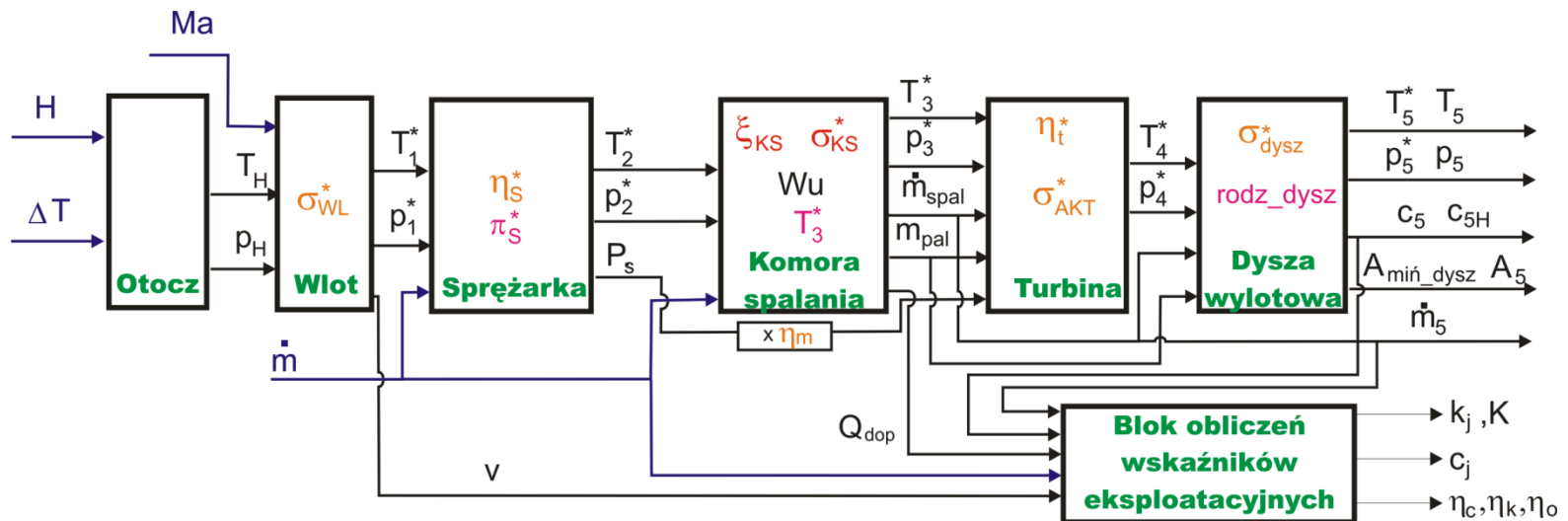
„Niemal wszystkie gazy występujące w technicznych urządzeniach cieplnych można traktować jako gaz doskonały i półdoskonały. Wyjątek stanowią gazy pod wysokim ciśnieniem i pary. Na właściwości tych czynników wyraźnie wpływa objętość właściwa drobin i ich wzajemne przyciąganie. Dlatego czynniki te należy traktować jak gaz rzeczywisty.” *J. Szargut* **TERMODYNAMIKA**

Model blokowy silnika – dekompozycja silnika

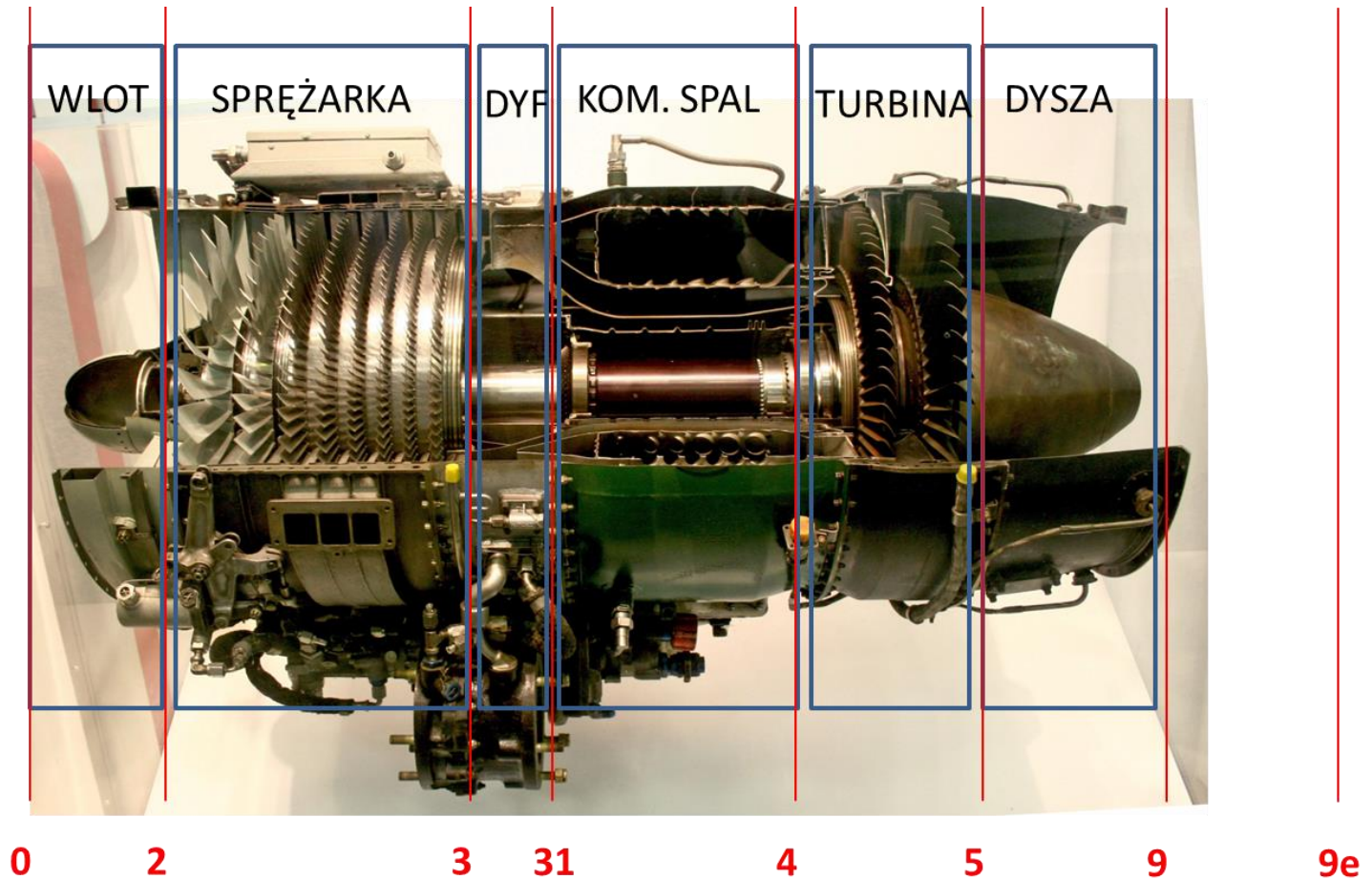
O T O C Z E N I E



O T O C Z E N I E



Przykład decompozycji modelu silnika



Elementy składowe silnika

- Sprężarka, wentylator
- Turbina, (turbina napędowa – brak w prezentacji)
- Komora spalania, dopalacza
- Mieszalnik strumieni
- Dysza wylotowa
- Rozdzielacz strumieni
- Wlot / Kanał przepływowy – generujący straty

- Wymiennik ciepła

Dodatkowe moduły

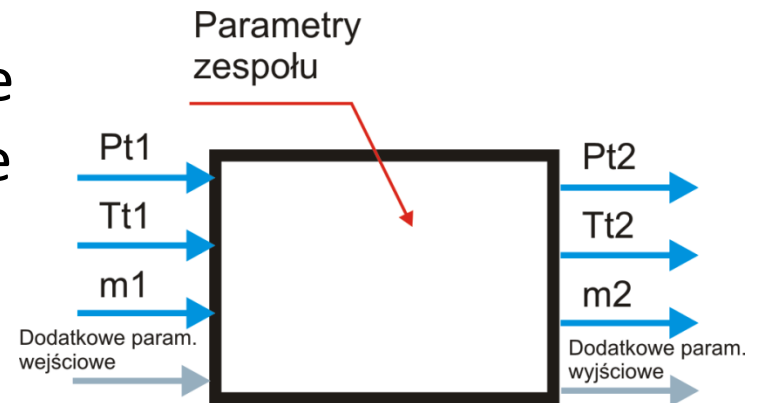
- Parametry otoczenia
- Moduł do obliczeń osiągow

Modelowanie i obliczenia osiągnięć różnych form konstrukcyjnych silnika

Moduły zespołów silnika

Określenie parametrów wejściowych i wyjściowych bloków obliczeniowych zespołów silnika

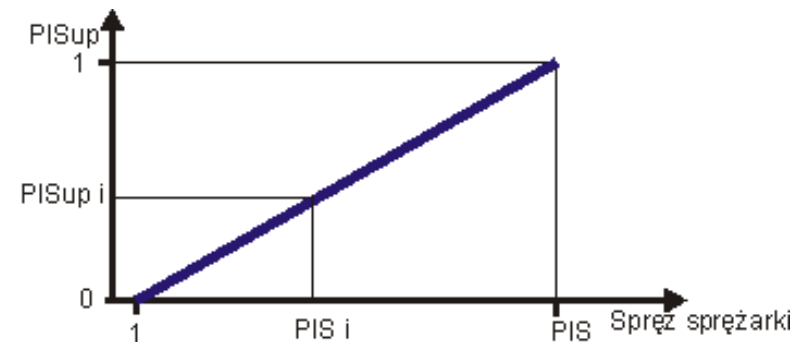
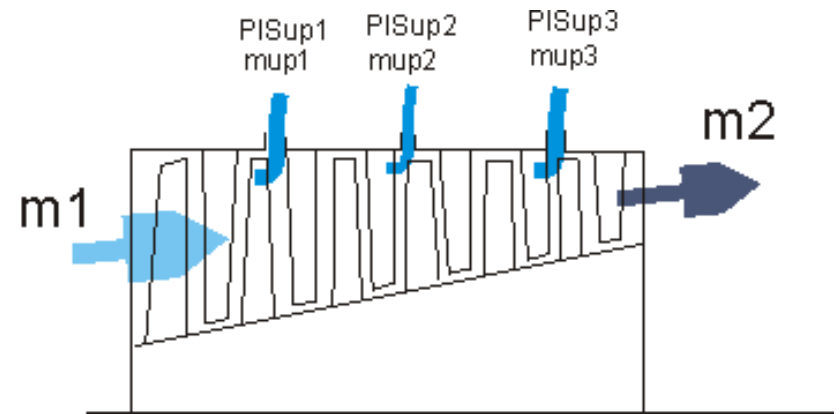
- Podstawowe parametry wejścia: ciśnienie całkowite P_{t1} , temperatura spiętrzenia T_{t1} , wydatek strumienia masy m_1 - dotyczy wszystkich zespołów
- Podstawowe parametry wyjścia: ciśnienie całkowite P_{t2} , temperatura spiętrzenia T_{t2} , wydatek strumienia masy m_2 - dotyczy wszystkich zespołów
- Parametry zespołu – definiowane wewnątrz zespołu lub wprowadzane z zewnątrz
- Dodatkowe parametry wejściowe
- Dodatkowe parametry wyjściowe



```
function [Pt2,Tt2,m2,Dodat.Par.Wyjść]=  
moduł(Pt1,Tt1,m1,Par.Zespołu, Dodat.Par.Wejść);
```

Założenia dla sprężarki

- Względny wydatek strumienia masy upustu $Bup = [Bup1, Bup2, \dots, Bupi]$, gdzie $Bup(i) = mup(i)/m1$
- Względny spręż sprężarki przy którym występuje upust: $PISup = [PISup1, PISup2, \dots, PISupi]$, gdzie $PISup_i = \frac{PIS_i}{PIS}$, PIS_i – spręż do wystąpienia i -tego upustu, PIS – spręż sprężarki

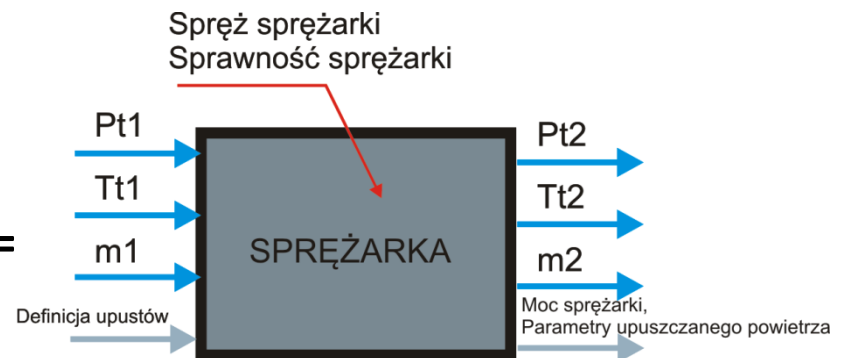


Zależność względnego sprężu na upuście $PISup_i$ od sprężu na sprężarce PIS_i

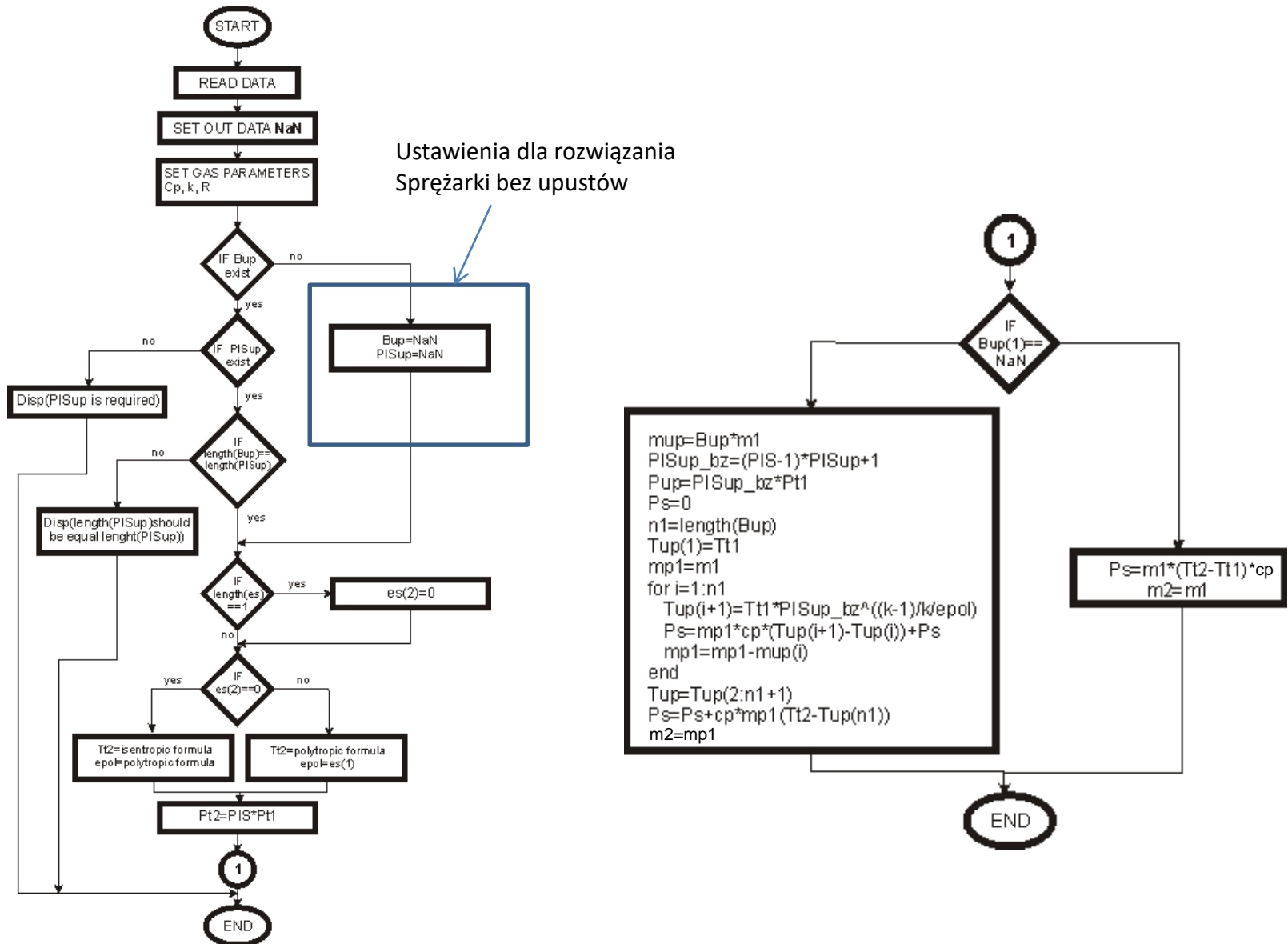
Modułu sprężarki/wentylatora

- Dodatkowe parametry wejścia definiujące upusty powietrza (opcjonalne):
 - $Bup=[m_up1/m1, m_up2/m2..]$
 - $Pisup=[Pis_up1, Pis_up2,..]$
- Dodatkowe parametry wyjściowe:
 - Moc sprężarki PS,
 - parametry upustu: $m_up=[m_up1, m_up2 \dots]$
 - temperatura upustu $T_up=[Tup1, Tup2 \dots]$
- Parametry modułu:
 - Spręż sprężarki
 - sprawność sprężarki

function [Pt2,Tt2,m2,Ps, Pup, Tup,mup,]=
sprezarka(Pt1,Tt1,m1,Pis,es,Bup,Pisup);

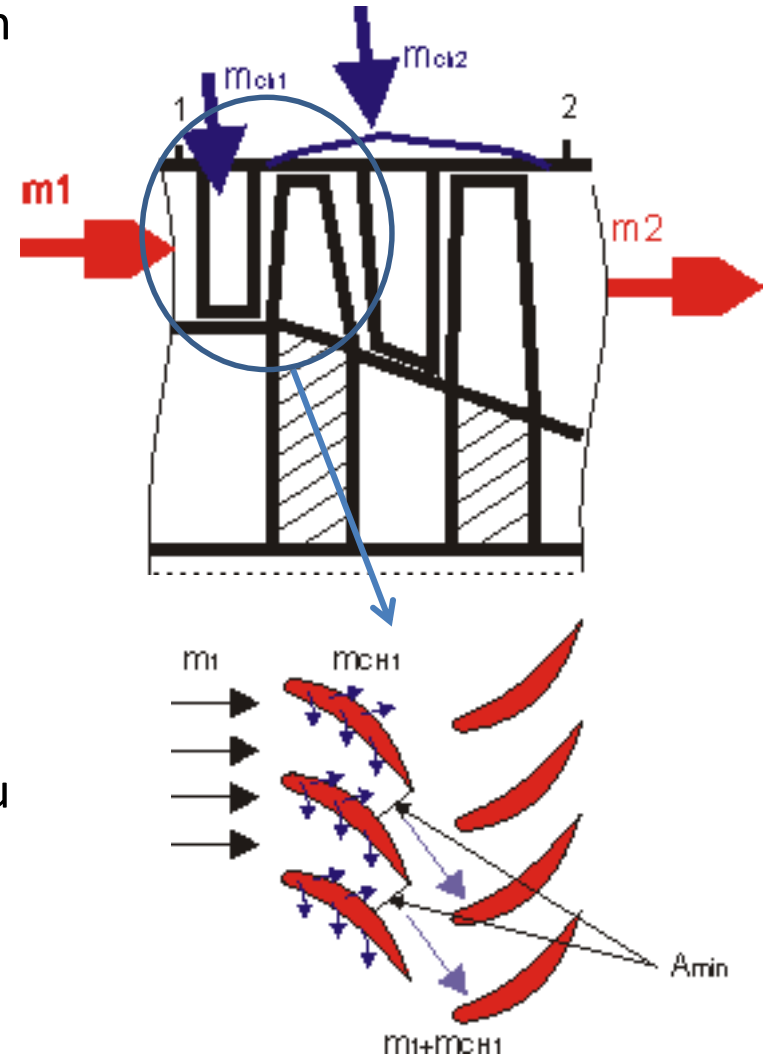


Przykład rozwiązania – Algorytm obliczeniowy



Założenia do obliczeń turbiny

- Obliczenia dla turbiny z uwzględnieniem chłodzenia lub bez chłodzenia
- Dla uwzględnienia procesu chłodzenia dodatkowo definiuje się masę i temperaturę czynnika chłodzącego
- Przekrój minimalny WDT będzie limitujący dla wydatku masowego w silniku.
- W obliczeniach można przyjąć, że w przekroju minimalnym WDT może występować przepływ krytyczny $Ma=1$ lub podkrytyczny $Ma<1$ – dla przepływu podkrytycznego można zdefiniować Ma
- Wydatek masy m_{ch1} będzie uwzględniany w wyznaczeniu przepływu krytycznego
- Wydatek czynnika $m_{ch2} \dots m_{chi}$ jest dostarczany w dalszej części turbiny



Bilans turbiny z chłodzeniem

- Zmiana entalpii w turbinie z chłodzeniem:

$$m_1 c p_T (T_{t1} - T_{t2}) + \sum m_{CH i} c p_{ch} (T_{CH i} - T_{t2}) = P_T$$

- Wydatek w A_{min} WDT:

$$m_{A_WDT} = m_1 + m_{CH 1}$$

- Temperatura całkowita w WDT

$$T_{tWDT} = \frac{m_1 T_{t1} c p_T + m_{CH 1} T_{CH 1} c p_{CH}}{c p_T (m_1 + m_{CH 1})}$$

- Ciśnienie całkowite w WDT

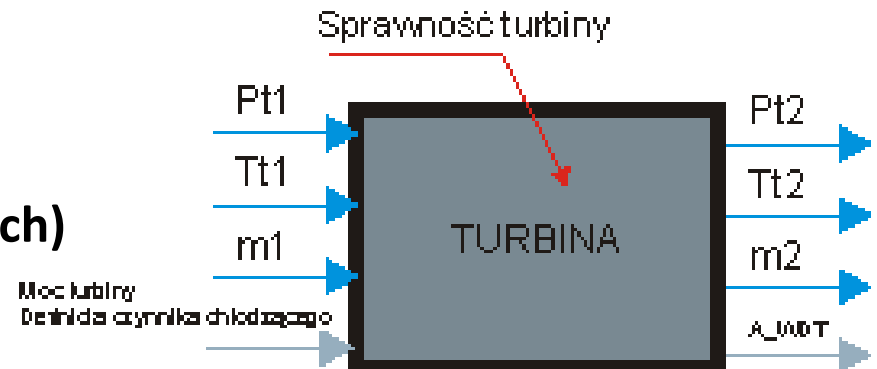
$$P_{tWDT} = P_{t1} * PLC_{WDT}$$

gdzie PLC_{WDT} - współczynnik strat ciśnienia w WDT –
założone w module na poziomie 0.985

Moduł turbina

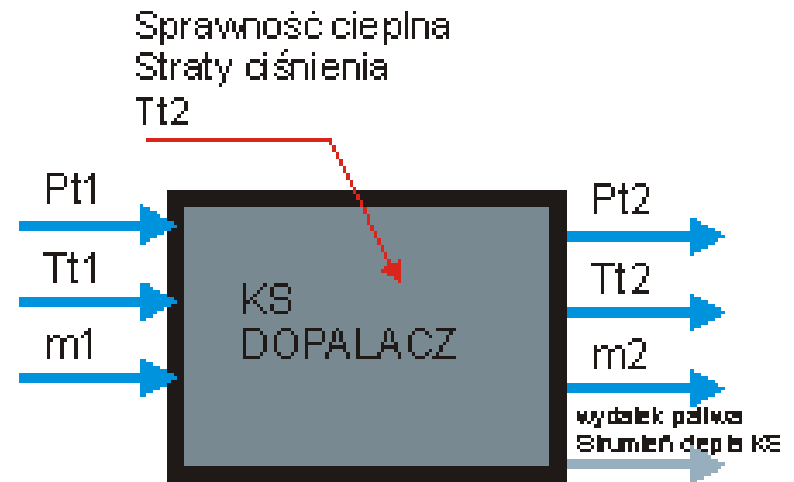
- Dodatkowe parametry wejścia:
 - Moc generowana (Rozpręż/ciśnienie na wylocie dla turbiny napędowej)
 - definiujące dodatkowe powietrze chłodzące turbinę (opcjonalne): $m_ch=[m_ch1, m_ch2 \dots]$, $T_ch=[Tch1, Tch2 \dots]$
- Dodatkowe parametry wyjściowe:
 - Pole powierzchni przekroju wieńca dyszowego turbiny
- Parametry modułu:
 - sprawność turbiny (izentropowa lub politropowa)

```
function [Pt2,Tt2,m2,A_wdt]=  
turbina(Pt1,Tt1,m1,Pt,et,M_wdt,m_ch,T_ch)
```



Moduł komory spalania/dopalacza

- Dodatkowe parametry wejścia: - brak
- Dodatkowe parametry wyjściowe:
 - Wydatek paliwa – m_f
 - Strumień ciepła Q_{ks}
- Parametry modułu:
 - sprawność cieplna
 - Straty ciśnienia
 - Temp na wylocie z KS/Dop
 - Identyfikator – KS, czy Dopalcz

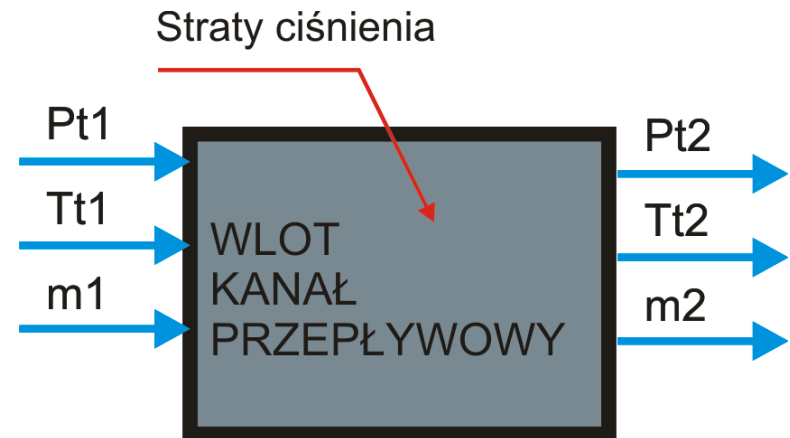


W obliczeniach
dopalacza uwzględnia
się inne właściwości
gazu niż w komorze
spalania

function [Pt2,Tt2,m2,mpal,Q]=
komora_spalania(Pt1,Tt1,m1,Tt2,s_ks,e_ks,D)

Moduł wlotu/kanal przepływowy

- Dodatkowe parametry wejścia: - brak
- Dodatkowe parametry wyjściowe: brak
- Parametry modułu:
 - Strata ciśnienia



function

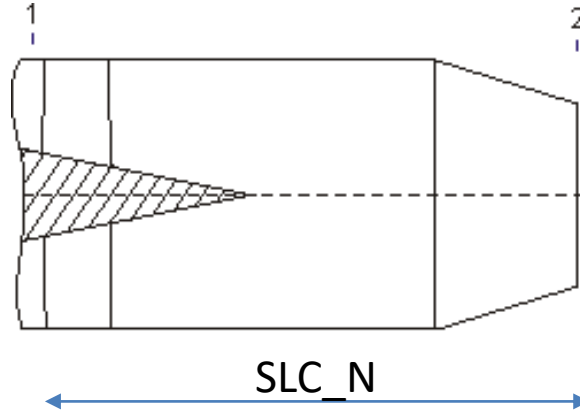
[Pt2,Tt2,m2]=kanal_prz(Pt1,Tt1,m1,s_kp)

Dysza wylotowa nakreślenie problemu

- Dysza zbieżna

$$s_n = SLC_N$$

$$A_2 = [A_2, A_2]$$



e(exit)

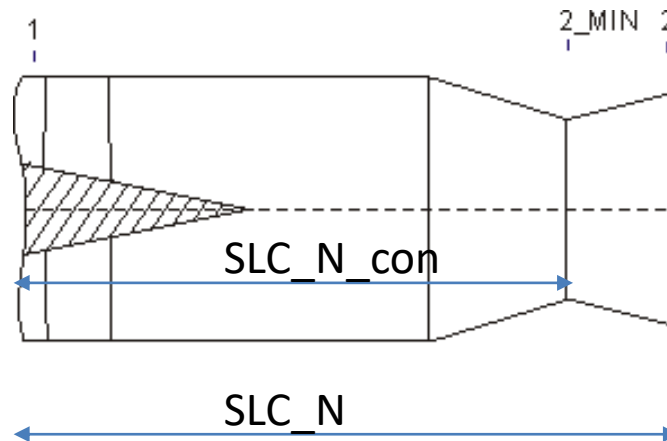
rd =

z – zbieżna/r – zbieżno-rozbieżna
s – spaliny/p – powietrze

- Dysza zbieżno-rozbieżna

$$s_n = [SLC_N, SLC_{N_{con}}]$$

$$A_2 = [A_2, A_{2_MIN}]$$



e(exit)

S_n – współczynnik strat ciśnienia w dyszy
SLC_N – współczynnik strat ciśnienia w całej dyszy
SLC_{N_con} – współczynnik strat ciśnienia w części zbieżnej dyszy

Założenia do obliczeń dyszy wylotowej

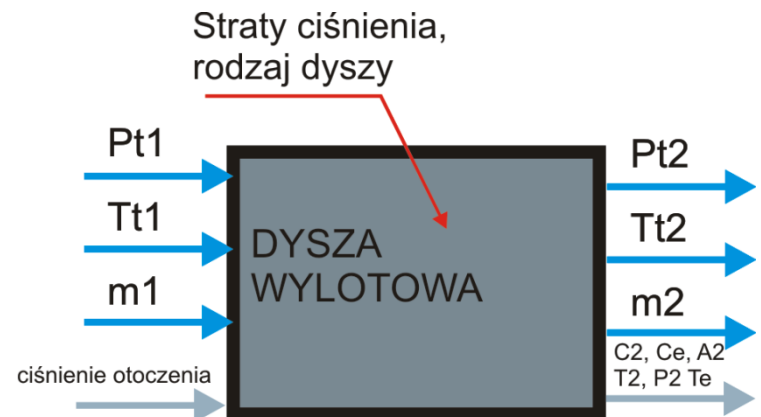
- Dysza zbieżna:
 - umożliwia rozpręż do ciśnienia otoczenia, gdy $M_2 \leq 1$,
 - Strumień osiąga parametry krytyczne na wyjściu z dyszy i rozpręża się dalej poza dyszą, gdy $M_2 > 1$
- Dysza zbieżno – rozbieżna umożliwia rozpręż do ciśnienia otoczenia
- Po zidentyfikowaniu, że przez dyszę przepływają spaliny $r_d = "s"$ i gdy $T_{t1} > 1550K$ – obliczenia są prowadzone z uwzględnieniem właściwości gazu jak dla dopalacza.

Moduł dyszy wylotowej

- Dodatkowe parametry wejścia:
 - Ciśnienie otoczenia P_0
- Dodatkowe parametry wyjściowe:
 - Prędkość po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia, przy rozprężu zupełnym $V_{2e}=V_2$
 - Temperatura statyczna na wyjściu z silnika i po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia
 - Pole przekroju wylotowego i minimalnego dyszy – A_2
- Parametry modułu:
 - Strata ciśnienia
 - Rodzaj dyszy

function

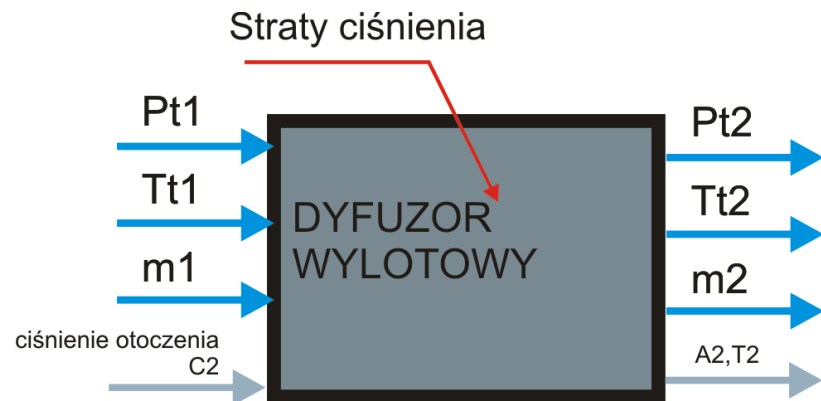
$[Pt_2, Tt_2, m_2, V_2, V_{2e}, p_2, T_2, T_{2e}, A_2] =$
 $dysza(Pt_1, Tt_1, m_1, sn, P_0, rd);$



Moduł dyfuzora wylotowego

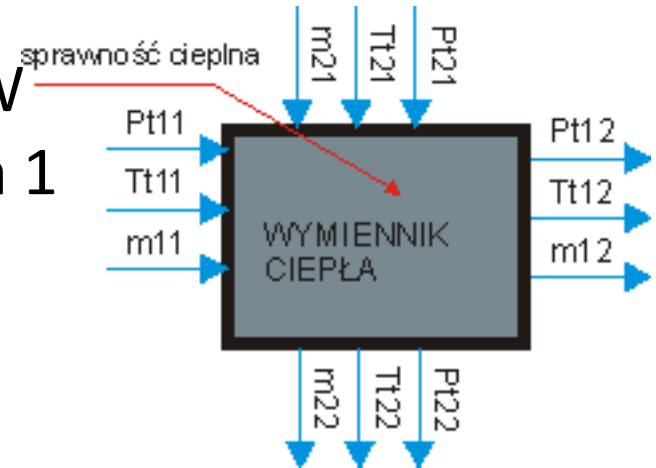
- Założenia
 - Rozpręż tylko do ciśnienia otoczenia
 - Praca tylko dla spalin
- Dodatkowe parametry wejścia:
 - Ciśnienie otoczenia
 - Prędkość wylotowa gazów
- Dodatkowe parametry wyjściowe:
 - Temperatura statyczna na wyjściu z silnika
 - Pole przekroju wylotowego – A_2
- Parametry modułu:
 - Strata ciśnienia

function [Pt2,Tt2,m2,T2,A2]=
dyfuzor(P1t,Tt1,m1,sd,P0,C2);



Moduł wymiennika ciepła

- Dwa strumienie przepływu, gdzie zakłada się wymianę ciepła pomiędzy przepływającymi strumieniami, bez strat przepływowych.
- Dodatkowe parametry wejścia: brak
- Dodatkowe parametry wyjściowe: - brak
- Parametry modułu:
 - Sprawność cieplna procesu eW
 - Straty w przepływie strumienia 1 i strumienia 2 – s_1, s_2



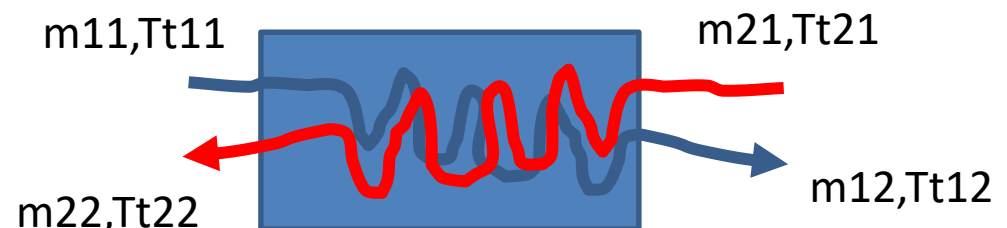
```
function [Pt12,Tt12,m12,Pt22,Tt22,m22]=  
wymiennik_ciepła(Pt11,Tt11,m11,Pt21,Tt21,m21,eW,s_1,s_2)
```

Moduł wymiennika ciepła (przeciwprądowy)

- Założenia do określenia sprawności cieplnej:
 - Maxymalny potencjał cieplny dla strumienia zimnego: $\dot{Q}1 = m11 * cp * (T_{t21} - T_{t11})$
 - Maxymalny potencjał cieplny dla strumienia gorącego: $\dot{Q}2 = m21 * cp * (T_{t21} - T_{t11})$
 - Maxymalny potencjał cieplny dla procesu wymiany: $\dot{Q}_{WMAX} = \min(\dot{Q}1, \dot{Q}2)$

$$T_{t12} = T_{t11} + \frac{\eta_w \dot{Q}_{WMAX}}{m11 * cp}$$

$$T_{t22} = T_{t21} - \frac{\eta_w \dot{Q}_{WMAX}}{m21 * cp}$$



Moduł mieszalnika

- Różni się tym, że mamy dwa strumienie wejściowe, stąd parametry podstawowe z indeksem 1 i 2 będą dotyczyć dwóch kanałów wejściowych
- Strumień wyjściowy będzie kanałem z indeksem 3
- Parametry mieszalnika, dotyczyć będą strat mieszania

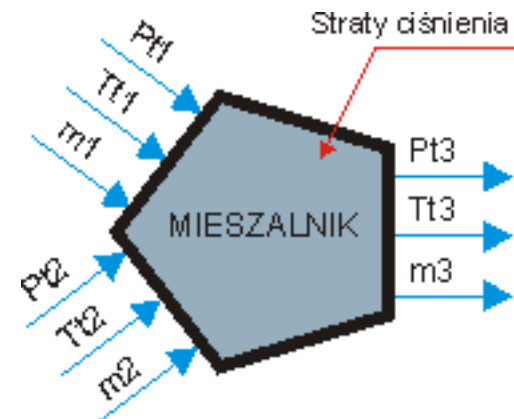
function [Pt3,Tt3,m3]=
mieszalnik(Pt1,Tt1,m1, Pt2,Tt2,m2,s_m)

Równanie bilansu masy: $m_3 = m_1 + m_2$

Równanie bilansu energii:

$$m_1 cp(T_{t1} - T_{t3}) = m_2 cp(T_{t3} - T_{t2})$$

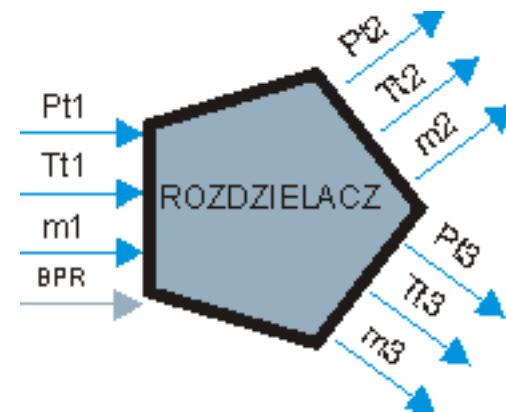
Równanie strat przepływu: $P_{t3} = \sigma_M * P_{min}$



Moduł rozdzielacza

- Strumień wejściowy będzie kanałem z indeksem 1
- Różni się tym, że mamy dwa strumienie wyjściowe, stąd parametry podstawowe z indeksem 2 i 3 będą dotyczyć dwóch kanałów wyjściowych
- Parametry rozdzielacza, brak – proces bez strat
- Parametr dodatkowy wejściowy BPR – stopień podziału strumieni m_2/m_3

function [Pt2,Tt2,m2,Pt3,Tt3,m3]=
rozdzielacz(Pt1,Tt1,m1, BPR)



Moduł Otoczenie

- Moduł odczytujący parametry z otoczenia dla zadanej temperatury wg (ISA International Standard Atmosphere)
- Umożliwiający korektę temperatury otoczenia
- Na podstawie zadanej prędkości (Ma, V) obliczający parametry całkowite

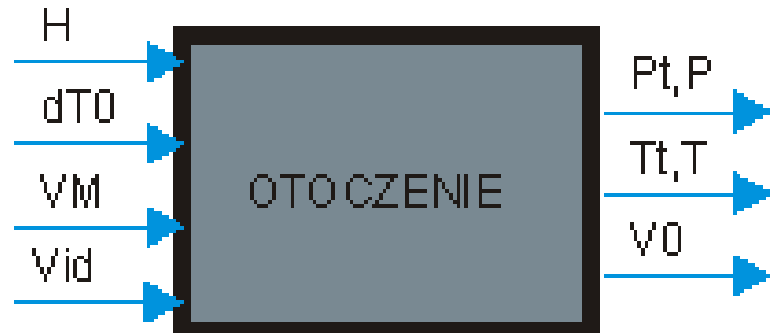
MODUŁ OTOCZENIE

- Parametry wejścia:
 - Wysokość
 - Korekta temperatury
 - Prędkość
 - Wskaźnik identyfikujący prędkość ("M","V")
- Parametry wyjściowe:
 - Ciśnienie i temperatura całkowita,
 - Ciśnienie i temperatura statyczna,
 - Prędkość w m/s

function [Pt,Tt,P,T,V0]= otoczenie (H,dT,VM,Vid)

VM – wartość prędkości

Vid = "M" – dla liczby Macha, "V" dla prędkości



MODEL ATMOSFERY do 20 km

```
function [Th,ph]=atmosfera(H,dT)

%[Th,ph]=atmosfera(H,dT)
%
%funkcja oblicza parametry termodynamiczne ciśnienia i temperatury
%w zależności od wysokości korzystając z AMW
%
%Na wejściu:
% H - wysokość w [m]
% dT - poprawka temperatury zależna od pory roku (pory dnia)
%   gdy nie jest podana traktowane jest jakby była równa 0
%
% zależności z Muszyński, Orkisz - Modelowanie Turbinowych Silników Odrzutowych

if exist('dT','var')==0,
    dT=0;
end;

if H<11000
    th=288-0.00651*H;
    ph=101325*(th./288)^5.2533;
else
    th=216.5;
    ph=23000*exp((11000-H)/6138);
end

Th=th+dT;
end
```


MODUŁ OTOCZENIE

```
function [Pt,Tt,P,T,V0]= otoczenie (H,dT,VM,Vid)
```

```
function [Pt,Tt,Ph,Th,V0]=otoczenie(H,dT,VM,Vid)
```

```
% [Pt,Tt,Ph,Th,V0]=otoczenie(H,dT,VM,Vid)
```

```
% Wywołanie uproszczone:
```

```
% [Ph,Th]=otoczenie(H,dT)
```

```
%
```

```
% funkcja oblicza parametry termodynamiczne ciśnienia i temperatury  
% w zależności od wysokości korzystając z AMW
```

```
%
```

```
% Na wejściu:
```

```
% H - wysokość w [m]
```

```
% dT - poprawka temperatury zależna od pory roku (pory dnia)
```

```
% gdy nie jest podana traktowane jest jakby była równa 0
```

```
% VM - prędkość wyrażona l.Macha lub prędkością w m/s
```

```
% Vid - indeks określający rodzaj prędkości: "M" dla l.Macha
```

```
% "V" dla prędkości w m/s
```

```
if exist('dT','var')==0
```

```
    dT=0;
```

```
end
```

```
k=1.4;
```

```
R=287;
```

```
% Wykorzystanie funkcji atmosfera w funkcji otoczenie
```

```
[Th,ph]=atmosfera(H,dT);
```

```
if exist ('VM','var')
```

```
    if Vid=="M"
```

```
        Tt=Th*(1+(k-1)/2*VM^2);
```

```
        Pt=Ph*(1+(k-1)/2*VM^2)^(k/(k-1));
```

```
        V0=VM*sqrt(k*R*Th);
```

```
    else
```

```
        M=VM/sqrt(k*R*Th);
```

```
        Tt=Th*(1+(k-1)/2*M^2);
```

```
        Pt=Ph*(1+(k-1)/2*M^2)^(k/(k-1));
```

```
        V0=VM;
```

```
    end
```

```
else
```

```
    Pt=Ph;
```

```
    Tt=Th;
```

```
    V0=NaN;
```

```
end
```

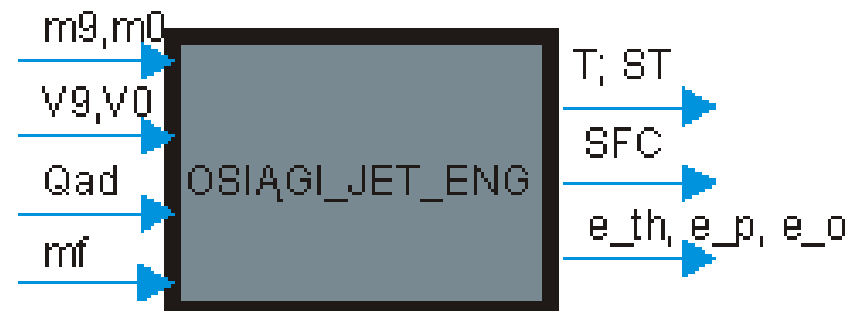
```
end
```

MODUŁ OSIĄGI – do obliczeń silników odrzutowych

- Parametry wejścia:
 - Wydatek masowy na wyjściu $m9$ – dla silnika z dwoma kanałami (wektor dwuelementowy) [wydatek na wyjściu z kan. wewnętrznego, wydatek na wyjściu z kan. zewnętrznego]
 - Prędkość gazów wylotowych $V9$ – dla rozprężu niezupełnego prędkość po rozprężeniu poza dyszą do ciśnienia otoczenia – dla silnika dwuprzepływowego wektor dwuelementowy definiowany jak wyżej
 - Wydatek strumienia wlotowego do silnika $m0$
 - Prędkość lotu $V0$
 - Strumień ciepła dostarczonego do silnika Qad (B+AB)
 - Całkowity wydatek masowy paliwa dostarczonego do silnika mf

- Parametry wyjściowe:

- Ciąg [N]
- Ciąg jednostkowy [Ns/kg]
- Jednostkowe zużycie paliwa [kg/N/s]
- Sprawność cieplna, napędowa i ogólna



function [T,ST,SFC,eth,ep,eo]=osiągi (m9,m0,V9,V0,Qad,mf)

Dziękuję za uwagę

Pitania i odpowiedzi