

# Silnik Turbowentylatorowy - obliczenia

Elaborated by phd Robert JAKUBOWSKI, Rzeszow University of Technology

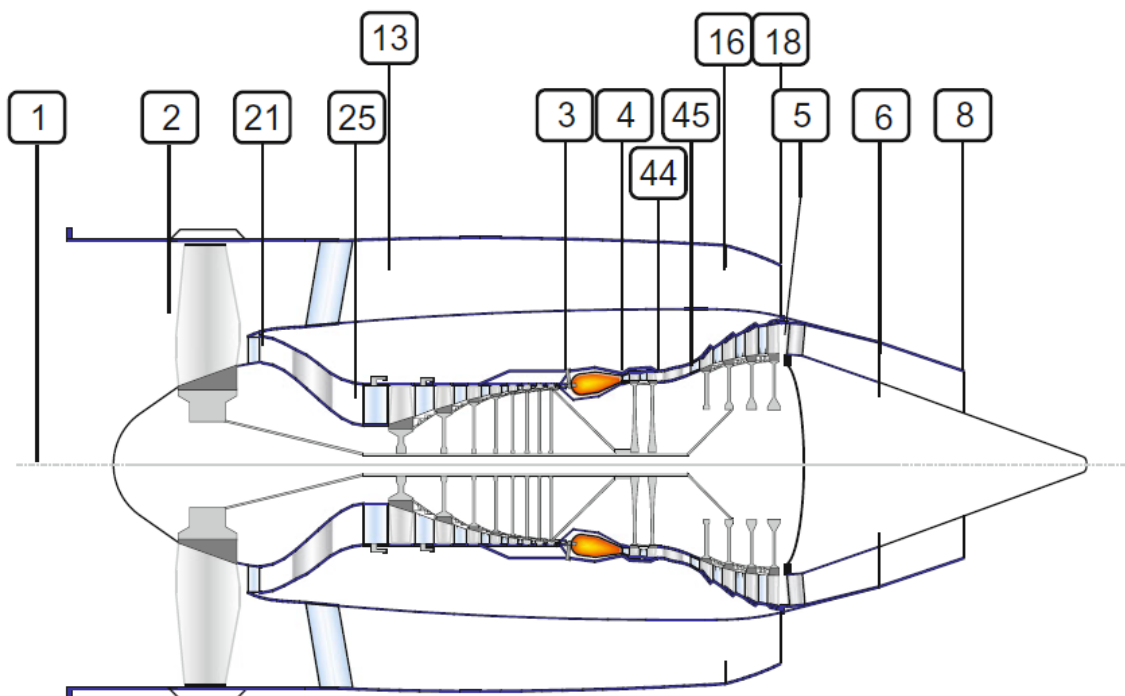
## Table of Contents

SILNIK TURBOWENTYLATOROWY BEZ STRAT (IDEALNY).....	1
OBLICZENIA SILNIKA TURBINOWEGO IDELNEGO .....	3
SILNIK TURBOWENTYLATOROWY ZE STRATAMI.....	12
SILNIK ZE STRATAMI OBLICZENIA.....	14
OBLICZENIA OSIĄGÓW SILNIKA.....	21
SILNIK ZE STRATAMI I SILNIK IDEALNY - PORÓWNANIE.....	23
OBLICZENIA SILNIKA GDY W SILNIKU SĄ ZBIEŻNE DYSZE WYLOTOWE.....	28
OBLICZENIA OSIĄGÓW SILNIKA ZE ZBIEŻNYMI DYSZAMI WYLOTOWYMI.....	31

## SILNIK TURBOWENTYLATOROWY BEZ STRAT (IDEALNY)

Przykład obliczeniowy silnika dwuprzepływowego o konstrukcji pokazanej na poniższym schemacie. Silnik ma dwa wirniki. Na wirniku niskiego ciśnienia występuje jednostopniowy wentylator i sprężarka niskiego ciśnienia. Na wirniku wysokiego ciśnienia jest sprężarka. Oznaczenia przekrojów kontrolnych silnika przedstawiono na schemacie poniżej.

W wyniku obliczeń silnika zostanie wyznaczony porofil temperatur i ciśnień w silniku oraz jego osiągi, tj: ciąg, ciąg jednostkowy i jednostkowe zużycie paliwa



Dane

Warunki dla jakich należy wykonać obliczenia:  $T_0=217$  K,  $P_0=22$  kPa,  $M_0=0.8$ , stopień dwuprzepływowości  $BPR=10$ , Spręż wentylatora w kanale zewnętrznym  $FPR= 1.49$ , Spręż wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia w kanale wewnętrznym  $LPC=2$ , spręż sprężarki wysokiego ciśnienia  $HPC= 12$ , Temperatura gazów przed turbiną  $TIT=1750$  K, Całkowity wydatek masowy powietrza w silniku  $m_0=100$  kg/s. (Uwaga w tym silniku zastosowano podejście obliczeniowe, że wentylator w kanale wewnętrznym nie spręża tak samo jak w kanale zewnętrznym, dlatego osobno podano spręż wentylatora dla kanału zewnętrznego, a w kanale wewnętrznym podano łączny spręż wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia, które są zamocowane na tym samym wale napędowym).

Parametry gazu do obliczeń:

Powietrze w zimnej części silnika:  $k=1.4$ ;  $c_p=1005$  J/kg/K,  $R=287$  J/kg/K,

Spaliny w części gorącej silnika  $k_t=1.33$ ,  $c_{p_t}=1170$  J/kg/K,  $R_t=290$  J/kg/K,

Ciepło właściwe dla procesu spalania w Komorze spalania  $c_{pB}=1200$  J/kg/K,

Wartość opałowa paliwa:  $FHV=43$  MJ/kg

Dane - przypisanie

Prędkość lotu wyrażona L. Macha

$$M_0 = 0.8000$$

Wydatek masowy powietrza na wlocie do silnika [kg/s]

$$m_0 = 100$$

Stopień dwuprzepływowości

$$BPR = 10$$

Temperatura gazów na wejściu do turbiny [K]

$$T_{t4} = 1750$$

Spręż wentylatora w kanale zewnętrznym

$$FPR = 1.4900$$

Spręż wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia

$$LPC_{PR} = 2$$

Spręż sprężarki wysokiego ciśnienia

$$HPC_{PR} = 12$$

Parametry otoczenia

Temperatura statyczna [K]

$$T_0 = 217$$

Ciśnienia statyczne [Pa]

$$P_0 = 22000$$

## OBLICZENIA SILNIKA TURBINOWEGO IDELNEGO

W obliczeniach silnika idealnego parametry będą miały dodaną końcówkę \_id

### Przekrój 0

Obliczenia parametrów spiętrzenia

Temperatura całkowita [K]

$$T_{t0} = T_0 \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right)$$

$$T_{t0\_id} = 244.7760$$

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t0} = P_0 \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$P_{t0\_id} = 3.3535e+04$$

Prędkość dźwięku do obliczeń prędkości lotu [m/s]

$$a_0 = \sqrt{k * R * T_0}$$

$$a_0 = 295.2805$$

Prędkość lotu [m/s]

$$V_0 = M_0 * a_0$$

$$V_0\_id = 236.2244$$

### Przekrój 2 (Przed wentylatorem)

Temperatura całkowita, taka jak temperatura spiętrzenia w przekroju 0 [K]

$$T_{t2} = T_{t0}$$

$$T_{t2\_id} = 244.7760$$

Ciśnienie całkowite takie jak ciśnienie spiętrzenia w przekroju 0 [Pa]

$$P_{t2} = P_{t0}$$

$$P_{t2\_id} =$$

3.3535e+04

### Przekrój 13 - za wentylatorem w kanale zewnętrznym

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t13} = P_{t2} * FPR$$

Pt13\_id =  
4.9968e+04

Temperatura całkowita z równania izentropowego sprężania [K]

$$T_{t13} = T_{t2} * FPR^{\frac{k-1}{k}}$$

Tt13\_id =  
274.3157

Praca wentylatora w kanale zewnętrznym [J/kg]

$$W_F = c_p * (T_{t13} - T_{t2})$$

WF\_id =  
2.9687e+04

Wydatek masowy w kanale zewnętrznym [kg/s]

$$m_{13} = m_0 * \frac{BPR}{1 + BPR}$$

m13 =  
90.9091

Moc wentylatora w kanale zewnętrznym [W]

$$P_F = m_{13} * W_F$$

PF\_id =  
2.6989e+06

### KANAŁ WEWNĘTRZNY (WENTYLATOR I SPRĘŻARKA LP)

Wydatek masowy powietrza w kanale wewnętrznym [kg/s]

$$m_{21} = m_0 * \frac{1}{1 + BPR}$$

m21 =  
9.0909

### Przekrój 21 - za wentylatorem i sprężarką LP w kanale wewnętrznym

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t21} = P_{t2} * LPC\_PR$$

Pt21\_id =  
6.7071e+04

Temperatura całkowita z równania izentropowego sprężania [K]

$$T_{t21} = T_{t2} * LPC\_PR^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{t21\_id} = 298.3853$$

Praca sprężania na wentylatorze i w sprężarce niskiego ciśnienia w kanale wewnętrznym [J/kg]

$$W_{LPC} = c_p * (T_{t21} - T_{t2})$$

$$W_{LPC\_id} = 2.9687e+04$$

Moc wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia w kanale wewnętrznym [W]

$$P_{LPC} = m_{21} * W_{LPC}$$

$$P_{LPC\_id} = 2.6989e+05$$

**Sumaryczna moc sprężania zespołu niskiego ciśnienia**

$$P_{LPS} = P_{LPC} + P_F$$

$$P_{LPS\_id} = 2.9687e+06$$

**Przekrój 3 - Wyjście ze sprężarki**

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t3} = P_{t21} * HPC\_PR$$

$$P_{t3\_id} = 8.0485e+05$$

Temperatura całkowita [K]

$$T_{t3} = T_{t21} * HPC\_PR^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{t3\_id} = 606.8969$$

**SPRĘŻARKA**

Praca sprężarki [J/kg]

$$W_C = c_p * (T_{t3} - T_{t21})$$

$$W_C\_id = 3.1005e+05$$

Moc sprężarki [W]

$$P_C = m_{21} * W_C$$

$$P_C\_id =$$

2.8187e+06

#### Przekrój 4 Wyjście z komory spalania / wejście do turbin

Temperatura całkowita - zadana w danych do obliczeń [K]

$T_{t4}$

$$T_{t4\_id} = 1750$$

Ciśnienie całkowite w silniku idealnym jest równe ciśnieniu przed Komorą spalania [Pa]

$$P_{t4} = P_{t3}$$

$$P_{t4\_id} = 8.0485e+05$$

#### KOMORA SPALNIA

Względne zużycie paliwa

$$f_B = \frac{m_f}{m_{21}} = c_{pB} * \frac{T_{t4} - T_{t3}}{FHV}$$

$$f_{B\_id} = 0.0319$$

Zużycie paliwa [kg/s]

$$m_{tB} = m_{21} * f_B$$

$$m_{fB\_id} = 0.2900$$

#### Przekrój 45 Wylot z turbiny HPT

Temperatura całkowita - zbilansu współpracy ze sprężarką [K]

$$T_{t45} = T_{t4} - \frac{W_C}{(1 + f_B) * c_{pt}}$$

$$T_{t45\_id} = 1.4932e+03$$

Ciśnienie całkowite - równania izentropy [Pa]

$$P_{t45} = P_{t4} \left( \frac{T_{t45}}{T_{t4}} \right)^{\frac{kt}{kt-1}}$$

$$P_{t45\_id} = 4.2456e+05$$

#### Rozpręż na turbinie HPT

$$HPT\_PR = \frac{P_{t4}}{P_{t45}}$$

$$HPT\_PR\_ID =$$

1.8958

## Przekrój 5 Wyjście z LPT

Temperatura całkowita z bilansu współpracy wirnika niskiego ciśnienia [K]

$$T_{t5} = T_{t45} - \frac{P_{LPS}}{m_{21} (1 + f_B) * c_{pt}}$$

Tt5\_id =  
1.2227e+03

Ciśnienie spiętrzenia [Pa]

$$P_{t5} = P_{t45} \left( \frac{T_{t5}}{T_{t45}} \right)^{\frac{kt}{kt-1}}$$

Pt5\_id =  
1.8973e+05

## Rozpręż na turbinie LPT

$$\text{LPT PR} = \frac{P_{t45}}{P_{t5}}$$

LPT\_PR\_ID =  
2.2377

## Przekrój 8 wylot z dyszy kanału wewnętrznego

Temperatura spiętrzenia [K]

$$T_{t8} = T_{t5}$$

Tt8\_id =  
1.2227e+03

Ciśnienie spiętrzenia [Pa]

$$P_{t8} = P_{t5}$$

Pt8\_id =  
1.8973e+05

Ciśnienie statyczne równe ciśnieniu otoczenia [Pa] (rozpręż zupełny)

$$P_8 = P_0$$

P8\_id =  
22000

Temperatura statyczna z równia izentropy [K]

$$T_8 = T_{t8} * \left( \frac{P_8}{P_{t8}} \right)^{\frac{kt-1}{kt}}$$

T8\_id =  
716.3962

Prędkość gazów wylotowych wyrażona L. Macha

$$M_8 = \sqrt{\left(\frac{T_{t8}}{T_8} - 1\right) * \frac{2}{kt - 1}}$$

$$M8\_id = 2.0696$$

Prędkość dźwięku strumienia spalin [m/s]

$$a_8 = \sqrt{kt * Rt * T_8}$$

$$a8\_id = 525.6558$$

Prędkość gazów wylotowych [m/s]

$$C_8 = M_8 * a_8$$

## KANAŁ ZEWNĘTRZNY

### Przekrój 18 Wylot z zewnętrznej dyszy wylotowej

Temperatura całkowita [K]

$$T_{t18} = T_{t13}$$

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t18} = P_{t13}$$

$$Pt18\_id = 4.9968e+04$$

Ciśnienie statyczne dla rozprężania zupełnego w dyszy [Pa]

$$P_{18} = P_0$$

$$P18\_id = 22000$$

Temperatura statyczna [K]

$$T_{18} = T_{t18} * \left(\frac{P_{18}}{P_{t18}}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T18\_id = 217.0000$$

Prędkość dźwięku strumienia gazów wylotowych z dyszy zewnętrznej

$$M_{18} = \sqrt{\left(\frac{T_{t18}}{T_{18}} - 1\right) * \frac{2}{k - 1}}$$

$$M18\_id = 1.1492$$

Prędkość dźwięku strumienia gazów wylotowych z dyszy zewnętrznej [m/s]

$$a_{18} = \sqrt{k * R * T_{18}}$$

$$a_{18\_id} = 295.2805$$

Prędkość gazów wylotowych [m/s]

$$C_{18} = M_{18} * a_{18}$$

$$C_{18\_id} = 339.3335$$

## OBLICZENIA OSIĄGÓW SILNIKA

Ciąg [N]

$$T = m_{21} * (1 + f_B) * C_8 + m_{21} * BPR * C_{18} - m_{21} * (1 + BPR) * V_0$$

$$T\_id = 1.7432e+04$$

Ciąg Jednostkowy [Ns/kg]

$$ST = \frac{T}{m_0} = \frac{(1 + f_B) * C_8 + BPR * C_{18} - (1 + BPR) * V_0}{1 + BPR}$$

$$ST\_id = 174.3159$$

Jednostkowe zużycie paliwa [kg/N/s]

$$SFC = \frac{m_{fB}}{T} = \frac{f_B}{(1 + BPR) * ST}$$

$$SFC\_id = 1.6637e-05$$

Specific fuel consumption [kg/N/h]

$$SFC = SFC * 3600$$

$$SFC\_id = 0.0599$$

Sprawności silnika

Sprawność cieplna (Thermal efficiency)

$$\eta_{th} = \frac{(1 + f_B) * C_8^2 + BPR * C_{18}^2 - (1 + BPR) V_0^2}{2 * f_B * FHV}$$

$$\eta_{th\_id} = 0.6411$$

Sprawność Napędowa (Propulsive efficiency)

$$\eta_p = \frac{2 * V_0 * ST * (1 + BPR)}{(1 + f_B) * C_8^2 + BPR * C_{18}^2 - (1 + BPR)V_0^2}$$

etha\_p\_id =  
0.5150

Sprawność ogólna (Overall efficiency)

$$\eta_o = \frac{V_0 * ST * (1 + BPR)}{f_B * FHV} = \eta_{th} * \eta_p$$

etha\_o\_id =  
0.3302

Wykres zmian temperatury i ciśnienia w silniku

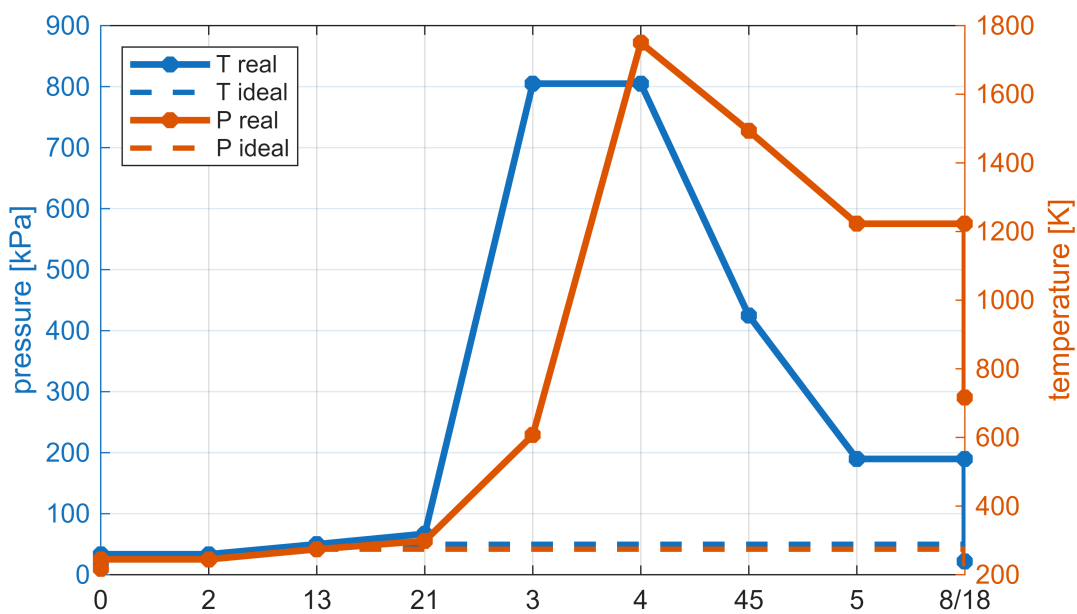


Tabela = 13x3 table

	Section	T ideal [K]	P ideal [kPa]
1	'0'	217	22
2	't0'	245	33.5355
3	't2'	245	33.5355
4	't21'	298	67.0710
5	't3'	607	804.8515
6	't4'	1750	804.8515
7	't45'	1493	424.5550
8	't5'	1223	189.7283
9	't8'	1223	189.7283
10	'8'	716	22

	Section	T ideal [K]	P ideal [kPa]
11	't13'	274	49.9679
12	't18'	274	49.9679
13	'18'	217	22

## Performance of ideal turbofan engine

Tabela = 9x3 table

	Parameter	Unit	Ideal turbofan
1	'Thrust'	'kN'	17.4316
2	'Specific Thrust'	'N*s/kg'	174.3159
3	'Fuel consumption'	'kg/s'	0.2900
4	'Specific fuel consump'	'kg/N/h'	0.0599
5	'therm. efficiency'	'-'	0.6411
6	'prop. efficiency'	'-'	0.5150
7	'overall efficiency'	'-'	0.3302
8	'V9'	'm/s'	1.0879e+03
9	'V19_id'	'm/s'	339.3335

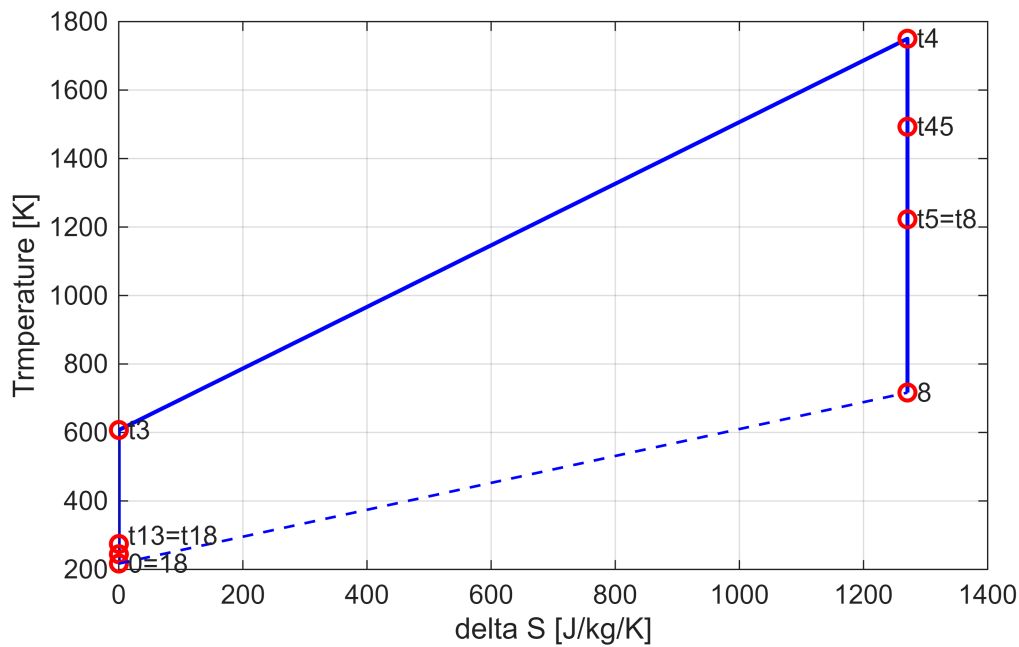
## Wykres Temperatura - entropiwa

Przyrost entropii:

Obliczenia przyrostu entropii dla komory spalnia [J/kg/K] :

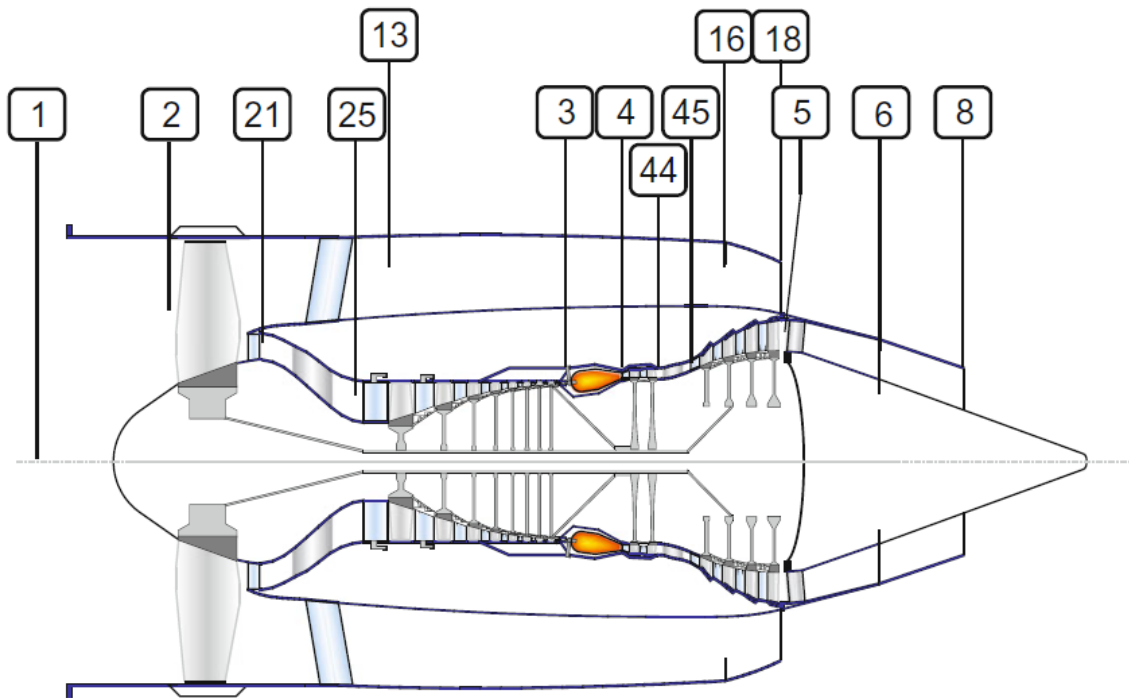
$$\Delta s_B = c_{pB} * \ln \frac{T_{t4}}{T_{t3}}$$

$$dS_B = 1.2708e+03$$



## SILNIK TURBOWENTYLATOROWY ZE STRATAMI

Analizie zostanie poddany silnik dwuprzepływowy o tym samym schemacie konstrukcyjnym i tych samych głównych parametrach pracy, co wczesniej silnik idealny, w celu pokazania różnic wynikających z obliczeń obydwu przypadków. W silniku ze stratami zostaną dodatkowo uwzględnione parametry charakteryzujące starty w silniku poprzez współczynniki start ciśnienia i sprawności.



Dane do obliczeń

Warunki dla jakich należy wykonać obliczenia:  $T_0=217$  K,  $P_0=22$  kPa,  $M_0=0.8$ , stopień dwuprzepływowości  $BPR=10$ , Spręż wentylatora w kanale zewnętrznym  $FPR=1.49$ , Spręż wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia w kanale wewnętrznym  $LPC=2$ , spręż sprężarki wysokiego ciśnienia  $HPC=12$ , Temperatura gazów przed turbiną  $TIT=1750$  K, Całkowity wydatek masowy powietrza w silniku  $m_0=100$  kg/s. (Uwaga w tym silniku zastosowano podejście obliczeniowe, że wentylator w kanale wewnętrznym nie spręża tak samo jak w kanale zewnętrznym, dlatego osobno podano spręż wentylatora dla kanału zewnętrznego, a w kanale wewnętrznym podano łączny spręż wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia, które są zamocowane na tym samym wale napędowym).

Parametry gazu do obliczeń:

Powietrze w zimnej części silnika:  $k=1.4$ ;  $c_p=1005$  J/kg/K,  $R=287$  J/kg/K,

Spaliny w części gorącej silnika  $k_t=1.33$ ,  $c_{p_t}=1170$  J/kg/K,  $R_t=290$  J/kg/K,

Ciepło właściwe dla procesu spalania w Komorze spalania  $c_{pB}=1200$  J/kg/K,

Wartość opałowa paliwa:  $FHV=43$  MJ/kg

Współczynniki do obliczenia strat przepływowych i sprawności silnika:

współczynnik strat ciśnienia we wlocie  $\sigma_{IN}$  0.98, współczynnik strat ciśnienia w komorze spalania  $\sigma_B$  0.985, współczynnik strat ciśnienia w dyszy kanału wewnętrznego  $\sigma_{N_{int}}$  0.97, współczynnik strat ciśnienia w dyszy kanału zewnętrznego  $\sigma_{N_{ext}}$  0.96, współczynnik strat ciśnienia pomiędzy przekrojem 21 i 25 w kanale wewnętrznym  $\sigma_{21-25}$  0.98, sprawność izentropowa wentylatora w kanale zewnętrznym  $\eta_F$  0,9,

sprawność izentropowa wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia w kanale wewnętrznym  $\eta_{LPC}$  0.85, sprawność izentropowa sprężarki wysokiego ciśnienia  $\eta_{HPC}$  0.83, sprawność izentropowa turbiny wysokiego ciśnienia  $\eta_{HPT}$  0.87, sprawność izentropowa turbiny niskiego ciśnienia  $\eta_{LPT}$  0.89, sprawność komory spalania  $\eta_B$  0.99, sprawność mechaniczna zespołu niskiego ciśnienia  $\eta_{MLP}$  = 0.995, sprawność mechaniczna zespołu wysokiego ciśnienia  $\eta_{MHP}$  = 0.99.

Prędkość lotu wyrażona L. Macha

$$M_0 = 0.8000$$

Wydatek masowy powietrza na wlocie do silnika [kg/s]

$$m_0 = 100$$

Stopień dwuprzepływowości

$$BPR = 10$$

Temperatura gazów przed turbiną [K]

$$T_{t4} = 1750$$

Spręż wentylatora (kanał zewnętrzny)

$$FPR = 1.4900$$

Spręż wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia (kanał wewnętrzny)

$$LPC\_PR = 2$$

Spręż sprężarki wysokiego ciśnienia

$$HPC\_PR = 12$$

Warunki otoczenia

Temperatura otoczenia (statyczna) [K]

$$T_0 = 217$$

Ciśnienie otoczenia (statyczne) [Pa]

$$P_0 = 22000$$

## SILNIK ZE STRATAMI OBLICZENIA

### Section 0

Temperatura całkowita [K] (z równania izentropowego sprężania dla przepływu ściśliwego)

$$T_{t0} = T_0 \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right)$$

$$T_{t0} = 244.7760$$

Ciśnienie całkowite [Pa] (z równania izentropowego sprężania dla przepływu ściśliwego)

$$P_{t0} = P_0 \left( 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \text{ - like for ideal engine}$$

$$P_{t0} = 3.3535e+04$$

Prędkość dźwięku na wysokości przelotowej [m/s]

$$a_0 = \sqrt{k * R * T_0}$$

$$a_0 = 295.2805$$

Prędkość lotu [m/s]

$$V_0 = M_0 * a_0$$

$$V_0 = 236.2244$$

Powyższe parametry są takie jak w silniku idealnym

## **Przekrój 2, Wlot do wentylatora**

Temperatura całkowita [K] (założenie braku wymiany energii we wlocie - przepływ izentalpowy)

$$T_{t2} = T_{t0}$$

$$T_{t2} = 244.7760$$

Ciśnienie całkowite [Pa] (występują spraty ciągnięcia)

$$P_{t2} = \sigma_{IN} * P_{t0}$$

$$P_{t2} = 3.2865e+04$$

## **Przekrój 13 - Wentylator kanał zewnętrzny**

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t13} = P_{t2} * FPR$$

$$P_{t13} = 4.8969e+04$$

Temperatura całkowita [K] (uwzględniono sprawność izentropową)

$$T_{t13} = T_{t2} * \left( 1 + \frac{\text{FPR}^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_F} \right)$$

$$T_{t13} = 277.5979$$

Praca wentylatora w kanale zewnętrznym [J/kg]

$$W_F = c_p * (T_{t13} - T_{t2})$$

$$W_F = 3.2986e+04$$

Wydatek masowy w kanale zewnętrznym [kg/s]

$$m_{13} = m_0 * \frac{\text{BPR}}{1 + \text{BPR}}$$

$$m_{13} = 90.9091$$

Moc wentylatora w kanale zewnętrznym [W]

$$P_F = m_{13} * W_F$$

$$P_F = 2.9987e+06$$

### KANAŁ WEWNĘTRZNY (WENTYLATOR I SPRĘŻARKA LP)

Wydatek masowy powietrza w kanale wewnętrznym [kg/s]

$$m_{21} = m_0 * \frac{1}{1 + \text{BPR}}$$

$$m_{21} = 9.0909$$

### Przekrój 21 - za wentylatorem i sprężarką LP w kanale wewnętrznym

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t21} = P_{t2} * \text{LPC\_PR}$$

$$P_{t21} = 6.5730e+04$$

Temperatura całkowita [K]

$$T_{t21} = T_{t2} * \left( 1 + \frac{\text{LPC\_PR}^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_C} \right)$$

$$T_{t21} = 307.8457$$

Praca sprężania na wentylatorze i w sprężarce niskiego ciśnienia w kanale wewnętrznym [J/kg]

$$W_{LPC} = c_p * (T_{t21} - T_{t2})$$

$$W_{LPC} = 3.2986e+04$$

Moc wentylatora i sprężarki niskiego ciśnienia w kanale wewnętrznym [W]

$$P_{LPC} = m_{21} * W_{LPC}$$

$$P_{LPC} = 2.9987e+05$$

### Sumaryczna moc sprężania zespołu niskiego ciśnienia

$$P_{LPS} = P_{LPC} + P_F$$

$$P_{LPS} = 3.2986e+06$$

### Przekrój 25 - Wylot do sprężarki wysokiego ciśnienia

Kanał przepływowy pomiędzy przekrojem 21 i 25 jest źródłem strat przepływowych przeważnie bez miany temperatury czynnika, stąd:

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t25} = P_{t21} * \sigma_{21-25}$$

$$P_{t25} = 6.4415e+04$$

Temperatura całkowita [K]

$$T_{t25} = T_{t21}$$

$$T_{t25} = 307.8457$$

### Przekrój 3 - Wylot ze sprężarki / Wejście do komory spalania

Ciśnienie całkowite [Pa]

$$P_{t3} = P_{t21} * HPC\_PR$$

$$P_{t3} = 7.8875e+05$$

Temperatura całkowita [K] (z uwzględnieniem sprawności izentropowej)

$$T_{t3} = T_{t21} * \left( 1 + \frac{HPC\_PR^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{HPC}} \right)$$

$$T_{t3} = 691.3314$$

### SPRĘŻARKA WYSOKIEGO CIŚNIENIA (HPC)

Praca Sprężarki [J/kg]

$$W_{\text{HPC}} = c_p * (T_{t3} - T_{t25})$$

$$W_{\text{HPC}} = 3.8540\text{e}+05$$

Moc [W]

$$P_{\text{HPC}} = m_{21} * W_{\text{HPC}}$$

$$P_{\text{HPC}} = 3.5037\text{e}+06$$

#### Przekrój 4 pomiędzy komorą spalania i turbiną HPT

Temperatura gazów (założona) [K]

$$T_{t4}$$

$$T_{t4} = 1750$$

Ciśnienie całkowite z uwzględnieniem strat przepływowych [Pa]

$$P_{t4} = \sigma_B * P_{t3}$$

$$P_{t4} = 7.7692\text{e}+05$$

Względny wydatek paliwa w komorze palania (względem m21)

$$f_B = c_{pB} * \frac{T_{t4} - T_{t3}}{\text{FHV} * \eta_B}$$

$$f_B = 0.0298$$

Wydatek masowy paliwa [kg/s]

$$m_{fB} = m_{21} * f_B$$

$$m_{fB} = 0.2713$$

#### Przekrój 45 pomiędzy turbinami

Temperatura całkowita [K] z bilansu współpracy Turbina HPC - Sprężarka HPC

$$T_{t45} = T_{t4} - \frac{P_{\text{HPC}}}{\eta_{M \text{HP}} (1 + f_B) m_{21} c_{pt}}$$

$$T_{t45} = 1.4269\text{e}+03$$

Ciśnienie całkowite [Pa] (uwzględniono sprawność izentropową)

$$P_{t45} = P_{t4} \left( \frac{\eta_{T \text{HP}} + \frac{T_{t45}}{T_{t4}} - 1}{\eta_T} \right)^{\frac{kt}{kt-1}}$$

$$P_{t45} = 2.9708e+05$$

Rozpręż na Turbinie HPT

$$HPT\ PR = \frac{P_{t4}}{P_{t45}}$$

$$HPT\_PR = 2.6152$$

### Przekrój 5 za turbinami w kanale wewnętrznym

Temperatura całkowita [K] z bilansu energii wirnika niskiego ciśnienia

$$T_{t5} = T_{t45} - \frac{P_{LPS}}{\eta_{MLP} (1 + f_B) m_{21} c_{pt}}$$

$$T_{t5} = 1.1243e+03$$

Ciśnienie całkowite [Pa] (uwzględniono sprawność izentropową)

$$P_{t5} = P_{t45} \left( \frac{\eta_{LPT} + \frac{T_{t5}}{T_{t45}} - 1}{\eta_{LPT}} \right)^{\frac{kt}{kt-1}}$$

$$P_{t5} = 9.9173e+04$$

Rozpręż na turbinie niskiego ciśnienia

$$LPT\ PR = \frac{P_{t45}}{P_{t5}}$$

$$LPT\_PR = 2.9956$$

### Przekrój 8 Wylot z dyszy wewnętrznej silnika

Temperatura całkowita [K] (przyjęto brak wymiany ciepła z elementami silnika i otoczeniem)

$$T_{t8} = T_{t5}$$

$$T_{t8} = 1.1243e+03$$

Ciśnienie całkowite [Pa] (uwzględniono straty przepływowe)

$$P_{t8} = P_{t5} * \sigma_{N\ int}$$

$$P_{t8} = 9.6198e+04$$

Ciśnienie statyczne [Pa] przy rozprężu zupełnym w dyszy wylotowej

$$P_8 = P_0$$

$$P_8 = 22000$$

Temperatura statyczna [K] z równania izentropowego przepływu

$$T_8 = T_{t8} * \left( \frac{P_8}{P_{t8}} \right)^{\frac{kt-1}{kt}}$$

$$T_8 = 779.6235$$

Prędkość gazów wylotowych wyrażona L. Macha

$$M_8 = \sqrt{\left( \frac{T_{t8}}{T_8} - 1 \right) * \frac{2}{kt - 1}}$$

$$M_8 = 1.6368$$

Prędkość dźwięku gazów wylotowych z dyszy wewnętrznej [m/s]

$$a_8 = \sqrt{kt * R_t * T_8}$$

$$a_8 = 548.3619$$

Prędkość gazów wylotowych [m/s]

$$C_8 = M_8 * a_8$$

$$C_8 = 897.5589$$

### Przekrój 18 Wylot z dyszy kanału zewnętrznego

W dyszy zewnętrznej przepływa powietrze, stąd w obliczeniach uwzględniono właściwości powietrza

Temperatura całkowita [K]

$$T_{t18} = T_{t13}$$

Ciśnienie całkowite [Pa] (uwzględniono straty przepływowe)

$$P_{t18} = \sigma_{N \text{ ext}} * P_{t13}$$

$$P_{t18} = 4.7010e+04$$

Ciśnienie statyczne [Pa] dla rozprężu zupełnego w dyszy

$$P_{18} = P_0$$

$$P_{18} = 22000$$

Temperatura statyczna [K]

$$T_{18} = T_{t18} * \left( \frac{P_{18}}{P_{t18}} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$T_{18} = 223.4588$$

Prędkość gazów wylotowych wyrażona L. Macha

$$M_{18} = \sqrt{\left( \frac{T_{t18}}{T_{18}} - 1 \right) * \frac{2}{k-1}}$$

$$M_{18} = 1.1006$$

Prędkość dźwięku [m/s]

$$a_{18} = \sqrt{k * R * T_{18}}$$

$$a_{18} = 299.6427$$

Prędkość gazów wylotowych [m/s]

$$C_{18} = M_{18} * a_{18}$$

$$C_{18} = 329.7960$$

## OBLICZENIA OSIĄGÓW SILNIKA

Ciąg silnika [N]

$$T = m_{21} (1 + f_B) C_8 + m_{13} C_{18} - m_0 V_0$$

$$T = 1.4762e+04$$

Ciąg Jednostkowy [Ns/kg]

$$ST = \frac{T}{m_0} = \frac{(1 + f_B) C_8 + BPR C_{18} - (1 + BPR) * V_0}{1 + BPR}$$

$$ST = 147.6214$$

Jednostkowe zużycie paliwa [kg/N/s]

$$SFC = \frac{m_{fB}}{T} = \frac{f_B}{(1 + BPR) * ST}$$

$$SFC = 1.8378e-05$$

Jednostkowe zużycie paliwa w [kg/N/h]

$$SFC = SFC * 3600$$

$$SFC = 0.0662$$

## Sprawność cieplna

$$\eta_{th} = \frac{(1 + f_B) * C_8^2 + BPR * C_{18}^2 - (1 + BPR) * V_0^2}{2 * f_B * FHV}$$

$$\text{etha\_th} = \\ 0.5079$$

## Sprawność napędowa

$$\eta_p = \frac{2 V_0 T}{m_{21} [(1 + f_B) C_8^2 + BPR V_{18}^2 - (1 + BPR) V_0^2]} = \frac{2 V_0 ST (1 + BPR)}{(1 + f_B) C_8^2 + BPR V_{18}^2 - (1 + BPR) V_0^2}$$

$$\text{etha\_p} = \\ 0.5886$$

## Sprawność ogólna

$$\eta_o = \frac{V_0 T}{m_{21} f_B FHV} = \frac{V_0 ST (1 + BPR)}{f_B FHV} = \eta_{th} \eta_p$$

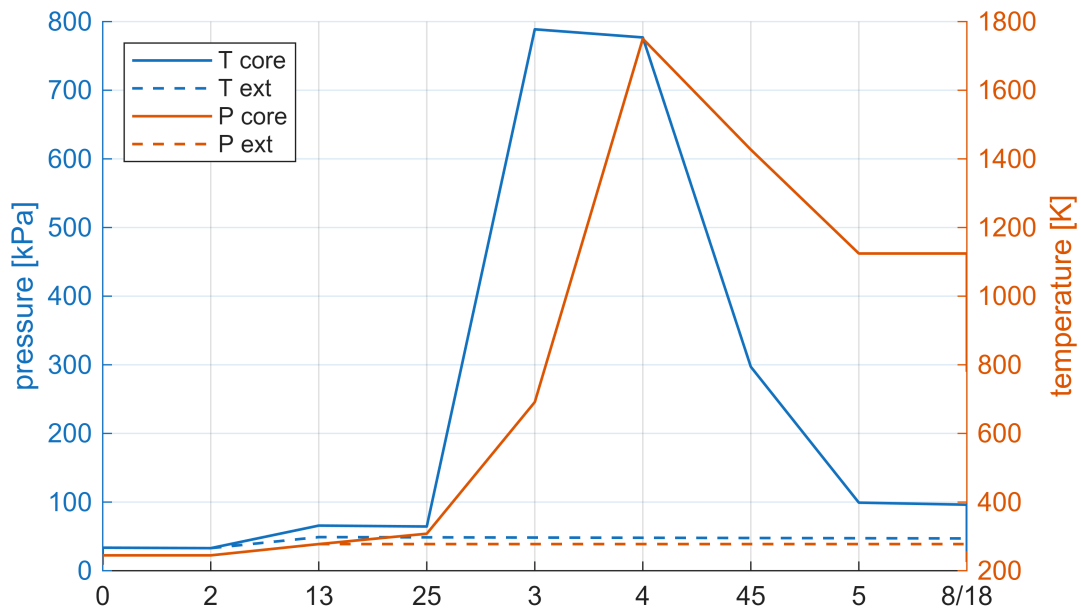
$$\text{etha\_o} = \\ 0.2989$$

## PODSUMOWANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

### Temperatura i ciśnienie w przekrojach kontrolnych silnika

Tabela2 = 14x3 table

	Section	T real [K]	P real [kPa]
1	'0'	217	22
2	't0'	245	34
3	't2'	245	33
4	't21'	308	66
5	't25'	308	64
6	't3'	691	789
7	't4'	1750	777
8	't45'	1427	297
9	't5'	1124	99
10	't8'	1124	96
11	'8'	780	22
12	't13'	278	49
13	't18'	278	47
14	'18'	223	22



## PODSUMOWANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

Tabela = 11x3 table

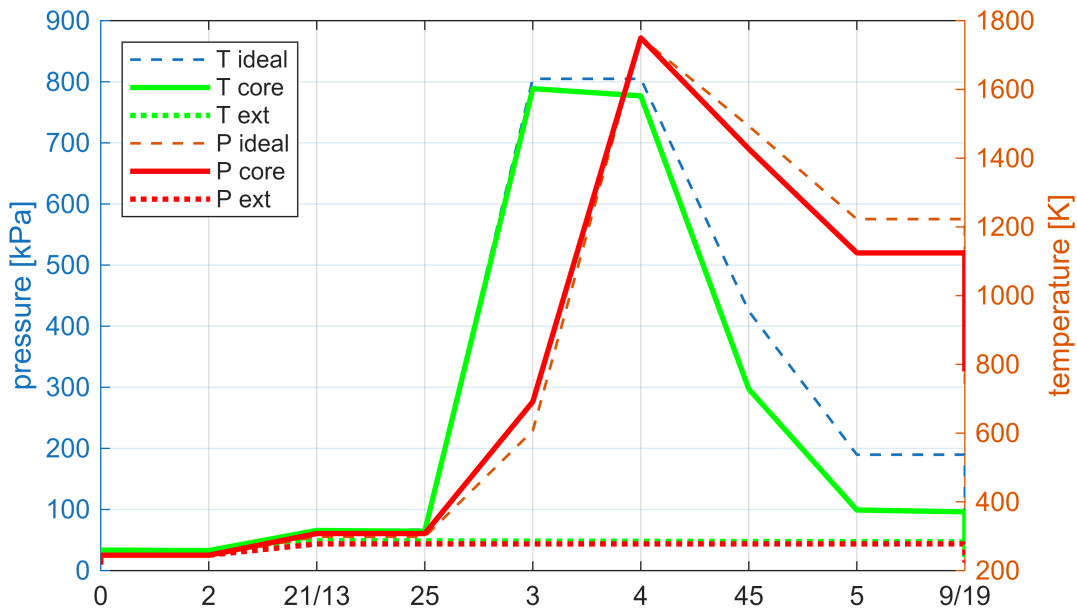
	Parameter	Unit	Value
1	'Thrust'	'kN'	14.7621
2	'Specific Thrust'	'N*s/kg'	148
3	'Fuel consumption'	'kg/s'	0.2713
4	'Specific fuel consump'	'kg/N/h'	0.0662
5	'therm. efficiency'	'.'	0.5079
6	'prop. efficiency'	'.'	0.5886
7	'overall efficiency'	'.'	0.2989
8	'C8'	'm/s'	898
9	'C18'	'm/s'	330
10	'HPT_PR'	'.'	2.6152
11	'LPT_PR'	'.'	2.9956

## SILNIK ZE STRATAMI I SILNIK IDEALNY - PORÓWNANIE

Tabela = 14x5 table

	Section	T ideal [K]	T real [K]	P ideal [kPa]	P real [kPa]
1	'0'	217	217	22	22
2	't0'	245	245	34	34
3	't2'	245	245	34	33
4	't21'	298	308	67	66

	Section	T ideal [K]	T real [K]	P ideal [kPa]	P real [kPa]
5	't25'	298	308	67	64
6	't3'	607	691	805	789
7	't4'	1750	1750	805	777
8	't45'	1493	1427	425	297
9	't5'	1223	1124	190	99
10	't8'	1223	1124	190	96
11	'8'	716	780	22	22
12	't13'	274	278	50	49
13	't18'	274	278	50	47
14	'18'	217	223	22	22



### Zestawienie wyników dotyczących osiągnięć silnika idealnego i rzeczywistego

Tabela = 11x4 table

	Parameter	Unit	Ideal	real
1	'Thrust'	'kN'	17.4316	14.7620
2	'Specific Thrust'	'N*s/kg'	174.3159	147.6210
3	'Fuel consumption'	'kg/s'	0.2900	0.2710
4	'Specific fuel consump'	'kg/N/h'	0.0599	0.0660
5	'therm. efficiency'	'-'	0.6411	0.5080
6	'prop. efficiency'	'-'	0.5150	0.5890
7	'overall efficiency'	'-'	0.3302	0.2990

	Parameter	Unit	Ideal	real
8	'C8'	'm/s'	1.0879e+03	897.5590
9	'C18'	'm/s'	339.3335	329.7960
10	'HPT_PR'	'.'	1.8958	2.6150
11	'LPT_PR'	'.'	2.2377	2.9960

## WYKRES TEMPERATURA\_ENTROPIA

Obliczenia przyrostu entropii dla poszczególnych zespołów silnika:

Przyrost entropii we wlocie [J/kg/K] :

$$\Delta s_{IN} = -R * \ln(\sigma_{IN})$$

$$dS_{IN} = 5.7982$$

przyrost entropii w wentylatorze - kanał zewnętrzny [J/kg/K] :

$$\Delta s_F = c_p * \ln \frac{T_{t13}}{T_{t2}} - R * \ln(FPR)$$

$$dS_F = 12.0104$$

przyrost entropii w wentylatorze i sprężarce niskiego ciśnienia - kanał wewnętrzny [J/kg/K] :

$$\Delta s_{LPC} = c_p * \ln \frac{T_{t21}}{T_{t2}} - R * \ln(LPC\_PR)$$

$$dS_{LPC} = 31.4684$$

Przyrost entropii w pomiędzy przekrojami 21-25 [J/kg/K] :

$$\Delta s_{21-25} = -R * \ln(\sigma_{21-25})$$

$$dS_{21-25} = 5.7982$$

Przyrost entropii w sprężarce wysokiego ciśnienia [J/kg/K] :

$$\Delta s_{HPC} = c_p * \ln \frac{T_{t3}}{T_{t25}} - R * \ln(HPC\_PR)$$

$$dS_{HPC} = 99.8974$$

Przyrost entropii w komorze spalania [J/kg/K] :

$$\Delta s_B = c_{pB} * \ln \frac{T_{t4}}{T_{t3}} - R_t * \ln(\sigma_B)$$

$$dS_B =$$

1.1189e+03

przyrost entropii w turbinie wysokiego ciśnienia [J/kg/K] :

$$\Delta s_{\text{HPT}} = c_{\text{pt}} * \ln \frac{T_{t45}}{T_{t4}} - R_t * \ln \left( \frac{P_{t45}}{P_{t4}} \right)$$

dS\_HPT =  
39.9816

Przyrost entropii w turbinie niskiego ciśnienia [J/kg/K] :

$$\Delta s_{\text{LPT}} = c_{\text{pt}} * \ln \frac{T_{t5}}{T_{t45}} - R_t * \ln \left( \frac{P_{t5}}{P_{t45}} \right)$$

dS\_LPT =  
39.2606

Przyrost entropii w dyszy kanału wewnętrznego [J/kg/K] :

$$\Delta s_{N_{\text{int}}} = -R_t * \ln(\sigma_{N_{\text{int}}})$$

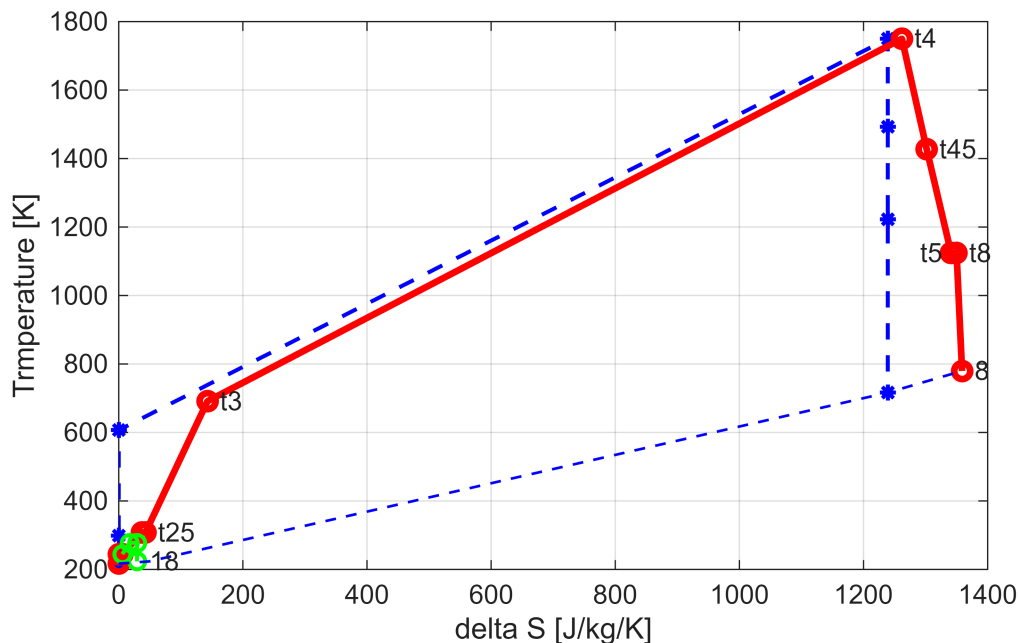
dS\_N\_int =  
8.8332

przyrost entropii w dyszy kanału zewnętrznego [J/kg/K] :

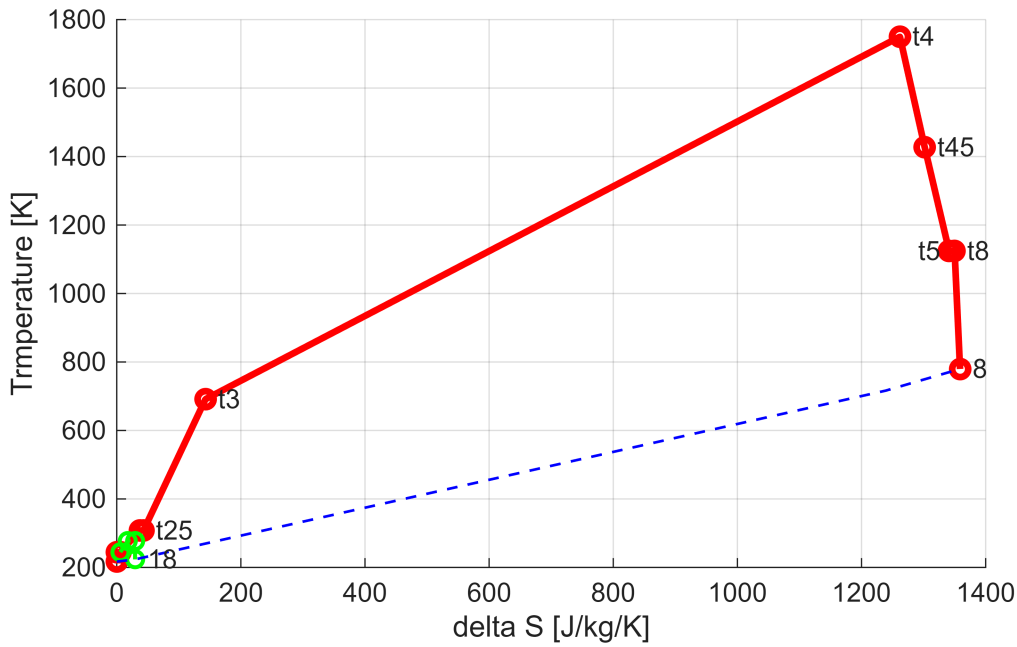
$$\Delta s_{N_{\text{ext}}} = -R * \ln(\sigma_{N_{\text{ext}}})$$

dS\_N\_ext =  
11.7159

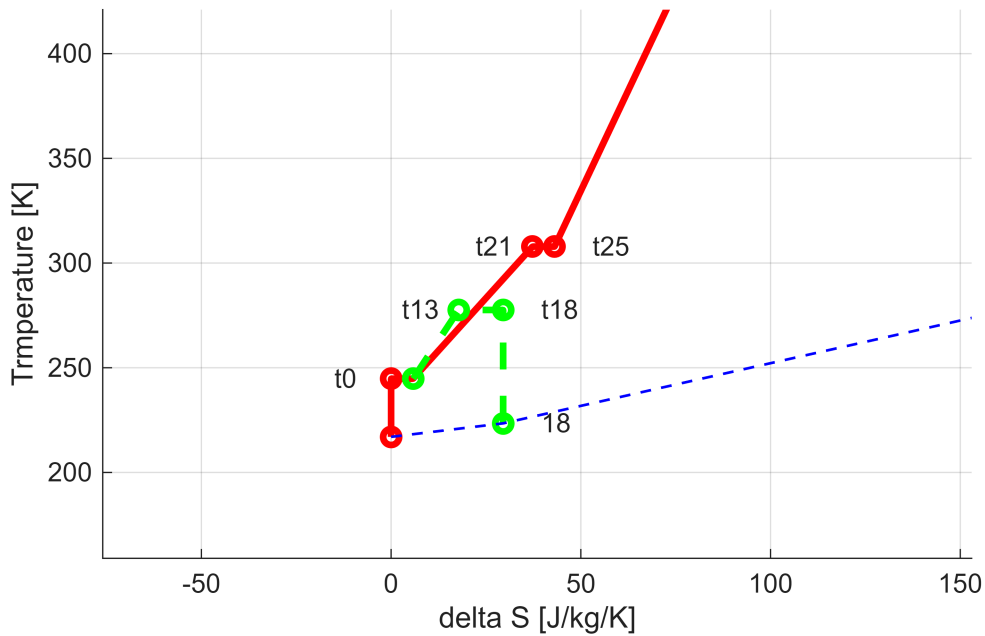
Wykres temperatura-entropia dla silnika ze stratami i bez strat.



Wykres temperatura-entropia dla całego silnika



Temperatura- entropia wykres dla kanału zewnętrznego



Przyrost entropii w zespołach:

Tabela3 = 10x2 table

	Parameter	entropia [J/kg/K]
1	'ds_IN'	6
2	'ds_LPC'	31
3	'ds_21_25'	6
4	'ds_HPC'	100

	Parameter	entropy [J/kg/K]
5	'ds_B'	1119
6	'ds_HPT'	40
7	'ds_LPT'	39
8	'ds_N_int'	9
9	'ds_F'	12
10	'ds_N_ext'	12

## OBLICZENIA SILNIKA GDY W SILNIKU SĄ ZBIEŻNE DYSZE WYLOTOWE

Obliczenia zostaną wykonane dla silnika o takich sdamych parametrach pracy jak wcześniej, jednak tym razem zostanie przyjęte, że dysze wylotowe kanałów są dyszami zbieżnymi. Spowoduje to, że nie w każdych warunkach będą one zapewniały rozpręż zupełny - będzie to zależało od staosunku ciśnień w dyszy wylotowej silnika do ciśnienia otoczenia.

Ponieważ w przykładzie obliczeniowym dysze nie wpływają na parametry pracy silnika, dlatego wszystkie obliczenia dotyczące parametrów gazu w przekrojach silnika do przekroju wlotowego do dysz wylotowych są takie jak w poprzednim przykładzie. Również wartości parametrów całkowitych w przekrojach wylotowych dysz silnika są takie, jak wyznaczono wcześniej. Różnica zaczyna się w obliczeniach parametrów statycznych oraz prędkości wylotowej strumienia gazów z silnika

### Przekrój 8, Wylot z dyszy kanału wewnętrznego:

Temperatura całkowita - wyliczona we wcześniejszym przykładzie

$$T_{t8} = 1.1243e+03$$

Ciśnienie całkowite - wyliczone we wcześniejszym przykładzie

$$P_{t8} = 9.6198e+04$$

Warunki przepływu krytycznego dla dyszy wewnętrznej:

$$\beta = \left( \frac{k_t + 1}{2} \right)^{\frac{k_t}{k_t - 1}}$$

$$\text{beta} = 1.8506$$

Stosunek ciśnienia całkowitego do ciśnienia otoczenia:

$$\frac{P_{t8}}{P_0} =$$

$$\text{ans} = 4.3726$$

$P_{t8}/P_0$  jest większe od  $\beta$  stąd rozpręż zupełny w dyszy nie jest możliwy. Występuje rozpręż krytyczny w obliczeniowym przykładzie parametry będą oznaczane z indeksem (IE - incomplete expansion):

$$P_{8IE} = \frac{P_{t8}}{\beta} \quad [\text{Pa}]$$

$$P_{8\_IE} = 5.1982e+04$$

Temperatura statyczna w dyszy wylotowej

$$T_{8IE} = \frac{2 T_{t8}}{k_t + 1} \quad [\text{K}]$$

$$T_{8\_IE} = 965.0293$$

Gęstość strumienia gazów w przekroju wylotowym:

$$\rho_{8IE} = \frac{P_{8IE}}{R_t T_{8IE}}$$

$$\rho_{8\_IE} = 0.1857$$

Prędkość gazów w przekroju wylotowym dyszy

$$C_{8IE} = a_{,8} = \sqrt{k_t * R_t * T_{8IE}} \quad [\text{m/s}]$$

$$C_{8\_IE} = 610.0916$$

Prędkość ekwiwalentna gazów do obliczeń osiągow - prędkość po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia poza dyszą silnika:

$$C_{8e} = C_{8IE} + \frac{(P_{8IE} - P_0)}{\rho_{8IE} * C_{8IE}}$$

$$C_{8e} = 874.6679$$

Ciśnienie statyczne w przekroju 8e jest równe ciśnieniu otoczenia

$$P_{8e} = P_0$$

$$P_{8e} = 22000$$

Temperatura statyczna w przekroju 8e obliczona z równania Bernoulliego

$$T_{8e} = T_{t8} - \frac{C_{8e}^2}{2 c_{p_t}}$$

$$T_{8e} = 797.3173$$

**Przekrój 18, Wylot z dyszy kanału zewnętrznego:**

Temperatura całkowita - wyliczona we wcześniejszym przykładzie

$$T_{t18} = 277.5979$$

Ciśnienie całkowite - wyliczone we wcześniejszym przykładzie

$$P_{t18} = 4.7010e+04$$

Warunki przepływu krytycznego dla dyszy wewnętrznej - (czynnikiem przepływającym jest powietrze):

$$\beta = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\text{beta} = 1.8929$$

Stosunek ciśnienia całkowitego do ciśnienia otoczenia:

$$\frac{P_{t18}}{P_0} =$$

$$\text{ans} = 2.1368$$

$P_{t18}/P_0$  jest większe od  $\beta$  zatem obliczenia będą wykonane jak dla dyszy o niezupełnym rozprężu, stąd indeks (IE - incomplete expansion):

$$P_{18\text{IE}} = \frac{P_{t18}}{\beta} \quad [\text{Pa}]$$

$$P_{18\_IE} = 2.4834e+04$$

Temperatura statyczna w przekroju wylotowym

$$T_{18\text{IE}} = \frac{2 * T_{t18}}{k + 1} \quad [\text{K}]$$

$$T_{18\_IE} = 231.3316$$

Wyznaczenie gęstości strumienia gazów w przekroju wylotowym dyszy:

$$\rho_{18\text{IE}} = \frac{P_{18\text{IE}}}{R * T_{18\text{IE}}}$$

$$\text{rho}_{18\_IE} = 0.3741$$

Prędkość gazów wylotowych

$$C_{18\text{IE}} = a_{18} = \sqrt{k * R * T_{18\text{IE}}} \quad [\text{m/s}]$$

$$C_{18\_IE} = 304.8754$$

Prędkość ekwiwalentna - po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia poza dyszą

$$C_{18e} = C_{18IE} + \frac{(P_{18IE} - P_0)}{\rho_{18IE} C_{18IE}}$$

$$C_{18e} = 329.7298$$

Ciśnienie statyczne w przekroju 18e jest równe P0

$$P_{18e} = P_0$$

$$P_{19e} = 22000$$

Temperatura statyczna po rozprężeniu do ciśnienia otoczenia

$$T_{18e} = T_{t18} - \frac{C_{18e}^2}{2 * cp}$$

$$T_{18e} = 223.5075$$

## OBLICZENIA OSIĄGÓW SILNIKA ZE ZBIEŻNYMI DYSZAMI WYLOTOWYMI

Ciąg [N]

$$T = m_{21} (1 + f_B) C_{8e} + m_{13} C_{18e} - m_0 V_0$$

$$T_{IE} = 1.4542e+04$$

Ciąg jednostkowy [Ns/kg]

$$ST = \frac{T}{m_0} = \frac{(1 + f_B) C_{8e} + BPR C_{18e} - (1 + BPR) V_0}{1 + BPR}$$

$$ST_{IE} = 145.4181$$

Jednostkowe zużycie paliwa [kg/N/s]

$$SFC = \frac{m_{fB}}{T} = \frac{f_B}{(1 + BPR) ST}$$

$$SFC_{IE} = 1.8656e-05$$

Jednostkowe zużycie paliwa w [kg/N/h]

$$SFC = SFC_{3600}$$

$$SFC_{IE} = 0.0672$$

Sprawność cieplna

$$\eta_{th} = \frac{(1 + f_B) C_{8e}^2 + BPR V_{18e}^2 - (1 + BPR) V_0^2}{2 f_B FHV}$$

etha\_th\_IE =  
0.4914

### Sprawność napędowa

$$\eta_p = \frac{2 V_0 ST (1 + BPR)}{(1 + f_B) C_e^2 + BPR C_{1e}^2 - (1 + BPR) * V_0^2}$$

etha\_p\_IE =  
0.5992

### Sprawność ogólna

$$\eta_o = \frac{V_0 * ST * (1 + BPR)}{f_B * FHV} = \eta_{th} * \eta_p$$

etha\_o\_IE =  
0.2945

### Zestawienie osiągow silnika dla dysz znieżnych i dysz umożliwiających rozpręż zupełny

Tabela = 11x4 table

	Parameter	Unit	CONV Nozzles	FULL EXPANS
1	'Thrust'	'kN'	14.5418	14.7621
2	'Specific Thrust'	'N*s/kg'	145.4181	147.6214
3	'Fuel consumption'	'kg/s'	0.2713	0.2713
4	'Specific fuel consump'	'kg/N/h'	0.0672	0.0662
5	'therm. efficiency'	'-'	0.4914	0.5079
6	'prop. efficiency'	'-'	0.5992	0.5886
7	'overall efficiency'	'-'	0.2945	0.2989
8	'C8'	'm/s'	610.0916	897.5589
9	'C8e'	'm/s'	874.6679	897.5589
10	'C18'	'm/s'	304.8754	329.7960
11	'C18e'	'm/s'	329.7298	329.7960

### OBLICZENIA DO WYKRESU ENTALPIA ENTROPIA

Zmiany w wykresach entalpia entropia będą jedynie dotyczyły dysz wylotowych, stąd obliczenia dla innych komponentów silnika pozostaną jak we wcześniejszym przykładzie.

Przyrost entropii w dyszy wewnętrznej [J/kg/K] :

$$\Delta s_{N \text{ int}} = -Rt * \ln(\sigma_{N \text{ int}})$$

dS\_N\_int =  
8.8332

Przyrost entropii strumienia w rozprężaniu poza dyszą [J/kg/K] :

$$\Delta s_{8-8e} = c_{p_t} \ln\left(\frac{T_{8e}}{T_{8IE}}\right) - R_t \ln\left(\frac{P_{8e}}{P_{8IE}}\right)$$

$$ds_{8-8e} = 25.9981$$

Przyrost entropii w dyszy zewnętrznej [J/kg/K] :

$$\Delta s_{N_{ext}} = -R * \ln(\sigma_{N_{ext}})$$

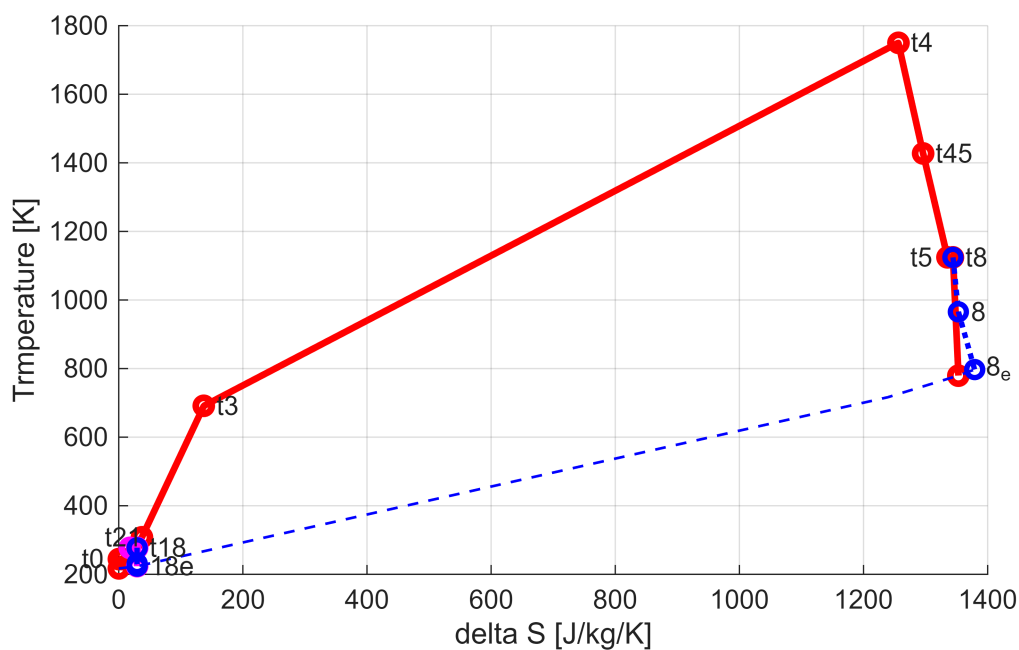
$$ds_{N_{ext}} = 11.7159$$

Przyrost entropii strumienia w rozprężaniu poza dyszą [J/kg/K] :

$$\Delta s_{18-18e} = c_p \ln\left(\frac{T_{18e}}{T_{18IE}}\right) - R * \ln\left(\frac{P_{18e}}{P_{18IE}}\right)$$

$$ds_{18-18e} = 0.2016$$

Wykres temperatura-entropia dla silnika o niepełnym rozprężu w dyszach wylotowych



Wykres temperatura-entropia dla kanału zewnętrznego

