

Technická univerzita v Košiciach

---

Letecká fakulta

Katedra leteckého inžinierstva

**ROČNÍKOVÁ PRÁCA č. 3**  
**PRIBLIŽNÝ VÝPOČET TEPELNÉHO**  
**OBEHU LTKM**

**Študent:**  
**Cvičiaci učiteľ:**

**Peter Majoroš**  
**Ing. Marián HOCKO, PhD.**

**Košice 2006**

**Zadanie:**

Vypočítajte základné parametre tepelného obehu dvojprúdového dvojhriadeľového LTKM **RD33** s axiálnym kompresorom a nadzvukovou regulovateľnou výstupnou dýzou, pri vzlete na zemi s maximálnym režimom, ak sú zadané nasledujúce parametre:

Výška letu  $H = 0 \text{ m}$ ,

Rýchlosť letu  $c_0 = 0 \text{ m.s}^{-1}$ ,

Celkový stupeň stlačenia kompresora  $\pi_{KC} = 22$ ,

Celkový stupeň stlačenia vysokotlakého kompresora  $\pi_{VTKC} = 7$ ,

Obtokový pomer  $m = 0,475$ ,

Volené veličiny:

$$\sigma_{vst} = 0,99,$$

$$\sigma_{sk} = 0,98,$$

$$\sigma_{II} = 0,96,$$

$$\eta_{DC} = 0,86,$$

$$\eta_{mv} = 0,985,$$

$$\eta_{VTKC} = 0,87,$$

$$\eta_{TC,N} = 0,96,$$

$$\eta_{TC,V} = 0,98,$$

$$\varphi_{tr} = 0,97,$$

$$\mu_I = 0,96,$$

$$\mu_{II} = 0,97,$$

$$t_{3C} = 1263 \text{ } ^\circ\text{C}$$

RD33 ( obr. 1. ) je motor použitý v lietadle MiG 29, ktoré je na obr. 2.



**Obr. 1. Motor RD 33**



**Obr. 2. MiG 29**

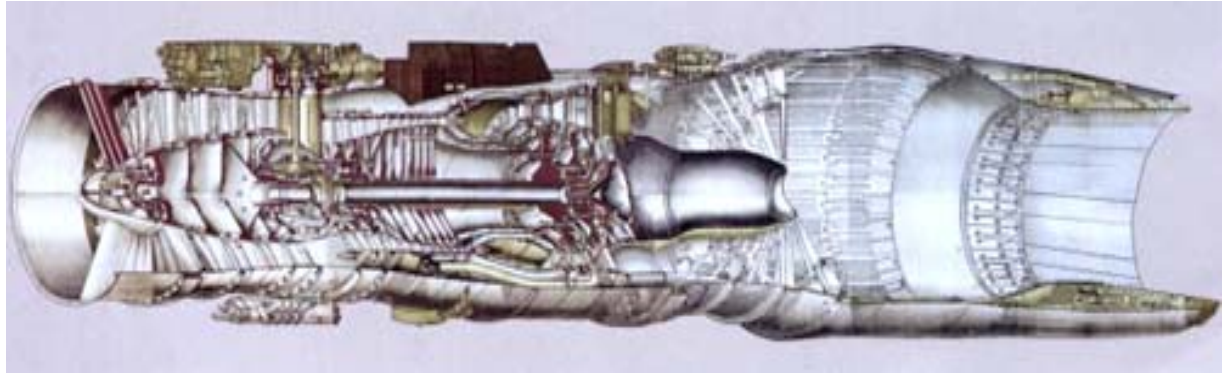


Schéma motora RD33.

Výpočet tepelného obehu:

1. Z tabuliek MŠA pre  $H = 0\text{m}$ :

$$p_0 = 10,13 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$
$$T_0 = 288 \text{ K}$$

2. Celkový tlak a celková teplota pred vstupným ústrojenstvom:

$$p_{0C} = p_0 \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_0^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \text{ [Pa]}$$

$$p_{0C} = 10,13 \cdot 10^4 \cdot \left( 1 + \frac{1,4 - 1}{2} \cdot 0,2^2 \right)^{\frac{1,4}{1,4 - 1}}$$

$$p_{0C} = \underline{\underline{10,13 \cdot 10^4 \text{ Pa}}}$$

$$T_{0C} = T_0 \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_0^2 \right) \text{ [K]}$$

$$T_{0C} = 288 (1 + 0,2 \cdot 0,2)$$

$$T_{0C} = \underline{\underline{288 \text{ K}}}$$

3. Celkový tlak a celková teplota na vstupe do nízkotlakového kompresora ( dúchadla ):

$$p_{1C} = \sigma_{\text{vst}} \cdot p_{0C}$$

$$p_{1C} = 0,99 \cdot 10,13 \cdot 10^4 = \underline{\underline{100\,287 \text{ Pa}}}$$

$$T_{1C} = T_{0C} = \underline{\underline{288 \text{ K}}}$$

**4. Parametre vzduchu na výstupe z nízkotlakového kompresora:**

$$p_{XC} = \pi_{DC} \cdot p_{1C} \text{ [Pa]}$$

$$\text{kde: } \pi_{DC} = \frac{\pi_{KC}}{\pi_{VTKC}} \text{ [1]}$$

$$p_{XC} = \frac{22}{7} \cdot 100\,287 = \underline{\underline{315\,187,71 \text{ Pa}}} = p_{2CII}$$

$$T_{XC} = T_{1C} \left( 1 + \frac{\frac{\kappa-1}{\pi_{DC}^{\frac{\kappa}{\eta_{DC}}} - 1}}{\eta_{DC}} \right) \text{ [K]}$$

$$T_{XC} = 288 \left( 1 + \frac{\left[ \frac{22}{7} \right]^{1,4-1} - 1}{0,86} \right) = \underline{\underline{417,617 \text{ K}}} = T_{2CII}$$

**5. Parametre vzduchu na výstupe z vysokotlakového kompresora:**

$$p_{2C} = \pi_{VTKC} \cdot p_{XC} \text{ [Pa]}$$

$$p_{2CI} = 7 \cdot 315\,187,71 = \underline{\underline{2\,206\,313,97 \text{ Pa}}}$$

$$T_{2C} = T_{XC} \left( 1 + \frac{\frac{\kappa-1}{\pi_{VTKC}^{\frac{\kappa}{\eta_{VTKC}}} - 1}}{\eta_{VTKC}} \right) \text{ [K]}$$

$$T_{2CI} = 417,617 \left( 1 + \frac{7^{\frac{0,4}{1,4}} - 1}{0,87} \right) = \underline{\underline{774,578 \text{ K}}}$$

**6. Parametre plynu pred plynovou turbínou:**

$$p_{3C} = \sigma_{SK} \cdot p_{2C} \text{ [Pa]}$$

$$p_{3CI} = 0,98 \cdot 2\,206\,313,97 = \underline{\underline{2\,162\,187,69 \text{ Pa}}}$$

$$T_{3C} = t_{3C} + 273,15 \text{ [K]}$$

$$T_{3CI} = 1263 + 273,15 = \underline{\underline{1536,15 \text{ K}}}$$

**Rovnováha výkonu plynovej turbíny a kompresora**

**7. Rovnováha výkonu na vysokotlakej časti motora:**

$$T_{YC} = T_{3CI} - \frac{c_{p,v}}{c_{p,pl}} \cdot (T_{2CI} - T_{XC}) \cdot \frac{1}{\eta_{mv}} \text{ [K]}$$

kde:

$$c_{p,v} = 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$c_{p,pl} = 1158 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$T_{YC} = 1536,15 - \frac{1005}{1158} \cdot (774,578 - 417,617) \cdot \frac{1}{0,985} = \underline{\underline{1221,634 \text{ K}}}$$

$$p_{YC} = p_{3CI} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T_{YC}}{T_{3CI}} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{TCV}} \right]^{\frac{\kappa'}{\kappa'-1}} \text{ [Pa]}$$

kde:

$$\kappa' = 1,33,$$

$$p_{YC} = 2\,162\,187,69 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1221,634}{1536,15} \right) \cdot \frac{1}{0,98} \right]^{\frac{1,33}{1,33-1}} = \underline{\underline{840\,790,04 \text{ Pa}}}$$

**8. Rovnováha výkonu na nízkotlakej časti motora:**

$$T_{4CI} = T_{YC} - \frac{c_{p,v}}{\eta_{mv} \cdot c_{p,pl}} \cdot [(1+m)(T_{2CI} - T_{1C}) + (T_{XC} - T_{2CI})] \text{ [K]}$$

$$T_{4CI} = 1221,634 - \frac{1005}{0,985 \cdot 1158} \cdot [(1+0,475)(417,617 - 288)(417,617 - 417,617)] = \underline{\underline{1053,182 \text{ K}}}$$

$$p_{4CI} = p_{YC} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T_{4CI}}{T_{YC}} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{TCN}} \right]^{\frac{\kappa'}{\kappa'-1}} \text{ [K]}$$

$$p_{4CI} = 840\,790,04 \cdot \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1053,182}{1221,634} \right) \cdot \frac{1}{0,96} \right]^{0,33} = \underline{\underline{450\,070,09 \text{ Pa}}}$$

**9. Podľa zvoleného  $\varphi_{tr}$  určíme tlakový spád v tryske a výstupnú rýchlosť:**

$$\left( \frac{p_{5I}}{p_{4CI}} \right)_{KRIT} = \left( 1 - \frac{\kappa'-1}{\kappa'+1} \cdot \frac{1}{\varphi_{tr}^2} \right)^{\frac{\kappa'}{\kappa'-1}} \text{ [1]}$$

$$\left( \frac{p_{5I}}{p_{4CI}} \right)_{KRIT} = \left( 1 - \frac{1,33-1}{1,33+1} \cdot \frac{1}{0,97^2} \right)^{0,33} = \underline{\underline{0,518}}$$

ak  $\frac{p_0}{p_{4CI}} > \left( \frac{p_{5I}}{p_{4CI}} \right)_{KRIT}$  - potom je v tryske podkritický tlakový spád,

-výstupnú rýchlosť určíme zo vzťahu:  $c_{5I} = \varphi_{tr} \cdot \sqrt{2 \cdot c_{p,pl} \cdot T_{4CI} \left[ 1 - \left( \frac{p_0}{p_{4CI}} \right)^{\frac{\kappa'-1}{\kappa'}} \right]}$  [m.s<sup>-1</sup>]

ak  $\frac{p_0}{p_{4CI}} < \left( \frac{p_{5I}}{p_{4CI}} \right)_{KRIT}$  - potom je v tryske nadkritický tlakový spád,

- v danom prípade určíme výstupnú rýchlosť za vzťahu:  $c_{5I} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa'}{\kappa'+1} \cdot r_{pl} \cdot T_{4CI}}$  [m.s<sup>-1</sup>]

$$\frac{p_0}{p_{4CI}} = \frac{10,13 \cdot 10^4}{450070,09} = \underline{\underline{0,225}}$$

$$\Rightarrow \frac{p_0}{p_{4CI}} < \left( \frac{p_{5I}}{p_{4CI}} \right)_{KRIT} \quad \text{v tryske je nadkritický tlakový spád}$$

$$c_{5I} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa'}{\kappa' + 1} \cdot r_{pl} \cdot T_{4CI}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\text{kde: } r_{pl} = 287,4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{5I} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{1,33 + 1} \cdot 287,4 \cdot 1053,182} = \underline{\underline{587,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

### 10. Stavové veličiny na výstupe z dýzy:

predpoklad: vo výstupnej sústave neuvažujeme s odvodom tepla,

$$T_{5CI} = T_{4CI} = \underline{\underline{1053,182 \text{ K}}}$$

$$T_{5I} = T_{5CI} - \frac{c_{5I}^2}{2 \cdot c_{p,pl}} \quad [\text{K}]$$

$$T_{5I} = 1053,182 - \frac{(587,84)^2}{2 \cdot 1158} = \underline{\underline{903,978 \text{ K}}}$$

$$\rho_{5I} = \frac{p_{5I}}{r_{pl} \cdot T_{5I}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

kde:

$\rho_{5I} = \rho_0$  – pre podkritický tlakový spád

$$\rho_{5I} = \rho_{4CI} \cdot \left( \frac{p_{5I}}{p_{4CI}} \right)_{KRIT} \quad \text{- pre nadkritický tlakový spád}$$

$$\rho_{5I} = 450 \, 070,09 \cdot 0,518 = \underline{\underline{233 \, 136,31 \text{ Pa}}}$$



$$\rho_{5I} = \frac{233136,31}{287,4 \cdot 903,978} = \underline{\underline{0,897 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}}$$

### Parametre vzduchu v II. prúde

**11. Za predpokladu, že v II. prúde neodvádzame teplo platí:**

$$T_{3CII} = T_{2CII} = \underline{\underline{417,617 \text{ K}}}$$

Pokles celkového tlaku II. prúdu závisí na prevedení a dĺžke výstupnej rúry II. prúdu vzduchu, čo vyjadruje  $\sigma_{II}$  :

$$p_{3CII} = \sigma_{II} \cdot p_{2CII} \text{ [Pa]}$$

$$p_{3CII} = 0,96 \cdot 315\,187,71 = \underline{\underline{302\,580,2 \text{ Pa}}}$$

**12. Určíme kritický tlakový spád v dýze II. prúdu:**

$$\left( \frac{p_{5II}}{p_{3CII}} \right)_{KRIT} = \left( 1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \cdot \frac{1}{\varphi_{tr}^2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad [1]$$

$$\left( \frac{p_{5II}}{p_{3CII}} \right)_{KRIT} = \left( 1 - \frac{1,4 - 1}{1,4 + 1} \cdot \frac{1}{0,97^2} \right)^{\frac{1,4}{0,4}} = \underline{\underline{0,5054}}$$

$$\left( \frac{p_0}{p_{3CII}} \right) = \frac{101300}{302580,2} = \underline{\underline{0,335}}$$

$$\left( \frac{p_0}{p_{3CII}} \right) < \left( \frac{p_{5II}}{p_{3CII}} \right)_{KRIT} \quad \text{- nadkritický tlakový spád}$$

Podľa tlakového spádu vo výstupnej dýze sa stanoví rýchlosť vzduchu:

$$c_{5II} = \varphi_{tr} \cdot \sqrt{2 \cdot c_{p,v} \cdot T_{3CII} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_0}{p_{3CII}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad \text{- pre podkritický tlakový spád}$$

$$c_{5II} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} \cdot r_v \cdot T_{3CII}} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad \text{- pre nadkritický tlakový spád}$$

kde:

$$r_v = 287,1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1},$$

$$c_{5II} = \sqrt{\frac{2,1,4}{1,4+1} \cdot 287,1 \cdot 417,617} = \underline{\underline{376,19 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}}$$

**13. Stanovíme parametre vzduchu na výstupe z dýzy II. prúdu:**

$$T_{5CII} = T_{3CII} = \underline{\underline{417,617 \text{ K}}}$$

$$T_{5II} = T_{5CII} - \frac{c_{5II}^2}{2 \cdot c_{p,v}} \quad [\text{K}]$$

$$T_{5II} = 417,617 - \frac{(376,19)^2}{2 \cdot 1005} = \underline{\underline{347,209 \text{ K}}}$$

$$\rho_{5II} = \frac{p_{5II}}{r_v \cdot T_{5II}} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$$

$$p_{5II} = p_{3CII} \cdot \left( \frac{p_{5II}}{p_{3CII}} \right)_{KRIT} \quad [\text{Pa}] \quad \text{- pre nadkritický tlakový spád}$$

$$p_{5II} = 302\,580,2 \cdot 0,5054 = \underline{\underline{152\,924,03 \text{ Pa}}}$$

$$\rho_{5II} = \frac{152924,03}{287,1 \cdot 417,617} = \underline{\underline{1,275 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}}}$$

**Hlavné parametre motora**

**14. Špecifický ťah motora:**

$$F_m = \frac{1}{1+m} \cdot \left\{ \left[ (c_{5I} - c_0) + \frac{p_{5I} - p_0}{\rho_{5I} \cdot c_{5I} \cdot \mu_I} \right] + m \left[ (c_{5II} - c_0) + \frac{p_{5II} - p_0}{\rho_{5II} \cdot c_{5II} \cdot \mu_{II}} \right] \right\} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] [\text{N} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}]$$

$$F_m = \frac{1}{1,475} \cdot \left\{ \left[ 587,84 + \frac{233136,31 - 101300}{0,897 \cdot 587,84 \cdot 0,96} \right] + 0,475 \cdot \left[ 376,19 + \frac{152924,03 - 101300}{1,275 \cdot 376,19 \cdot 0,97} \right] \right\}$$

$$F_m = \underline{\underline{731,985 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

**15. Ťah motora:**

$$F_T = F_m \cdot Q_v [\text{N}]$$

$$F_T = 731,985 \cdot 77 = \underline{\underline{56\,362,845 \text{ N}}} = \underline{\underline{56,36 \text{ kN}}}$$

**16. Špecifická spotreba paliva**

$$c_m = \frac{3600 \cdot c_{p, str} \cdot (T_{3Cl} - T_{2Cl})}{(1+m) \cdot H_u \cdot \eta_{SP} \cdot F_m} [\text{kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}]$$

$$c_m = \frac{3600}{1+m} \cdot \frac{1}{l_0 \alpha} \cdot \frac{1}{F_m} [\text{kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}]$$

kde:

$\frac{1}{l_0 \alpha}$  - z grafu v učebnici *Teorie leteckých motorů část II* str. 406, pre nami vypočítané hodnoty

je približne 0,0227

$$c_m = \frac{3600}{1,475} \cdot 0,0227 \cdot \frac{1}{731,985} = \underline{\underline{0,07569 \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}}} = \underline{\underline{0,076 \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}}}$$

**Záver.**

**Zhodnotenie výpočtu:**

Porovnanie hodnôt motora RD33 s vypočítanými hodnotami:

Motor RD33:

$$F_T = 54,94 \text{ kN},$$

$$c_m = 0,076 \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h}^{-1},$$

Vypočítané hodnoty:

$$F_T = 56,36 \text{ kN},$$

$$c_m = 0,076 \text{ kg} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{h}^{-1},$$

Tabuľka výsledkov:

Veličina	Hodnota	Jednotka
H	0	m
$c_0$	0	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$Q_v$	77	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\pi_{KC}$	22	1
$\pi_{VTKC}$	7	1
$p_0$	101 300	Pa
$T_0$	288	K
$p_{0C}$	101 300	Pa
$T_{0C}$	288	K
$p_{1C}$	100 287	Pa
$T_{1C}$	288	K
$p_{XC} = p_{2CII}$	315 187,71	Pa
$T_{XC} = T_{2CII} = T_{3CII} = T_{5CII}$	417,617	K
$p_{2CI}$	2 206 313,97	Pa
$T_{2CI}$	774,578	K
$p_{3CI}$	2 162 187,69	Pa

Pokr. tabuľky:

Veličina	Hodnota	Jednotka
$T_{3CI}$	1536,15	K
$T_{YC}$	1221,634	K
$p_{YC}$	840 790,04	Pa
$T_{4CI} = T_{5CI}$	1053,182	K
$p_{4CI}$	450 070,09	Pa
$c_{5I}$	587,84	$m.s^{-1}$
$T_{5I}$	903,978	K
$p_{5I}$	233 136,31	Pa
$\rho_{5I}$	0,897	$kg.m^{-3}$
$p_{3CII}$	302 580,2	Pa
$c_{5II}$	376,19	$m.s^{-1}$
$p_{5II}$	152 924,03	Pa
$\rho_{5II}$	1,275	$kg.m^{-3}$
$F_m$	731,985	$m.s^{-1} = N.kg^{-1}.s$
$F_T$	56 362,845	N
$c_m$	0,07569	$kg.N^{-1}.h^{-1}$

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

## LETECKÁ FAKULTA

Katedra leteckého inžinierstva

Akademický rok: 2006/2007

## PRIBLIŽNÝ VÝPOČET TEPELNÉHO OBEHU LTKM

**Meno študenta:** Peter MAJOROŠ

**Názov študijného odboru:** 430

**Názov špecializácie:** Oprava, údržba a prevádzka lietadiel a leteckých motorov

**Názov ročníkovej práce:** Približný výpočet tepelného obehu LTKM

**Zadanie ročníkovej práce:** Vypočítajte základné parametre tepelného obehu dvojprúdového dvojhriadeľového LTKM RD33 s axiálnym kompresorom a nadzvukovou regulovateľnou výstupnou dýzou, pri vzlete na zemi s maximálnym režimom pre uvedené parametre.

**Prednášajúci učiteľ:** Ing. Marián HOCKO, PhD.

**Cvičiaci učiteľ:** Ing. Marián HOCKO, PhD.

**Vedúci katedri:** prof. Ing. Jozef POVAŽAN, CSc.

**Dekan LF:** m.prof. RNDr. František OLEJNÍK, CSc.

**Termín odovzdania ročníkovej práce:**

V Košiciach dňa