

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH A POSOUZENÍ ALTERNATIV PŘEPLŇOVÁNÍ VZNĚTOVÉHO  
MOTORU S RECIRKULACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ PRÁŠEK

BRNO 2008



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2007/08

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Prášek Ondřej, Bc.

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Konstrukce strojů a zařízení (2302T010)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Návrh a posouzení alternativ přeplňování vznětového motoru s recirkulací**

v anglickém jazyce:

**Proposal and Examination of Supercharging Alternatives of CI-engine with Recirculation**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh konstrukčního upořádání celku zabezpečujícího přeplňování motoru s mezichlazením plicního vzduchu včetně recirkulace.

Motor V=4156/4x105/120,  $P_e=100$  kW, převýšení  $M_t$  40 %,  $M_t$  v 1000 min<sup>-1</sup> = 480 Nm

Cíle diplomové práce:

Definování velikosti dílů turbodmychadla s obtokovým ventilem pro 2 hodnoty hmoty recirkulujících plynů.





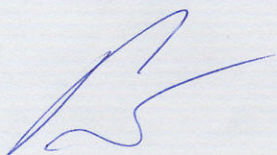
Seznam odborné literatury:

- [1] Koehler, E.: Verbrennungsmotoren, Vieweg ferlag, Braunschweig 1998
- [2] Rauscher, J.: Vozidlové motory, studijní opory, FSI VUT Brno 2003
- [3] Vlk, F.: Vozidlové spalovací motory, Brno 2003

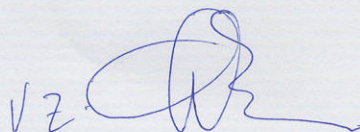
Vedoucí diplomové práce: Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne 30.10.2007



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Ondřej Prášek  
Bytem: Langrova 877/25, 62700, Brno - Slatina  
Narozen/a (datum a místo): 21.11.1978, Uherské Hradiště

(dále jen "autor")

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství  
se sídlem Technická 2896/2, 61669 FSI VUT v Brně  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen "nabyvatel")

## Článek 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh a posouzení alternativ přeplňování vznětového motoru  
s recirkulací

Vedoucí/školicitel VŠKP:

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☐ tištěné formě - počet exemplářů .....
- ☐ elektronické formě - počet exemplářů .....

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užívat, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....

Nabyvatel

.....

Autor



## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce bylo najít vhodnou volbu přeplňování čtyřdobého vznětového motoru s recirkulací spalin dle zadaných výkonových požadavků. Tohoto zadání bylo dosaženo za použití turbodmychadla s variabilními lopatkami a mezichladiče stlačeného vzduchu systémem vzduch-vzduch

### **Klíčová slova**

Přeplňování, vznětový motor, turbodmychadlo, variabilní lopatky rozváděcího kola, recirkulace spalin, EGR ventil, mezichladič stlačeného vzduchu,

## **ABSTRACT**

The object of this thesis was Proposal and Examination of Supercharging Alternatives of CI-engine with Exhaust Gas Recirculation according required engine power parameters. This goal was meet by use of Turbocharger with Variable Nozzles and Air-Air intercooler.

### **Key words**

Supercharging, Compression Ignition Engine, Diesel Engine, Turbocharger, Variable Nozzle Turbine, Exhaust Gas Recirculation, EGR ventil, intercooler.



DIPLOMOVÁ PRÁCE





### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PRÁŠEK, O. *Návrh a posouzení alternativ přepřínování vznětového motoru s recirkulací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Vedoucí diplomové práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.



DIPLOMOVÁ PRÁCE



### **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **NÁVRH A POSOUZENÍ ALTERNATIV PŘEPLŇOVÁNÍ VZNĚTOVÉHO MOTORU S RECIRKULACÍ** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

**V Brně 9.10.2008**

**Ondřej Prášek**



DIPLOMOVÁ PRÁCE



| <b>OBSAH</b>                                              | <b>str</b> |
|-----------------------------------------------------------|------------|
| Zadání                                                    | 3          |
| Licenční smlouva                                          | 5          |
| Abstrakt                                                  | 7          |
| Bibliografická citace                                     | 9          |
| Prohlášení                                                | 11         |
| Obsah                                                     | 13         |
| 1. Úvod                                                   | 15         |
| 1.1 Rozdělení a způsoby přeplňování                       | 16         |
| 1.2 Přeplňování turbodmychadlem                           | 19         |
| 1.3 Chlazení plnicího vzduchu                             | 27         |
| 1.4 Emise výfukových plynů a úprava emisí NO <sub>x</sub> | 28         |
| 2. Předběžný výpočet                                      | 31         |
| 3. Volba koncepce přeplňování                             | 43         |
| 4. Výpočet oběhu a stanovení parametrů přeplňování        | 47         |
| 5. Grafické zobrazení tepelného oběhu                     | 67         |
| 6. Spolupráce kompresoru, motoru a turbíny                | 75         |
| 7. Závěr                                                  | 87         |
| 8. Seznam použité literatury                              | 89         |
| 9. Seznam použitých zkratek a symbolů                     | 91         |
| 10. Přílohy                                               | 99         |



DIPLOMOVÁ PRÁCE





## 1 ÚVOD

**Proč přeplňovat?** Ačkoliv je přeplňování spalovacích motorů věcí už poměrně dlouho známou, k masivnímu nasazení a používání ve vozidlových motorech dochází teprve v posledních několika letech a troufám si tvrdit, že velkou budoucnost má tato technologie ještě pořád před sebou.

O co se tedy při přeplňování jedná? Jak je obecně známo, k pohonu spalovacího motoru je využíváno tepelné energie obsažené v palivu, která je uvolněná hořením a následně převedena na mechanickou práci. K tomuto transferu se používá zejména klikového mechanismu. Z toho je tedy zřejmé, že parametrem důležitým pro výkon motoru je množství spáleného paliva za jednotku času. K efektivnímu spalování paliva v prostoru válce je však také potřeba dostatek kyslíku ze vzduchu (u benzínových motorů se jedná přibližně o 14,5kg vzduchu na 1kg paliva a u motorové nafty o 14,3). Množství vzduchu a tím i množství paliva je možno měnit zejména změnou zdvihového objemu válce, resp. celého spalovacího motoru. Avšak další z možností jak dostat do spalovacího prostoru více vzduchu je změna hustoty nasávaného vzduchu, kdy je do motoru nasáván vzduch o hustotě vyšší než je hustota při atmosférickém tlaku.

Účelem přeplňování, je pak právě zvýšení množství vzduchu a tím i dodávky paliva do spalovacího prostoru za jednotku času. Výsledkem je vyšší maximální výkon spolu s výhodnějším průběhem točivého momentu než u objemově srovnatelných motorů nepřeplňovaných, resp. dosažení obdobných parametrů výkonu z menšího zdvihového objemu v porovnání s motorem nepřeplňovaným. Hlavními pozitivními přínosy přeplňování jsou vedle úspory materiálu i zmenšení zástavbového prostoru, snížení výkonové hmotnosti a také výrazné snížení měrné spotřeby paliva.

## 1.1 ROZDĚLENÍ A ZPŮSOBY PŘEPLŇOVÁNÍ

### 1.1.1 Všeobecné rozdělení

**a) Mechanické** - kde dochází k odebírání výkonu k pohonu dmychadla přímo z klikového mechanismu motoru, odebírá se asi 10% efektivního výkonu spalovacího motoru a používá se do stlačení plnicího vzduchu  $\Pi_k = 1,6 - 1,8$

**b) Turbodmychadly** - zde je k pohonu dmychadla využito zbytkové energie výfukových plynů, z nichž získáme energii expanzí na turbíně.

**c) Kombinované** - mechanické i turbodmychadly.

**d) Inerční** - kde se využívá dynamických jevů v plnicím a výfukovém traktu a je možno dosáhnout zvýšení efektivního výkonu až o 30%.

**e) Náporové** – zde se dosahuje zvýšení tlaku za pomoci dynamické složky tlaku vzniklé při jízdě prouděním vzduchu.

### Podle přeplňovaného motoru

**a)** Přeplňování čtyřdobých motorů vznětových

**b)** Přeplňování dvoudobých motorů vznětových (zde se jedná zejména o motory stacionární a lodní o velkých výkonech).

**c)** Čtyřdobé motory zážehové

### Podle hodnoty stlačení plnicího vzduchu

**a)** Nízkotlaké,  $\Pi_k$  do 1,5. Zvýšení efektivního výkonu až o 30%

**b)** Středotlaké,  $\Pi_k = 1,6 - 2$ . Zvýšení  $P_e$  až o 50%

**c)** Vysokotlaké,  $\Pi_k = 2,1 - 3,5$ . Zvýšení  $P_e$  až o 100%

**d)** Zvláště vysokotlaké,  $\Pi_k = 3,6 - 6$ . Zvýšení  $P_e$  až o 400%

### 1.1.2 Podle konstrukce dmyhadla

#### Objemová dmyhadla

##### Pístová dmyhadla

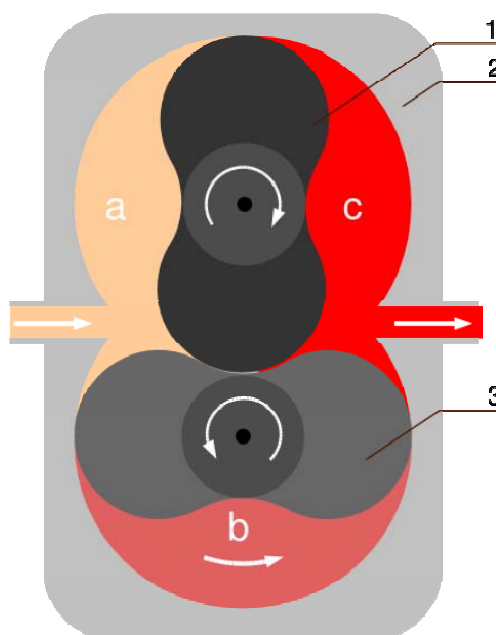
Pístová dmyhadla s klikovým mechanismem se používají zejména pro přepínání velkých stacionárních motorů. Často se používají pístová dmyhadla dvojčinná

##### Lamelová dmyhadla

Má jedno nebo více lamel uložených v rotoru dmyhadla, které je excentrické, nebo excentricky uloženo. Podle toho jsou lamely buď pevně uloženy v rotoru a nebo jsou výsuvné.

##### Dmyhadla s rotujícími písty

Dva ozubenými koly vzájemně svázané písty se vůči sobě otáčejí tak, že jsou neustále vzájemně utěsněny a dochází k vytlačování vzduchu. Patří sem dmyhadlo Rootsovo, dmyhadla troj a čtyřzubová, wankelovo dmyhadlo a dmyhadlo Pierburg.



Rootsovo dmyhadlo

### **Šroubová dmychadla**

Vzduch je vytlačován axiálním posuvem při otáčení dvou rotorů se šroubovicemi, které jsou spolu svázány ozubenými koly se stejným, ale i různým převodovým poměrem v případě, že mají různý počet drážek. Patří sem dmychadla Lysholm a Sprintex.

### **Spirální výtlačné dmychadlo(G dmychadlo)**

Ve dvoudílné skříni dmychadla jsou na každé straně dvě spirálovité přepážky. Uvnitř této nepohyblivé skříně je výtlačný díl dmychadla, jenž má rovněž na obou stranách po dvou spirálovitých přepážkách zapadajících do mezer mezi přepážkami skříně. Výtlačný díl vykonává krouživý pohyb, ale neotáčí se. Mezi pevnými a pohybujícími se přepážkami na obou stranách vznikají čtyři pracovní komory, plynule "putující" ke středu dmychadla.

### **Proudová dmychadla**

Jedná se o lopátkové stroje, které ke stlačení plynu využívají kinetické energie proudu plynu. Podle proudění plynu ve stroji je dělíme na:

**Axiální** – Vzduch vstupuje i vystupuje z dmychadla vždy rovnoběžně s osou otáčení dmychadla. Dosahují nejmenších stlačení a největších hmotnostních toků. V automobilovém průmyslu se nepoužívají.

**Diagonální** - Vzduch vstupuje do dmychadla rovnoběžně s osou otáčení a vystupuje pod úhlem menším než  $90^\circ$ . Stlačení je větší než u dmychadel axiálních.

**Radiální** – Vstup do dmychadla rovnoběžný s osou otáčení a výstup pod úhlem  $90^\circ$ . Tyto kompresory dosahují největšího stlačení, ale zároveň nejmenšího hmotnostního toku vzduchu. Pro automobilový průmysl nejvýhodnější.

Radiální dmychadla můžeme dále rozdělit podle tvaru lopatek na:



S lopatkami zahnutými dopředu – úhel relativní rychlosti na výstupu je větší než  $90^\circ$ . Dochází zde k nejmenšímu stlačení a k největší rychlosti proudu vzduchu

S lopatkami radiálními – úhel relativní rychlosti je roven  $90^\circ$ . Nižší ztráty a vyšší stlačení než u předchozích.

S lopatkami zahnutými dozadu – úhel relativní rychlosti menší než  $90^\circ$ , nejvyšší účinnost při největším stlačení, tedy nejvhodnější pro využití pro přeplňování v automobilovém průmyslu.

## 1.2 PŘEPLŇOVÁNÍ TURBODMYCHADLEM

### 1.2.1 Spolupráce kompresoru motoru a turbodmychadla

Princip přeplňování turbodmychadlem spočívá na vzájemné pneumatické vazbě mezi kompresorem dodávajícím vzduch o vyšší hustotě do motoru, kde dochází ke spalování paliva a následné expanzi výfukových plynů na turbíně která je na společném hřídeli s kompresorem, který pohání.

Při vzájemné spolupráci těchto zařízení musí platit:

- a) Kompresor dmychadla musí vyvinout stlačení plnicího vzduchu takové, aby bylo dosaženo požadovaného středního efektivního tlaku na píst  $p_e$ .
- b) Příkon dmychadla spolu se ztrátami musí být kryt výkonem turbíny .
- c) Rovnice kontinuity v soustavě. Hmotnostní tok turbínou je dán součtem hmotnostního toku vzduchu procházejícím kompresorem a hmotnostního toku paliva přiváděného do motoru.

### 1.2.2 Provoz turbíny

Turbína může být provozována ve dvou různých režimech. To podle toho, jestli přivádíme energii na turbínu ve formě tlakových a teplotních pulzů, nebo s přibližně konstantním tlakem a teplotou.

#### Impulzní provoz turbíny

Cílem tohoto provozu turbíny je využít tlakových a teplotních impulzů vyvolaných postupným otevíráním výfukových ventilů u jednotlivých

válců. Abychom toho docílili, musíme dodržet některé zásady. Výfukové potrubí musíme navrhnout tak, aby mělo co nejmenší průřez a co nejkratší délku. Dále musíme zamezit vzájemné interferenci impulzů mezi jednotlivými válci. Z toho důvodu se smí do jedné větve zapojovat maximálně tři válce a rozestup jednotlivých výfukových cyklů v jedné sekci musí být roven nebo větší než  $240^\circ$  natočení klikového hřídele motoru. Tento způsob provozu je vhodný zejména u vozidlových motorů, kde dochází k rychlejšímu nárůstu tlaku ve výfukovém potrubí při akceleraci.

### **Rovnotlaký provoz turbíny**

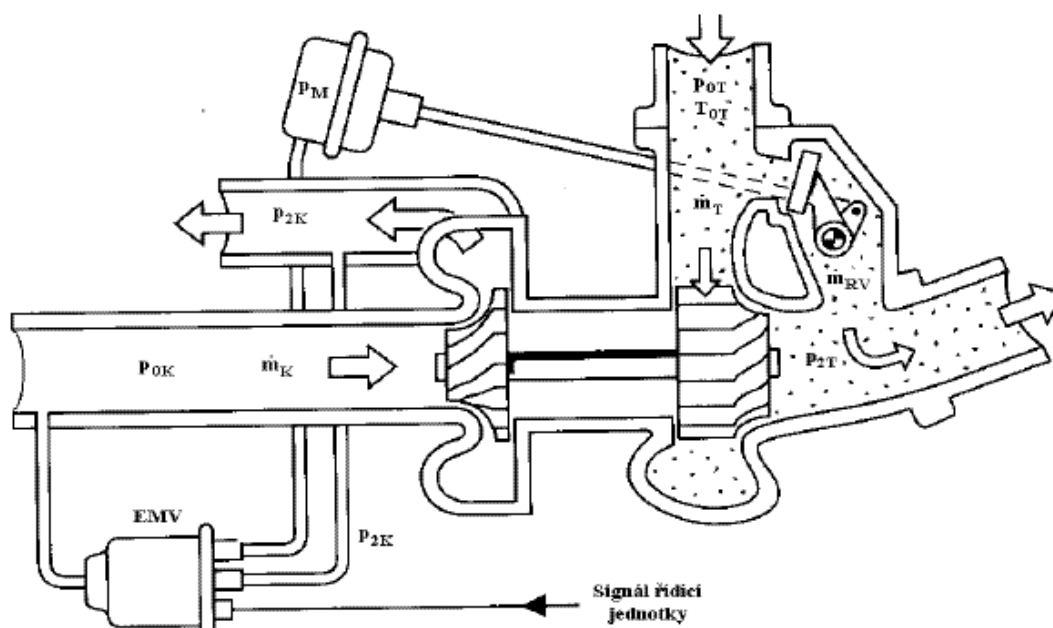
Rovnotlakého provozu turbíny se dosáhne tím, že se všechny válce svedou do jednoho potrubí o dostatečném objemu. Díky vzájemné interferenci výfukových cyklů se hodnota tlaku ustálí na určité střední hodnotě teploty a tlaku. Přestože při provozu nedochází ke kolísání účinnosti na turbíně jako u impulsního provozu, je tento způsob provozu méně hospodárný. Používá se zejména u velkých a stacionárních motorů s malou časovou změnou otáček.

### **1.2.3 Regulace plnicího tlaku**

Zejména u vozidlových motorů je kladen vysoký požadavek na schopnost efektivně pracovat v širokém rozsahu otáček a ne jen v těch nejvyšších. Od moderního agregátu požadujeme vysoký krouticí moment od co nejnižších otáček a maximální momentovou pružnost pro dobrou akceleraci vozidla. Právě z tohoto důvodu se používá regulace provozu turbodmychadla.

## Odpouštění výfukových plynů před turbínou (waste gate)

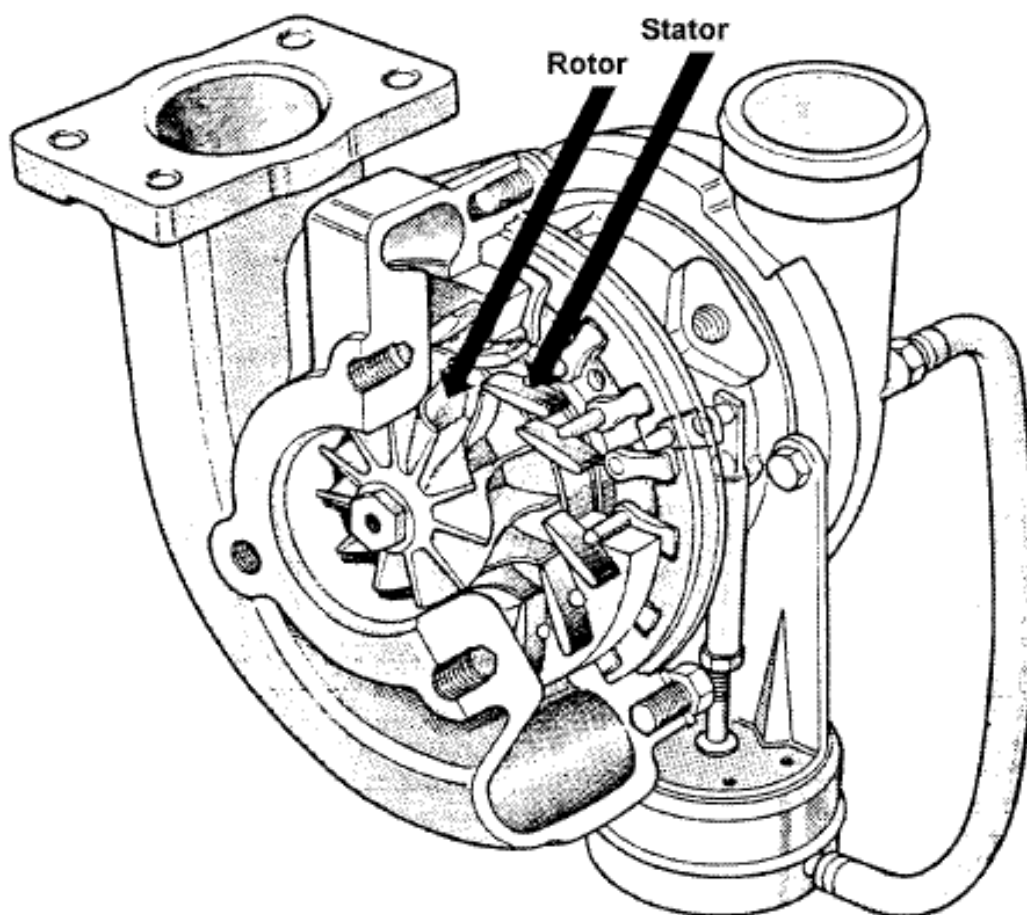
Regulace tímto způsobem funguje tak, že při dosažení požadovaného tlaku za kompresorem se začne otevírat přepouštěcí ventil před turbínou a část spalin se žene obtokem kolem turbíny do výfukového potrubí. Je to řešeno pomocí elektromagnetického ventilu snímajícího tlak za kompresorem a membránou, jejíž vychýlení řídí otevření přepouštěcího ventilu. Při tomto způsobu regulace se navrhuje malé turbodmychadlo pro plnění do otáček maximálního kroutícího momentu. Po překročení meze maximálního kroutícího momentu dojde k otevření přepouštěcího ventilu.



Regulace odpouštěním výfukových plynů

### Natáčením lopatek statoru turbíny (VNT)

Při tomto způsobu regulace prochází turbínou neustále plný hmotnostní tok a regulace probíhá pomocí natáčení lopatek rozváděcího kola, čímž zmenšujeme výstupní průřez ze statoru. Se změnou průřezu pak dochází ke změně úhlu a absolutní rychlosti proudu do rotoru, přestože průtočná plocha v rotoru zůstává stále stejná. K regulaci se tedy používá změny rychlostního trojúhelníku na vstupu do rotoru. Turbodmychadlo se navrhuje na maximální hmotnostní tok. K natáčení dochází buď za pomoci elektromagnetického ventilu, nebo aktuátoru.

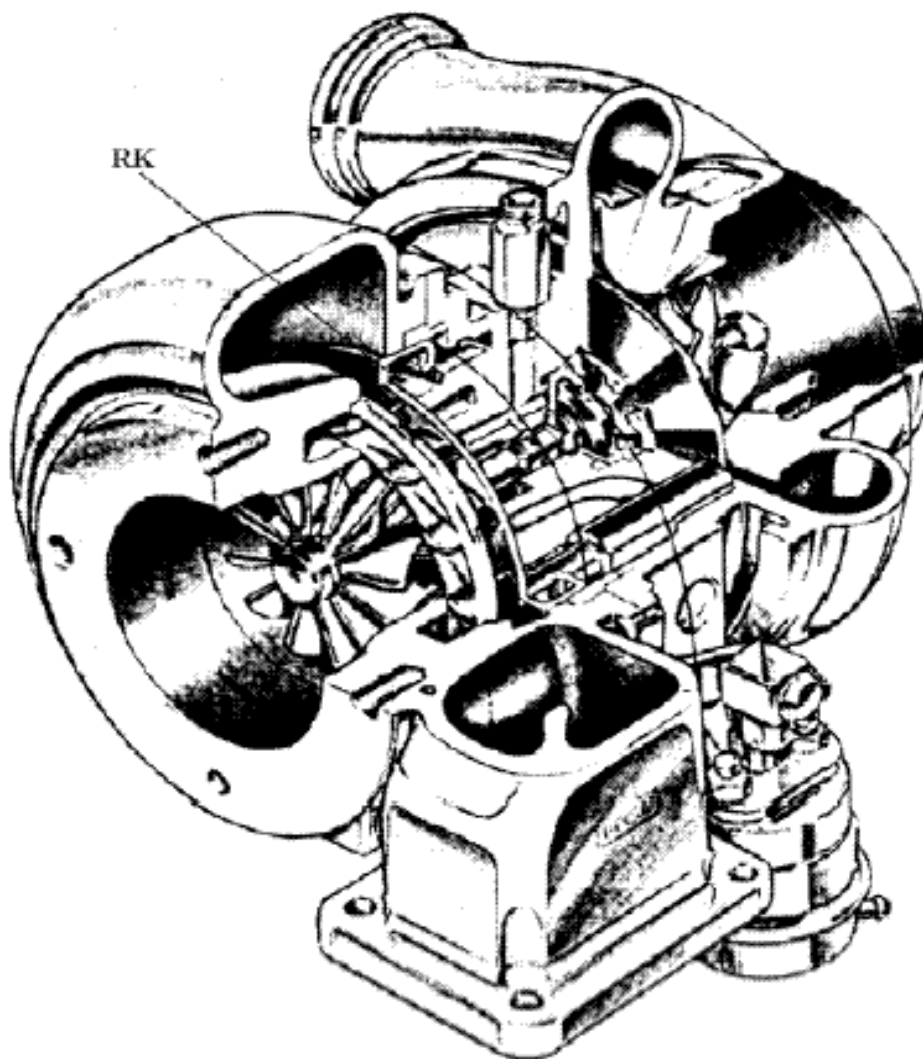


Natáčení lopatek statoru turbíny



### Změnou šířky statoru turbíny

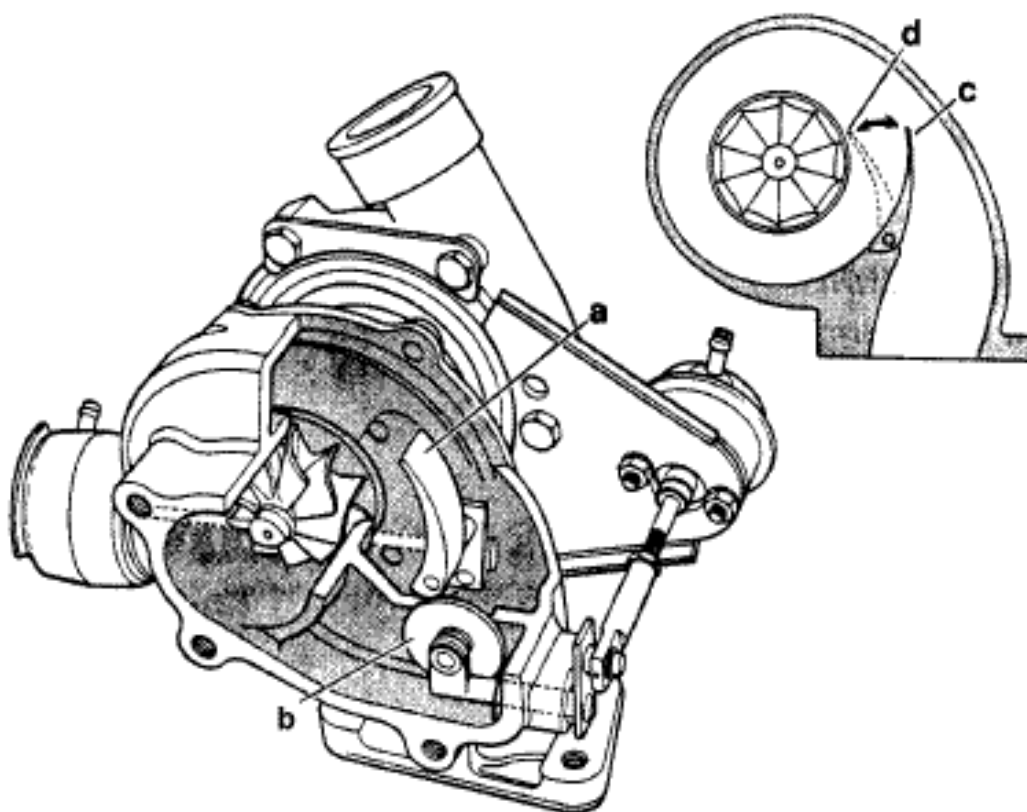
Při tomto způsobu regulace opět prochází turbínou plný hmotnostní tok spalin a turbína je navržena na plný hmotnostní tok. Regulace zde probíhá zúžením šířky statoru, kdy nedochází ke změně směru výstupního vektoru rychlosti ze statoru, ale jen ke zvýšení rychlosti. Vzhledem k tomu že zde dochází k posunu celého rozváděcího kola s lopatkami, není zde možné použít membránové jednotky ovládané tlakem za kompresorem, ale je použito pístové jednotky poháněné z brzdového systému vozidla.



Změna šířky statoru

## Kombinovaná regulace plnicího tlaku

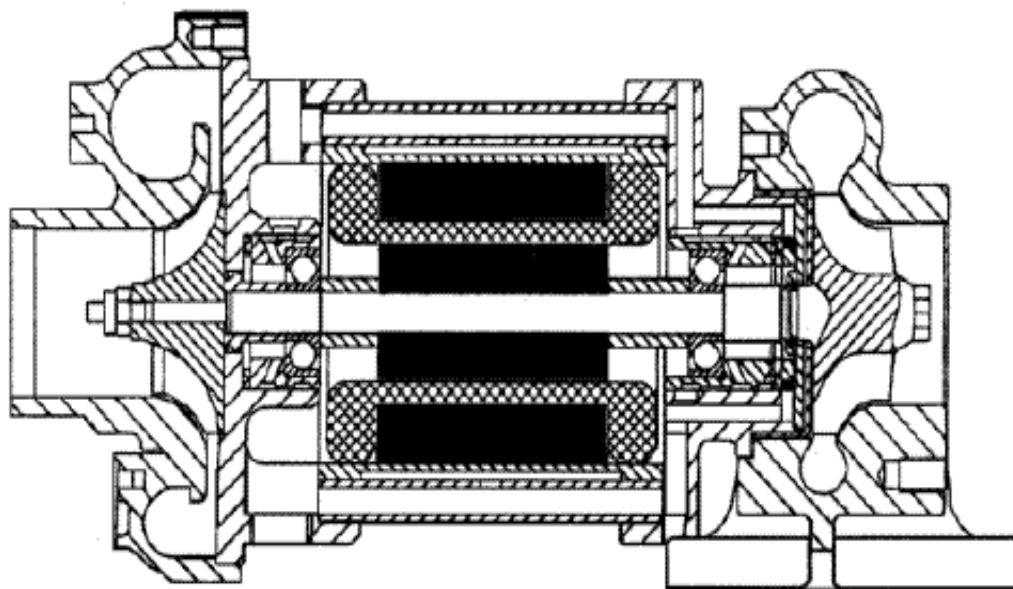
Při tomto způsobu regulace se vychází ze systému s přepouštěcí klapkou, která je dále doplněna klapkou směrovou, která upravuje proudění v bezlopatkové rozváděcí skříni. Dochází tak k příznivějším stavům plynu před turbínou než v případě samotného přepouštění. Tato varianta existuje též v jednodušší verzi pouze s klapkou směrovou pro úpravu rychlostního trojúhelníku vzduchu na vstupu do rotoru.



Kombinovaná regulace

### Podporou elektrického pohonu

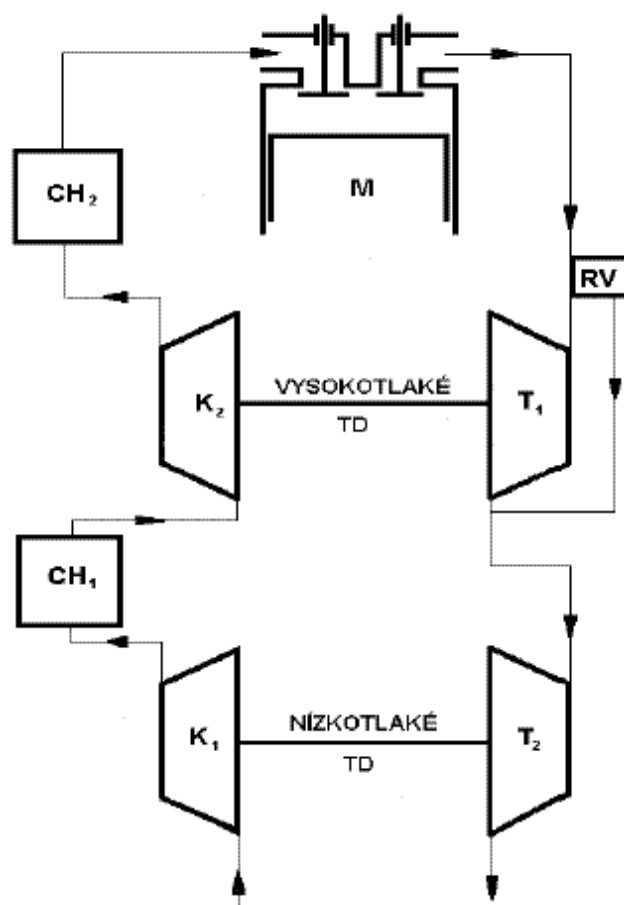
Turbodmychadlo s elektrickým pohonem se používá pro zvýšení schopnosti akcelerace a eliminace tzv. turbo efektu, neboli prodlevy plnění. U tohoto turbodmychadla je použito elektromotoru k okamžitému roztočení turbodmychadla, kdy elektromotor odebírá energii z baterie. Vzhledem k vysokému odběru až 1,8 kW je zapotřebí speciální baterie a dále je potřeba baterii za provozu při konstantních rychlostech (např. na dálnici) zpětně dobíjet.



S elektrickým pohonem

## Dvoustupňové regulované přepřňování

Pro vysokotlaké přepřňování bylo vyvinuto dvoustupňového přepřňování za pomoci dvou sériově zapojených turbodmychadel. První turbodmychadlo (blíže k motoru) je menší vysokotlaké, za kterým následuje turbodmychadlo větší nízkotlaké. Při nízkých otáčkách prochází všechny spaliny oběma turbínami, ale se zvyšujícím se hmotnostním tokem by došlo k přetížení vysokotlaké turbíny a tak je část spalin vedena obtokem na turbodmychadlo nízkotlaké. Plnicí vzduch proudící do motoru opět proudí skrz obě dmychadla a za oběma je nasazen mezichladič pro ochlazení plnicí směsi. Díky tomuto systému je možno dosáhnout téměř konstantního středního efektivního tlaku v širokém rozsahu otáček a dosahuje se poměrně vysoké hodnoty přebytku vzduchu  $\lambda=1,9$  a tím pádem nízké kouřivosti.



Dvoustupňové přepřňování



### 1.3 CHLAZENÍ PLNÍCÍHO VZDUCHU

Chlazení plnicího vzduchu se používá k dalšímu zlepšení parametrů přeplňování. Mezi výhody patří:

- zvýšení hustoty plnicího vzduchu
- zvýšení výkonu motoru
- snížení teploty cyklu, což snižuje jeho namáhání a následné namáhání turbíny
- snížení emisí oxidů dusíku
- snížení měrné spotřeby

Mezi nevýhody je možno zařadit:

- navýšení ceny motoru
- zvětšení zástavbových rozměrů motoru
- tlaková ztráta v chladiči.

#### **Chlazení vzduch-vzduch**

Plnicí vzduch je veden do chladiče umístěného před chladičem vody oběhu motoru. Před chladičem je dále umístěn axiální ventilátor, který žene vzduch na hliníkový chladič. Tento způsob je účinnější na ochlazení než chladič vzduch – voda, ale je náročnější na zástavbové rozměry a jsou zde větší tlakové ztráty v chladiči.

#### **Chlazení vzduch-voda**

Chladičem prochází chladicí voda z chladicího oběhu motoru. Voda je však poměrně vysoké teploty a tak nedochází k tak vysokému zchlazení..



## 1.4 EMISE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ, ÚPRAVA NO<sub>x</sub>

Vzhledem k prudkému nárůstu silniční dopravy vzrostlo i zatížení životního prostředí škodlivinami ve výfukových plynech. Zejména se jedná o CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC. Emise CO jsou velmi jedovaté. Vznikají zejména při tzv. bohaté směsi tj  $\lambda < 1$ . Emise CO<sub>2</sub> pro změnu přispívají ke skleníkovému efektu. Jejich snížení můžeme dosáhnout téměř výhradně snížením spotřeby paliva. Dalšími škodlivými látkami při spalování jsou volné zbytkové uhlovodíky a popílek. K redukci emisí se v současné době používá třicestných katalyzátorů, Filtrů pevných částic u dieslových motorů a úprav spalovacích procesů. Posledním významné škodliviny z pohledu mé diplomové práce jsou pak emise NO<sub>x</sub>. Vznikají jako následek vysokých spalovacích teplot a koncentrací kyslíku. Emise NO<sub>x</sub> můžeme ovlivňovat následujícími způsoby.

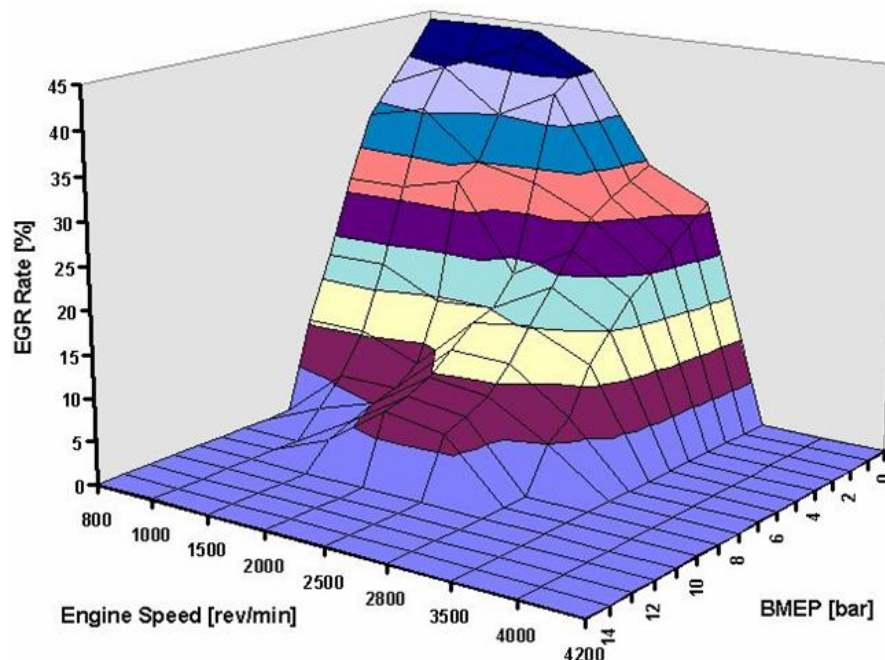
### Úpravou spalovacího procesu

Úpravou spalovacího procesu se rozumí úprava počátku vstřiku, průběh vstřiku a rozprášení paliva. Pozdní vstřikování paliva snižuje emise NO<sub>x</sub> následkem nižší maximální teploty cyklu. Průběhem vstřiku se rozumí měnící se hmotnostní tok paliva, kdy prudké vstříknutí paliva hned na začátku by vedlo opět ke zvýšení emisí NO<sub>x</sub>. Jemné rozprášení paliva pak napomáhá snížení emisí HC a kouřivosti.

### EGR (Exhaust Gas Recirculation - recirkulace výfukových plynů)

U recirkulace spalín je do sacího potrubí nasávána část ochlazených spalín z výfukového potrubí, čímž se zmenšuje koncentrace kyslíku v nasávaném vzduchu. Kromě toho mají výfukové plyny vyšší měrnou tepelnou kapacitu než vzduch a podíl vody ve vracených výfukových plynech snižuje dodatečně teploty spalování.

Hodnota se mění podle otáček motoru a zatížení a může dosahovat při nízkém zatížení až 40%.

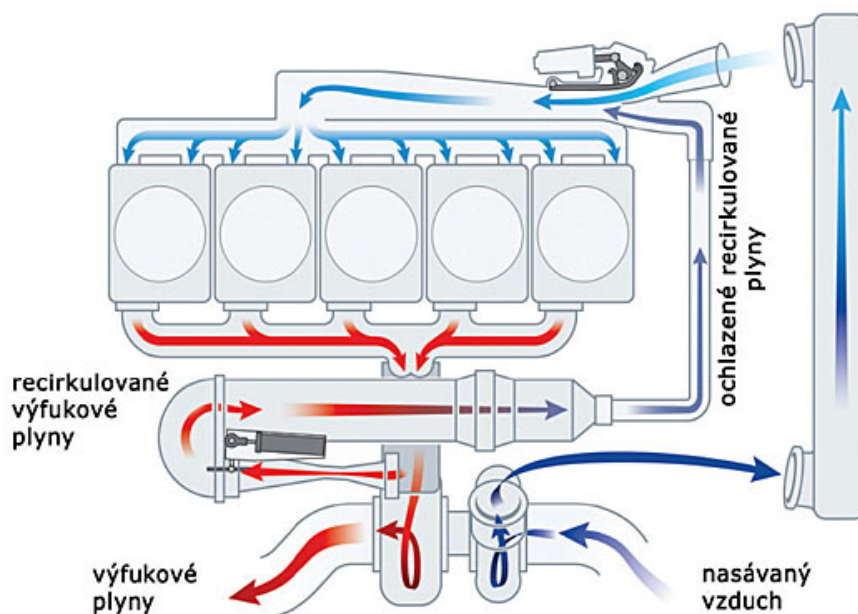


Ukázka % recirkulace pro motor splňující normu EURO 3

**Short route EGR** – Je to varianta kdy se výfukové plyny přepouští a prostoru před turbínou do prostoru za mezichladič stlačeného vzduchu za kompresorem. Mezi výhody patří, že není potřeba nijak upravovat kompresorové kolo z hlediska agresivních materiálu spalin. Mezi nevýhody pak zejména potřeba pozitivního tlakového spádu mezi prostorem před turbínou a za mezichladičem plnicího vzduchu.

**Long route EGR** – Zde dochází k recirkulace až po výstupu z turbíny a spaliny jsou přepouštěny do prostoru před kompresor. Odpadá problém s pozitivním tlakovým spádem, ale dochází ke značnému znečištění kompresoru od sazí a k oxidaci hliníkových kol které se tedy musí nahradit nerezovými.

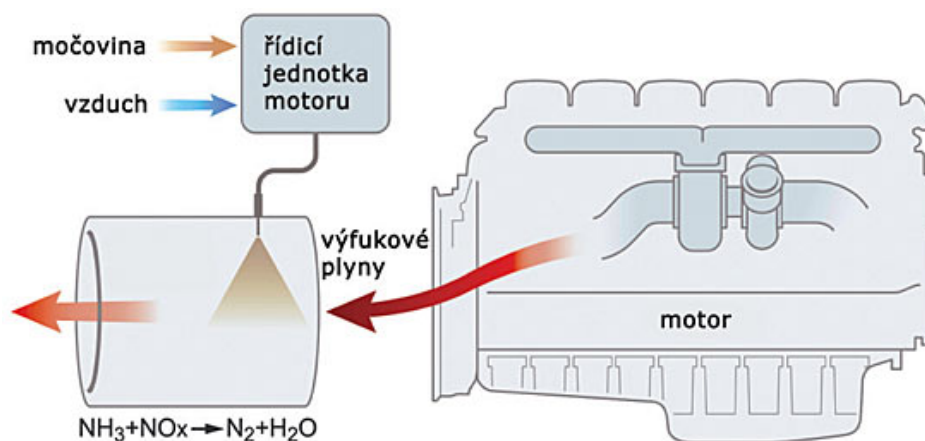




Princip short route EGR

### SCR (Selective Catalytic Reduction - selektivní katalytická redukce)

SCR je metoda dodatečné úpravy výfukových plynů, využívající ke snižování emisí AdBlue - aditivum na bázi močoviny. Při tankování vozidla tak je zapotřebí doplnit do zvláštní nádrže také aditivum. AdBlue se vstřikuje do výfukového potrubí za účelem zachování redukční funkce katalyzátoru. Technologie SCR je efektivní při vysoké zátěži motoru a vysoké celkové hmotnosti soupravy. Celkové provozní náklady včetně aditiv AdBlue jsou srovnatelné s motory Euro 3.



Princip SCR





## 2. PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET

### Zadané parametry

| označení    | rozměr  | jednotka          | název                                |
|-------------|---------|-------------------|--------------------------------------|
| $i$         | 4       | -                 | počet válců                          |
| $\tau$      | 2       | -                 | taktnost motoru                      |
| $V$         | 4,156   | dm <sup>3</sup>   | zdvihový objem                       |
| $D$         | 105,00  | mm                | vrtání                               |
| $H$         | 120,00  | mm                | zdvih                                |
| $M_{k1000}$ | 480,00  | Nm                | kroutící moment v 1000 ot/min        |
| $M_t$       | 40,00   | %                 | převýšení kr.momentu při 1480 ot/min |
| $n_{2200}$  | 2200,00 | min <sup>-1</sup> | maximální otáčky                     |
| $P_{2200}$  | 100,00  | kW                | výkon při $n_{\max} = 2200$ ot/min   |

### Výkonové charakteristiky při zadaných režimech.

$$P = M_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60 \cdot 1000}$$

| $n$   | ot·min <sup>-1</sup> | 1000   | 1480   | 2200   |
|-------|----------------------|--------|--------|--------|
| $M_k$ | Nm                   | 480,00 | 672,00 | 434,06 |
| $P$   | kW                   | 50,27  | 104,15 | 100    |

### Střední efektivní tlak na píst a střední pístová rychlost.

$$p_e = \frac{P_e \cdot \tau}{V \cdot n} \quad c_s = 2 \cdot n \cdot H$$

| $n$    | ot·min <sup>-1</sup> | 1000  | 1480   | 2200  |
|--------|----------------------|-------|--------|-------|
| $P_e$  | kW                   | 50,27 | 104,15 | 100   |
| $\tau$ | -                    | 2     |        |       |
| $H$    | mm                   | 120   |        |       |
| $V$    | dm <sup>3</sup>      | 4,156 |        |       |
| $p_e$  | MPa                  | 1,451 | 2,032  | 1,312 |
| $c_s$  | m·s <sup>-1</sup>    | 4     | 5,92   | 8,8   |



### Výpočet hustoty plnicího vzduchu

$$\rho_s = \frac{60}{V_z} \cdot \frac{\lambda \cdot L_t}{H_u} \cdot \frac{\tau}{n} \cdot \frac{P_e}{\eta_{pl} \cdot \eta_i \cdot \eta_m} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + (\alpha - 1)}$$

Znamé parametry:

| označení      | rozměr | jednotka                           | název                              |
|---------------|--------|------------------------------------|------------------------------------|
| $L_t$         | 14,3   | $\text{kg} \cdot \text{kg}_P^{-1}$ | hm. vzduchu pro spálení 1kg paliva |
| $H_u$         | 42 500 | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$   | spodní výhřevnost paliva           |
| $T$           | 2      | -                                  | Taktnost motoru                    |
| $\varepsilon$ | 16     | -                                  | kompresní poměr                    |

### Určení efektivní účinnosti motoru

Efektivní účinnost je dána součinem účinnosti indikované s účinností mechanickou. Její hodnota se dá spočítat z měrné spotřeby paliva změřené na obdobném motoru společnosti Zetor.

$$m_{pe} = \frac{3600 \cdot 1000}{H_u \cdot \eta_i \cdot \eta_m} \Rightarrow \eta_i \cdot \eta_m = \eta_e = \frac{3600 \cdot 1000}{H_u \cdot m_{pe}}$$

|          |                                                     |        |        |         |
|----------|-----------------------------------------------------|--------|--------|---------|
| $n$      | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$                   | 1000   | 1480   | 2200    |
| $m_{pe}$ | $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ | 230    | 215    | 245,000 |
| $H_u$    | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$                    | 42 500 | 42 500 | 42 500  |
| $\eta_e$ | -                                                   | 0,368  | 0,394  | 0,346   |

### Určení součinitele přebytku vzduchu $\lambda$

Součinitel přebytku vzduchu volím podle obdobných motorů s přihlédnutím k maximální kouřivosti a emisím ostatních spalín.

|           |                                   |      |      |      |
|-----------|-----------------------------------|------|------|------|
| $n$       | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ | 1000 | 1480 | 2200 |
| $\lambda$ | -                                 | 1,4  | 1,4  | 1,4  |

## Určení plnicí účinnosti

Plnicí účinnost volím podle literatury a podle obdobných motorů.

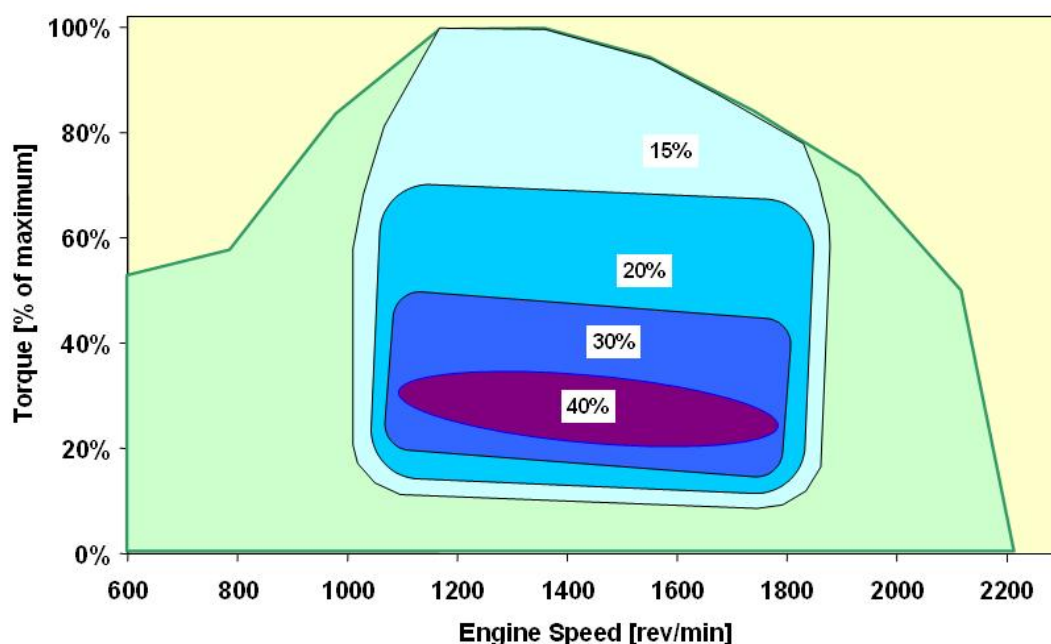
| n           | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|-------------|----------------------|------|------|------|
| $\eta_{pl}$ | -                    | 0,88 | 0,9  | 0,89 |

## Určení stupně vypláchnutí spalovacího prostoru

Hodnota stupně vypláchnutí může být v rozmezí 0 až 1. Hodnotu je možno jen předpokládat. Je možno vycházet z hodnoty součinitele propláchnutí  $\phi_{pr}$ . Vzhledem k tomu, že hodnotě  $\phi_{pr} = 1$  odpovídá hodnota  $\alpha = 0$  a hodnotě  $\phi_{pr} = 1,5$  hodnota  $\alpha = 1$  a závislost těchto dvou veličin se předpokládá lineární. Vzhledem k součiniteli propláchnutí  $\phi_{pr}=1,02$  položím hodnotu  $\alpha = 0,04$ .

## Volba hodnoty recirkulace spalin EGR

Podle informací získaných z podobných motorů a zkušeností jiných výrobců je zvolena nejvyšší hodnota recirkulace při plném zatížení v otáčkách s nejvyšším kroutícím momentem a v ostatních režimech klesá. Ukázka možných hodnot recirkulace v různých režimech a různých zatíženích je na přiloženém obrázku.



**Zvolené hodnoty recirkulace:**

| n   | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|-----|----------------------|------|------|------|
| EGR | %                    | 7    | 15   | 10   |

**Upravená plnicí účinnost s EGR**

Aby se projevila plnicí účinnost ve výpočtu potřebné hustoty vzduchu, musíme podle toho upravit vstup do rovnice. Pomůžeme si tím, že podle hodnoty recirkulace uplavíme plnicí účinnost.

$$\eta_{plEGR} = \eta_{pl} \cdot \left(100 - \frac{EGR}{100}\right)$$

Ted' když jsou známy všechny parametry můžu vypočítat potřebnou hustotu plnicího vzduchu.

$$\rho_s = \frac{60}{V} \cdot \frac{\lambda \cdot L_t}{H_u} \cdot \frac{\tau}{n_M} \cdot \frac{P}{\eta_{plEGR} \cdot \eta_e} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + (\alpha - 1)}$$

| n                  | ot·min <sup>-1</sup>                           | 1000     | 1480   | 2200     |
|--------------------|------------------------------------------------|----------|--------|----------|
| EGR                | %                                              | 7        | 15     | 10       |
| λ <sub>opt</sub>   | -                                              | 1,4      | 1,4    | 1,4      |
| H <sub>u</sub>     | kJ·kg <sup>-1</sup>                            | 42 500   |        |          |
| L <sub>t</sub>     | kg <sub>L</sub> ·kg <sub>P</sub> <sup>-1</sup> | 14,3     |        |          |
| τ                  | -                                              | 2        |        |          |
| V <sub>z</sub>     | m <sup>3</sup>                                 | 0,004156 |        |          |
| P                  | kW·m <sup>-3</sup>                             | 50,27    | 104,15 | 100,0000 |
| η <sub>pl</sub>    | -                                              | 0,88     | 0,9    | 0,89     |
| η <sub>plEGR</sub> | -                                              | 0,8184   | 0,765  | 0,801    |
| η <sub>e</sub>     | -                                              | 0,368    | 0,394  | 0,346    |
| ε                  | -                                              | 16       |        |          |
| α                  | -                                              | 0,04     |        |          |
| ρ <sub>s</sub>     | kg·m <sup>-3</sup>                             | 2,3015   | 3,1673 | 2,2518   |

### Určení tlaku plnicího vzduchu a teploty za mezichladičem.

Po výpočtu hustoty plnicího vzduchu musíme vypočítat potřebný tlak plnicího vzduchu, abychom mohli navrhnout stlačení v kompresoru. Potřebný plnicí tlak významně ovlivňuje mezichlazení plnicího vzduchu, protože při snížení teploty dochází ke zvýšení hustoty plnicího vzduchu při stejném objemu. Vzhledem k poměrně vysokému stupni plnění budu navrhnout účinnější chlazení vzduch-vzduch. Mezichladič bude umístěn před chladičem chladící vody oběhu motoru a bude poháněn ventilátorem. Teplotu okolí a tím pádem i teplotu chladícího vzduchu volím 20 °C. Výpočet byl proveden iterační metodou, kdy se zvolila hodnota  $p_{k2}$  a následně se vypočtená hodnota  $p_s$  znova dosazovala znova za tlak  $p_{k2}$  tak dlouho až se s požadovanou přesností srovnaly.

$$p_s = \rho_s \cdot r_s \cdot T_s = \rho_s \cdot r_s \cdot \left[ (1 - \eta_{ch}) \cdot T_{K1} \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{ks}} \left[ \left( \frac{p_{k2}}{p_{k1}} \right)^{\frac{(\kappa_s - 1)}{\kappa_s}} - 1 \right] \right\} + \eta_{ch} \cdot T_{w1} \right]$$

|             |            |                                     |                                     |
|-------------|------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $r_s$       | 287,04     | J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> | plynová konstanta                   |
| $\eta_{ch}$ | dle režimu | -                                   | účinnost mezichladiče               |
| $T_{K1}$    | 20         | °C                                  | Okolní teplota                      |
| $\eta_{ks}$ | 0,7        | -                                   | izoentropické účinnost kompresoru   |
| $p_a$       | 0,1        | MPa                                 | Atmosferický tlak                   |
| $\kappa_s$  | 1,4        | -                                   | izoentropický koeficient pro vzduch |
| $T_{w1}$    | 20         | °C                                  | teplota chladícího vzduchu          |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|                                     |                                         |               |               |               |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>                            | <b>ot·min<sup>-1</sup></b>              | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b>ρ<sub>s</sub></b>                | <b>kg·m<sup>-3</sup></b>                | 2,3015        | 3,1673        | 2,2518        |
| <b>r<sub>s</sub></b>                | <b>J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup></b> | 287,04        | 287,04        | 287,04        |
| <b>η<sub>ch</sub></b>               | -                                       | 0,90          | 0,85          | 0,80          |
| <b>T<sub>k1</sub></b>               | <b>°K</b>                               | 293,15        | 293,15        | 293,15        |
| <b>η<sub>ks</sub></b>               | -                                       | 0,70          | 0,70          | 0,70          |
| <b>p<sub>k2</sub>=p<sub>s</sub></b> | <b>MPa</b>                              | 0,2044        | 0,2868        | 0,2629        |
| <b>p<sub>a</sub></b>                | <b>Mpa</b>                              | 0,1000        | 0,1000        | 0,1000        |
| <b>Δp</b>                           | <b>MPa</b>                              | 0,004         | 0,005         | 0,006         |
| <b>p<sub>k1</sub></b>               | <b>MPa</b>                              | 0,096         | 0,095         | 0,094         |
| <b>K<sub>s</sub></b>                | -                                       | 1,4           | 1,4           | 1,4           |
| <b>T<sub>w1</sub></b>               | <b>°K</b>                               | 293,15        | 293,15        | 293,15        |
| <b>T<sub>s</sub></b>                | <b>°K</b>                               | <b>303,25</b> | <b>317,11</b> | <b>314,41</b> |
| <b>p<sub>s</sub></b>                | <b>MPa</b>                              | <b>0,2003</b> | <b>0,2883</b> | <b>0,2032</b> |

**Potřebné parametry kompresoru****Kompresní poměr**

Abychom dostali požadované stlačení kompresoru musíme hodnotu tlaku plnicího vzduchu navýšit ještě o hodnotu tlakové ztráty v chladiči plnicího vzduchu. Ztrátu uvažuji v rozmezí 1,5 až 3,5 kPa dle režimu.

|                       |                            |              |              |              |
|-----------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>n</b>              | <b>ot·min<sup>-1</sup></b> | 1000         | 1480         | 2200         |
| <b>Δp<sub>z</sub></b> | <b>MPa</b>                 | 0,0015       | 0,0025       | 0,0035       |
| <b>p<sub>k2</sub></b> | <b>Mpa</b>                 | 0,2018       | 0,2908       | 0,2067       |
| <b>Π<sub>c</sub></b>  | -                          | <b>2,102</b> | <b>3,061</b> | <b>2,199</b> |



### Hmotnostní tok vzduchu

Dalším důležitým parametrem pro provoz kompresoru je spolu s kompresním poměrem hmotnostní tok vzduchu. Oba parametry se vynášejí do kompresorové mapy k přesnějšímu určení izoentropické účinnosti kompresoru a otáček kompresoru a turbíny.

$$m_k = V_z \cdot \frac{n_m}{60 \cdot \tau} \cdot \rho_s \cdot \eta_{pl} \cdot \varphi_{pr} \cdot \frac{\varepsilon + (\alpha - 1)}{\varepsilon - 1}$$

| n              | ot/min             | 1000     | 1480   | 2200   |
|----------------|--------------------|----------|--------|--------|
| $V_z$          | m <sup>3</sup>     | 0,004156 |        |        |
| $\rho_s$       | kg·m <sup>-3</sup> | 2,3015   | 3,1673 | 2,2518 |
| $\eta_{pl}$    | -                  | 0,865    | 0,9    | 0,88   |
| $\varphi_{pr}$ | -                  | 1,02     |        |        |
| $\varepsilon$  | -                  | 16       |        |        |
| $\alpha$       | -                  | 0,04     |        |        |
| $m_k$          | kg·s <sup>-1</sup> | 0,0705   | 0,1494 | 0,1544 |

### Výpočet teploty na vstupu do motoru při použití EGR

Vzhledem k tomu, že teplota spalin je vyšší než teplota vzduchu jdoucí z mezichladiče, je potřeba spočítat teplotu po smísení jako vstupní hodnotu výpočtu tepelného oběhu motoru. Teplotu spalin volím dle zkušeností z jiných motorů 150 °C.

$$C_{Pcomb} = EGR \cdot C_{Pegr} + (1 - EGR) \cdot C_{Pair}$$

$$m_{engine} \cdot T_{eng} \cdot C_{pcomb} = m_{air} \cdot T_{air} \cdot C_{Pair} + m_{egr} \cdot T_{egr} \cdot C_{Pegr} \Rightarrow T_{eng}$$

$$T_{eng} = \frac{m_{air} \cdot T_{air} \cdot C_{Pair} + m_{egr} \cdot T_{egr} \cdot C_{Pegr}}{m_{eng} \cdot C_{Pcomb}}$$



|             |                                                  |               |               |               |
|-------------|--------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $n_m$       | ot/min                                           | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b>EGR</b>  | %                                                | 7,0000        | 15,0000       | 10,0000       |
| $m_{air}$   | -                                                | 0,9300        | 0,8500        | 0,9000        |
| $m_{EGR}$   | -                                                | 0,0700        | 0,1500        | 0,1000        |
| $C_{Ppair}$ | $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 1,005         |               |               |
| $C_{Pegr}$  | $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 1,330         |               |               |
| $C_{Pcomb}$ | $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ | 1,0138        | 1,0238        | 1,0175        |
| $T_{air}$   | K                                                | 303,2503      | 317,1058      | 314,4139      |
| $T_{egr}$   | K                                                | 423,15        |               |               |
| $T_{eng}$   | <b>K</b>                                         | <b>312,61</b> | <b>334,66</b> | <b>326,49</b> |

### Měrná energie pro stlačení 1kg vzduchu

$$W_{kc} = \frac{1}{\eta_{KS}} \cdot \frac{\kappa_s}{\kappa_s - 1} \cdot r_s \cdot T_{k1} \cdot \left( \Pi_c^{\frac{\kappa_s - 1}{\kappa_s}} - 1 \right)$$

|                            |                                                  |               |               |               |
|----------------------------|--------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>                   | ot/min                                           | 1000          | 1480          | 2200          |
| $\eta_{KS}$                | -                                                | 0,70          |               |               |
| $\kappa_s$                 | -                                                | 1,4000        |               |               |
| $r_s$                      | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  | 289,00        |               |               |
| $T_{k1}$                   | K                                                | 293,15        |               |               |
| $\Pi_c$                    | -                                                | 2,1024        | 3,0610        | 2,1992        |
| <b><math>W_{kc}</math></b> | <b><math>\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}</math></b> | <b>100,20</b> | <b>159,54</b> | <b>106,97</b> |

### Příkon dmyhadla

Příkon dmyhadla je dán součinem měrné energie a hmotnostím tokem vzduchu procházejícího kompresorem.

$$P_c = W_{kc} \cdot m_k$$





|                       |                     |               |                |                |
|-----------------------|---------------------|---------------|----------------|----------------|
| <b>n</b>              | ot/min              | 1000          | 1480           | 2200           |
| <b>W<sub>kc</sub></b> | kJ·kg <sup>-1</sup> | 100,20        | 159,54         | 106,97         |
| <b>m<sub>k</sub></b>  | kg/s                | 0,0705        | 0,1494         | 0,1544         |
| <b>P<sub>c</sub></b>  | <b>kW</b>           | <b>7,0653</b> | <b>23,8403</b> | <b>16,5181</b> |

### Návrh turbíny pro jednotlivé režimy.

#### Parametry výfukových plynů

|                       |                                     |             |                                    |
|-----------------------|-------------------------------------|-------------|------------------------------------|
| <b>r<sub>vp</sub></b> | J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> | <b>283</b>  | <b>plynová konstanta spalin</b>    |
| <b>K<sub>vp</sub></b> | -                                   | <b>1,32</b> | <b>adiabatický exponent spalin</b> |

#### Výpočet pomocné konstanty k<sub>1</sub>

$$k_1 = \frac{r_{vp}}{r_s} \cdot \frac{\kappa_s - 1}{\kappa_s} \cdot \frac{\kappa_{vp}}{\kappa_{vp} - 1} = 1,154$$

#### Celková účinnost turbodmychadla

|                        |   |             |                              |
|------------------------|---|-------------|------------------------------|
| <b>η<sub>TDC</sub></b> | - | <b>0,52</b> | <b>určeno dle literatury</b> |
|------------------------|---|-------------|------------------------------|

#### Teplota výfukových plynů

Teploty vyplývají z měření na obdobném motoru.

|                       |          |            |            |            |
|-----------------------|----------|------------|------------|------------|
| <b>n</b>              | ot/min   | 1000       | 1480       | 2200       |
| <b>T<sub>T1</sub></b> | <b>K</b> | <b>753</b> | <b>926</b> | <b>886</b> |

#### Impulsní a průtokový součinitel.

Volím dle literatury s ohledem k zapojení výfukového systému.

|          |   |             |                             |
|----------|---|-------------|-----------------------------|
| <b>β</b> | - | <b>1,1</b>  | <b>Impulzní součinitel</b>  |
| <b>μ</b> | - | <b>0,96</b> | <b>Průtokový součinitel</b> |

**Součinitel odporu**

$$\zeta = \frac{T_{T1}}{T_{k1}} \cdot \eta_{TDc} \cdot \beta$$

| n            | ot/min | 1000          | 1480          | 2200          |
|--------------|--------|---------------|---------------|---------------|
| $T_{T1}$     | K      | 753           | 926           | 886           |
| $T_{k1}$     | K      | 293,15        | 293,15        | 293,15        |
| $\eta_{TDc}$ | -      | 0,52          |               |               |
| $\beta$      | -      | 1,1           |               |               |
| $\zeta$      | -      | <b>1,4693</b> | <b>1,8068</b> | <b>1,7288</b> |

**Časová spotřeba paliva**

$$M_p = m_{pe} \cdot P_e$$

| n        | ot/min                                              | 1000          | 1480          | 2200          |
|----------|-----------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $m_{pe}$ | $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ | 230,000       | 215,000       | 245,000       |
| $P_e$    | kW                                                  | 50,27         | 104,15        | 100           |
| $M_p$    | $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$                      | <b>3,2117</b> | <b>6,2201</b> | <b>6,8056</b> |

**Hmotnostní tok turbínou**

$$m_v = (m_k + M_p) \cdot \frac{1}{\mu}$$

| n     | ot/min                          | 1000          | 1480          | 2200          |
|-------|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $m_k$ | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ | 0,0705        | 0,1494        | 0,1544        |
| $M_p$ | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ | 3,2117        | 6,2201        | 6,8056        |
| $\mu$ | -                               | 0,96          |               |               |
| $m_v$ | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ | <b>0,0768</b> | <b>0,1621</b> | <b>0,1679</b> |

**Převrácený expanzní poměr na turbíně**

$$\frac{P_{T2}}{P_{T1}} = \left[ 1 - \frac{m_k}{m_v} \cdot \frac{1}{k_1} \cdot \frac{1}{\zeta} \cdot \left( \Pi_c^{\frac{\kappa_s - 1}{\kappa_s}} - 1 \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

| n                                    | ot/min             | 1000           | 1480           | 2200           |
|--------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>m<sub>k</sub></b>                 | kg·s <sup>-1</sup> | 0,0705         | 0,1494         | 0,1544         |
| <b>m<sub>v</sub></b>                 | kg·s <sup>-1</sup> | 0,07680        | 0,16214        | 0,16794        |
| <b>k<sub>1</sub></b>                 | -                  | 1,1541         |                |                |
| <b>ζ</b>                             | -                  | 1,4693         | 1,8068         | 1,7288         |
| <b>Π<sub>c</sub></b>                 | -                  | 2,1024         | 3,0610         | 2,1922         |
| <b>κ<sub>s</sub></b>                 | -                  | 1,40           |                |                |
| <b>κ<sub>vp</sub></b>                | -                  | 1,32           |                |                |
| <b>P<sub>T2</sub>/P<sub>T1</sub></b> | -                  | <b>0,56816</b> | <b>0,47187</b> | <b>0,60027</b> |

**Expanzní poměr na turbíně**

$$\Pi_T = \left( \frac{P_{T2}}{P_{T1}} \right)^{-1}$$

| n                                    | ot/min | 1000          | 1480          | 2200          |
|--------------------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|
| <b>P<sub>T2</sub>/P<sub>T1</sub></b> | -      | 0,56816       | 0,44187       | 0,60027       |
| <b>Π<sub>T</sub></b>                 | -      | <b>1,7601</b> | <b>2,1192</b> | <b>1,6659</b> |

**Tlaková ztráta ve výfukovém potrubí**

Vyplývá z měření na obdobném motoru

| n                     | ot/min     | 1000     | 1480     | 2200     |
|-----------------------|------------|----------|----------|----------|
| <b>Δp<sub>v</sub></b> | <b>kPa</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Tlak na výstupu turbíny.**

$$p_{T2} = p_a + \Delta p_v$$

| n            | ot/min | 1000  | 1480  | 2200  |
|--------------|--------|-------|-------|-------|
| $p_a$        | MPa    | 0,1   |       |       |
| $\Delta p_v$ | MPa    | 0,003 | 0,004 | 0,005 |
| $p_{T2}$     | MPa    | 0,103 | 0,104 | 0,105 |

**Tlak na vstupu turbíny**

$$p_{T1} = \Pi_T \cdot p_{T2}$$

| n        | ot/min     | 1000           | 1480           | 2200           |
|----------|------------|----------------|----------------|----------------|
| $\Pi_T$  | -          | 1,7601         | 2,1192         | 1,6659         |
| $p_{T2}$ | Mpa        | 0,103          | 0,104          | 0,105          |
| $p_{T1}$ | <b>MPa</b> | <b>0,18129</b> | <b>0,22040</b> | <b>0,17492</b> |

**Isoentropický spád na turbíně**

$$H_{isT} = C_{PEGR} \cdot T_{T1} \cdot \left( 1 - \Pi_T^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)$$

| n             | ot/min                                               | 1000   | 1480   | 2200   |
|---------------|------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| $C_{PEGR}$    | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | 1,1300 |        |        |
| $T_{T1}$      | K                                                    | 753    | 926    | 886    |
| $\Pi_{T1}$    | -                                                    | 1,601  | 2,1192 | 1,6659 |
| $\kappa_{vp}$ | -                                                    | 1,32   |        |        |
| $H_{isT}$     | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$                     | 108,98 | 174,18 | 116,52 |

**Výkon turbíny**

$$P_T = H_{isT} \cdot m_v \cdot \eta_T \cdot \eta_{mT}$$

Mechanická účinnost turbodmychadla volím 0,96 což je hodnota pro účinnost turbíny s kluznými ložisky. Hodnotu vnitřní účinnosti turbíny volím 0,9.

| n           | ot/min                           | 1000         | 1480          | 2200          |
|-------------|----------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| $H_{isT}$   | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 108,981      | 174,181       | 116,516       |
| $m_v$       | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$  | 0,07680      | 0,16214       | 0,16794       |
| $\eta_T$    | -                                | 0,9          |               |               |
| $\eta_{mT}$ | -                                | 0,96         |               |               |
| $P_T$       | <b>kW</b>                        | <b>7,231</b> | <b>24,400</b> | <b>16,906</b> |



DIPLOMOVÁ PRÁCE



### 3 Volba koncepce přeplňování

Z návrhového výpočtu je zřejmé, že pro požadovaný průběh výkonu společně s recirkulací výfukových plynů je potřeba poměrně velkého stlačení a takové stlačení už není pro objemové dmychadla dosažitelné. Také mechanický pohon dmychadla není příliš vhodný z hlediska velkého odebíraného výkonu z klikové hřídele.

Jako výhodné řešení se tedy jeví turbodmychadlo, které je výhodné jak z pohledu hospodárnosti, tak pro poměrně velké stlačení.

Z požadovaných stlačení a hmotnostních toků v jednotlivých režimech je zřejmé, že musíme využít turbodmychadla s regulací. Dalším hlediskem které musíme zohlednit je potřeba recirkulace výfukových plynů ve všech režimech, protože z výpočtu je zřejmé, že tlak před turbínou je menší než tlak za kompresorem a nemáme tedy pozitivní tlakový spád pro přefouknutí spalín do sacího potrubí.

Mám tedy následující možnosti:

- **Turbodmychadlo s regulací odpouštěním výfukových plynů (wastegate)**

U této varianty narážíme na problém recirkulace výfukových plynů v nízkých otáčkách. Nemáme zde totiž dostatečný tlak před turbínou k přepuštění spalín do sání. U vysokých otáček pak dochází k menší účinnosti díky ztrátám.

- **Turbodmychadlo s regulací odpouštěním v kombinaci se škrticí klapkou před turbodmychadlem (backpressure device)**

Před turbínou je předřazeno zařízení se škrticí klapkou, která vytváří dostatečný tlak škrcením před turbínou pro přepuštění spalín.

- **Turbodmychadlo s asymetricky dělenou skříní.**

U této varianty je skříň turbíny rozdělena na dva samostatné vstupy různých velikostí, kdy do každé části vstupují spaliny z jedné poloviny válců. K recirkulaci je využívána pouze větev s menším vstupním otvorem, před kterým vzniká větší tlak.

- **Turbodmychadlem s variabilní geometrií lopatek statoru turbíny**

U tohoto řešení vzniká vyšší tlak přivřením lopatek statoru při nízkých otáčkách a postupné otevírání při zvětšujících se otáčkách a průtoku spalin. Přestože dochází přivřením lopatek ke škrcení, ztráta není tak velká jako u ostatních regulovaných variant, protože zároveň dochází k přesnějšímu nasměrování celého objemu spalin přímo na lopatky. Přepouštění EGR je tedy možno ve všech režimech bez omezení.

Pro své řešení jsem se rozhodl pro variantu **turbodmychadla s variabilní geometrií lopatek**. Tato varianta má jedinou nevýhodu:

Vyšší pořizovací náklady. V porovnání s wastegate turbodmychadlem se jedná o více než 50% ceny navíc..

Mezi výhody pak patří:

Možnost recirkulace ve všech režimech.

Nejpřesnější regulace výkonu dle požadavků.

Minimální zpoždění turbodmychadla (známé jako turbo efekt).

Turbodmychadlem prochází neustále plný hmotnostní tok spalin.

Nejvyšší účinnost a tím pádem nejnižší měrná spotřeba paliva.





## 4 VÝPOČET OBĚHU A STANOVENÍ PARAMETRŮ PŘEPLŇOVÁNÍ

### 4.1 Zvolené a zadané parametry

#### Konstrukční parametry motoru

|              |       |               |                       |
|--------------|-------|---------------|-----------------------|
| $V$          | 4,156 | $\text{dm}^3$ | Zdvihový objem motoru |
| $D$          | 105   | mm            | Vrtání válce          |
| $H_m$        | 120   | mm            | Zdvih pístu           |
| $\epsilon_z$ | 16    | -             | Kompresní poměr       |
| $n_v$        | 4     | -             | Počet válců           |
| $\tau$       | 2     | -             | Taktnost motoru       |
| $L_{oj}$     | 215   | mm            | Délka ojnice          |

#### Použité konstanty

|       |        |                                                       |                               |
|-------|--------|-------------------------------------------------------|-------------------------------|
| $n_2$ | 1,28   | -                                                     | Exponent polytropy expanze    |
| $K$   | 1,4    | -                                                     | Exponenta adiabaty            |
| $r$   | 287,04 | $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$   | Plynová konsta vzduchu        |
| $r'$  | 293    | $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$   | Plynová konstanta spalin      |
| $R$   | 8314,3 | $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$ | Univerzální plynová konstanta |

#### Atmosferické podmínky

|       |     |                    |                   |
|-------|-----|--------------------|-------------------|
| $p_a$ | 100 | kPa                | atmosferický tlak |
| $T_a$ | 20  | $^{\circ}\text{C}$ | okolní teplota    |



## 4.2 Výpočet základních geometrických parametrů motoru

**Zdvihový objem jednoho válce**

$$V_H = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H_m = 1,039 \text{ dm}^3$$

**Celkový objem jednoho válce**

$$V_M = V_H \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_z - 1} + 1 \right) = 1,108 \text{ l}$$

**Kompresní objem jednoho válce**

$$V_C = V_H \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_z - 1} \right) = 0,069 \text{ l}$$

**Rameno kliky klikového hřídele**

$$r_k = \frac{H_m}{2} = 60 \text{ mm}$$

**Klikový poměr motoru**

$$\lambda_{kl} = \frac{r_k}{L_{oj}} = \frac{60}{215} = 0,279$$

### 4.3 Výpočet parametrů pracovní látky

Použitým palivem pro motor je motorová nafta dle normy ČSN EN 590.

Přibližné procentní složení nafty:

|       |   |       |                       |
|-------|---|-------|-----------------------|
| uhlík | C | 0,87  | kmol·kg <sup>-1</sup> |
| vodík | H | 0,126 | kmol·kg <sup>-1</sup> |
| síra  | S | 0,004 | kmol·kg <sup>-1</sup> |

**Teoreticky nutné množství vzduchu pro spálení 1kg paliva.**

$$M_{Lo} = \frac{1}{0,21} \cdot \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) = \frac{1}{0,21} \cdot \left( \frac{0,86}{12} + \frac{0,138}{4} + \frac{0,002}{32} - \frac{0}{32} \right) =$$

$$= 0,4958 \text{ kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

**Molekulová hmotnost uhlovodíkových paliv.**

$$\mu_p = 114 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

**Skutečné molární množství vzduchu připadajícího na 1kg paliva.**

$$M_1 = \lambda_z \cdot M_{Lo} + \frac{1}{\mu_p}$$

| n               | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000   | 1480   | 2200   |
|-----------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| M <sub>Lo</sub> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,4958 | 0,4958 | 0,4958 |
| λ               | -                     | 1,4    | 1,4    | 1,4    |
| μ <sub>p</sub>  | kg·kmol <sup>-1</sup> | 114    | 114    | 114    |
| M <sub>1</sub>  | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,7029 | 0,7029 | 0,7029 |

**Zdánlivá molární hmotnost vzduchu.**

$$M_{vzd} = 28,97 \text{ kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$$

**Teoretický směšovací poměr.**

$$\sigma_T = M_{vzd} \cdot M_{Lo} = 14,3643$$

**Měrná tepelná kapacita vzduchu.**

$$c_{p.vz} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot r = 1,0046 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Měrná tepelná kapacita spalín.**

$$c_{p.sp} = \frac{n_2}{n_2 - 1} \cdot r' = 1,3394 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

**Součinitel znečištění směsi od reziduálních plynů.**

$$\phi_{rez} = 0,076$$

**Teplota zbytkových výfukových plynů.**

|                        |                            |             |             |             |
|------------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>n</b>               | <b>ot·min<sup>-1</sup></b> | <b>1000</b> | <b>1480</b> | <b>2200</b> |
| <b>T<sub>rez</sub></b> | <b>K</b>                   | <b>820</b>  | <b>926</b>  | <b>886</b>  |

**Předpokládaný tlak zbytkových plynů.**

|                        |                            |              |              |              |
|------------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>n</b>               | <b>ot·min<sup>-1</sup></b> | <b>1000</b>  | <b>1480</b>  | <b>2200</b>  |
| <b>p<sub>rez</sub></b> | <b>kPa</b>                 | <b>140,0</b> | <b>162,9</b> | <b>195,0</b> |

**Ohřátí vzduchu o stěny válce.**

|                       |                            |             |             |             |
|-----------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>n</b>              | <b>ot·min<sup>-1</sup></b> | <b>1000</b> | <b>1480</b> | <b>2200</b> |
| <b>ΔT<sub>1</sub></b> | <b>K</b>                   | <b>13,0</b> | <b>13,8</b> | <b>15,0</b> |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

## Koeficient reziduálních plynů

$$\gamma_r = \frac{T_{pl} + \Delta T_1}{T_{rez}} \cdot \frac{p_{rez} \cdot \phi_{rez}}{\epsilon_z \cdot p_{pl} - p_{rez}}$$

| n                | ot·min <sup>-1</sup> | 1000     | 1480     | 2200     |
|------------------|----------------------|----------|----------|----------|
| T <sub>pl</sub>  | K                    | 312,61   | 334,66   | 326,49   |
| ΔT <sub>1</sub>  | K                    | 13,0     | 13,8     | 15,0     |
| T <sub>rez</sub> | K                    | 820      | 926      | 886      |
| p <sub>rez</sub> | kPa                  | 140,0    | 162,9    | 195,0    |
| Φ <sub>rez</sub> | -                    | 0,076    |          |          |
| ε <sub>z</sub>   | -                    | 16       |          |          |
| p <sub>pl</sub>  | kPa                  | 200,3    | 288,3    | 203,2    |
| γ <sub>r</sub>   | -                    | 0,001501 | 0,001047 | 0,001869 |

## Teplota vzduchu na konci plnění válce

V této teplotě je zohledněno oteplení vzduchu o stěny válce a zvýšení teploty od expandujících reziduálních plynů.

$$T_{1z.teor} = \frac{T_{pl} + \Delta T_1 + \gamma_r \cdot T_{pr} \cdot \frac{c_{pv.vz}}{c_{p.sp}}}{1 + \gamma_r}$$

| n                    | ot·min <sup>-1</sup>                 | 1000     | 1480     | 2200     |
|----------------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| T <sub>pl</sub>      | K                                    | 312,61   | 334,66   | 333,23   |
| ΔT <sub>1</sub>      | K                                    | 13,0     | 13,8     | 15,0     |
| T <sub>rez</sub>     | K                                    | 753,0    | 926,0    | 886,0    |
| γ <sub>r</sub>       | -                                    | 0,001459 | 0,001026 | 0,001426 |
| c <sub>p.vz</sub>    | kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> | 1,01150  |          |          |
| c <sub>p.sp</sub>    | kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> | 1,33943  |          |          |
| T <sub>1z.teor</sub> | K                                    | 326,25   | 349,06   | 342,51   |

**Spotřeba paliva na jeden termodynamický cyklus**

$$M_{p1} = \frac{m_{pal} \cdot P_{e.teor} \cdot \tau}{n_v \cdot n \cdot 60}$$

|                       |                                     |        |        |        |
|-----------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup>                | 1000   | 1480   | 2200   |
| <b>m<sub>pe</sub></b> | g·kW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> | 230    | 215    | 245    |
| <b>Pe</b>             | kW                                  | 50,266 | 104,15 | 100    |
| <b>τ</b>              | -                                   | 2      |        |        |
| <b>n<sub>v</sub></b>  | -                                   | 4      |        |        |
| <b>M<sub>p1</sub></b> | g                                   | 0,0984 | 0,1261 | 0,0947 |

**Specifická efektivní spotřeba vzduchu**

$$m'_z = V_H \cdot \eta_{pl} \cdot \rho_{pl}$$

|                       |                      |                |                |                |
|-----------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000           | 1480           | 2200           |
| <b>V<sub>H</sub></b>  | m <sup>3</sup>       | 0,001039       | 0,001039       | 0,001039       |
| <b>η<sub>pl</sub></b> | -                    | 0,89           | 0,9            | 0,89           |
| <b>ρ<sub>pl</sub></b> | kg·m <sup>-3</sup>   | 2,3015         | 3,1673         | 2,2518         |
| <b>m<sub>z</sub>'</b> | kg                   | <b>0,00213</b> | <b>0,00296</b> | <b>0,00208</b> |

**Spalovací hmotnostní tok vzduchu motorem.**

$$m_z = m'_z \cdot i \cdot \frac{n_v}{\tau}$$

|                       |                      |                |                |                |
|-----------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000           | 1480           | 2200           |
| <b>m<sub>z</sub>'</b> | g                    | 0,002113       | 0,002819       | 0,002558       |
| <b>i</b>              | -                    | 4              | 4              | 4              |
| <b>τ</b>              | -                    | 2              | 2              | 2              |
| <b>m<sub>z</sub></b>  | g·sec <sup>-1</sup>  | <b>0,07094</b> | <b>0,14611</b> | <b>0,15270</b> |



#### 4.4 Obsah jednotlivých složek.

##### Molární množství oxidu uhelnatého ve výfukových plynech.

Oxid uhelnatý je plyn jedovatý a proto se snažíme jeho vznik eliminovat. K jeho vzniku dochází, pokud spalujeme naftu za podmínek tzv. bohaté směsi, tedy nedostatku vzduch. Vzhledem k tomu, že naše lambda je minimálně 1,4 tak oxid uhelnatý nevznikne.

| n                     | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000 | 1480 | 2200 |
|-----------------------|-----------------------|------|------|------|
| <b>M<sub>CO</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0    | 0    | 0    |

##### Molární množství oxidu uhličitého ve výfukových plynech

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} \text{ kmol} \cdot \text{kg}^{-1} - M_{CO}$$

| n                      | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000   | 1480   | 2200   |
|------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| <b>M<sub>CO2</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,0725 | 0,0725 | 0,0725 |

##### Molární množství nevázaného vodíku ve výfukových plynech.

$$M_{H_2} = kkHC \cdot M_{CO}$$

| n                     | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000 | 1480 | 2200 |
|-----------------------|-----------------------|------|------|------|
| <b>M<sub>CO</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0    | 0    | 0    |
| <b>kkHC</b>           | -                     | 0    | 0    | 0    |
| <b>M<sub>H2</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0    | 0    | 0    |

##### Molární množství vody(vodních par) ve výfukových plynech.

$$M_{H_2O} = \frac{H}{2} \cdot \text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$$



|                        |                       |       |       |       |
|------------------------|-----------------------|-------|-------|-------|
| <b>n</b>               | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000  | 1480  | 2200  |
| <b>H</b>               | -                     | 0,126 | 0,126 | 0,126 |
| <b>M<sub>H2O</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,063 | 0,063 | 0,063 |

**Molární množství dusíku ve výfukových plynech.**

$$M_{N_2} = 0,79 \cdot \lambda \cdot M_{Lo}$$

|                       |                       |        |        |        |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000   | 1480   | 2200   |
| <b>λ</b>              | -                     | 1,4    | 1,4    | 1,4    |
| <b>M<sub>Lo</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,4958 | 0,4958 | 0,4958 |
| <b>M<sub>N2</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,5484 | 0,5484 | 0,6659 |

**Molární množství kyslíku ve výfukových plynech.**

$$M_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot M_{Lo}$$

|                       |                       |         |         |         |
|-----------------------|-----------------------|---------|---------|---------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000    | 1480    | 2200    |
| <b>λ</b>              | -                     | 1,4     | 1,4     | 1,4     |
| <b>M<sub>Lo</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,4958  | 0,4958  | 0,4958  |
| <b>M<sub>O2</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,04165 | 0,04165 | 0,04165 |

**Molární množství výfukových plynů při teoreticky nulovém přebytku vzduchu.**

$$M_{2\lambda 1} = \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{2} \right) \text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1} + 0,79 \cdot M_{Lo} = 0,5272 \text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$$



**Celkové molární množství výfukových plynů.**

$$M_2 = (M_{CO} + M_{CO_2} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2} + M_{O_2})$$

| n                      | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000   | 1480   | 2200   |
|------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| <b>M<sub>CO</sub></b>  | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0      | 0      | 0      |
| <b>M<sub>CO2</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,0725 | 0,0725 | 0,0725 |
| <b>M<sub>H2O</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,063  | 0,063  | 0,063  |
| <b>M<sub>H2</sub></b>  | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0      | 0      | 0      |
| <b>M<sub>N2</sub></b>  | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,5484 | 0,5484 | 0,6659 |
| <b>M<sub>O2</sub></b>  | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,0417 | 0,0417 | 0,0729 |
| <b>M<sub>2</sub></b>   | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,7255 | 0,7255 | 0,8743 |

**Poměrné zastoupení spalín ve výfukových plynech.**

$$r_{M2} = \frac{M_{2\lambda1}}{M_2}$$

| n                      | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000   | 1480   | 2200   |
|------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| <b>M<sub>2λ1</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,5272 | 0,5272 | 0,5272 |
| <b>M<sub>2</sub></b>   | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,7255 | 0,7255 | 0,7255 |
| <b>r<sub>M2</sub></b>  | -                     | 0,7266 | 0,7266 | 0,7266 |

**Poměrné zastoupení vzduchu ve výfukových plynech.**

$$r_L = \frac{(\lambda - 1) \cdot M_{Lo}}{M_2}$$

| n                     | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000   | 1480   | 2200   |
|-----------------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| <b>λ<sub>z</sub></b>  | -                     | 1,4    | 1,4    | 1,7    |
| <b>M<sub>Lo</sub></b> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,4958 | 0,4958 | 0,4958 |
| <b>M<sub>2</sub></b>  | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,7255 | 0,7255 | 0,8743 |
| <b>r<sub>L</sub></b>  | -                     | 0,2734 | 0,2734 | 0,3970 |

### Energetické parametry paliva.

#### Výhřevnost paliva.

je dána normou ČSN

$H_u$       42       $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Změna výhřevnosti paliva.

Je dána nedokonalostí spalování při  $\lambda < 1$ . V našem případě je pro všechny režimy rovna nule.

| n            | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ | 1000 | 1480 | 2200 |
|--------------|-----------------------------------|------|------|------|
| $\Delta H_u$ | $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$   | 0    |      |      |

#### Změna přivedeného tepla disociací paliva.

K disociaci dochází při vysokých teplotách nad  $2000^\circ\text{C}$ .

| n            | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ | 1000 | 1480 | 2200 |
|--------------|-----------------------------------|------|------|------|
| $\Delta dis$ | %                                 | 0    | 0    | 0    |

#### Změna přivedeného tepla odvodem do stěn válce.

Zvolíme dle praktických poznatků a měření na obdobném motoru.

| n            | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ | 1000 | 1480 | 2200 |
|--------------|-----------------------------------|------|------|------|
| $\Delta odv$ | %                                 | 20   |      |      |

#### Koeficient skutečného využití tepla přivedeného v palivu.

Je to vlastně účinnost využití tepla z paliva, která je ovlivněna ztrátami disociací a odvodem tepla do stěn válce.

$$\xi_z = 1 - \Delta dis - \Delta odv$$



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|                |                      |      |      |      |
|----------------|----------------------|------|------|------|
| n              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
| Δdis           | %                    | 0    | 0    | 0    |
| Δodv           | %                    | 20   |      |      |
| ξ <sub>z</sub> | -                    | 0,8  | 0,8  | 0,8  |

**Skutečné využití tepla přivedené v palivu.**

$$q = \frac{\xi_z \cdot (H_u - \Delta H_u)}{M_1 \cdot (1 + \gamma_r)}$$

|                 |                       |        |        |        |
|-----------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| n               | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000   | 1480   | 2200   |
| ξ <sub>z</sub>  | -                     | 0,795  | 0,8    | 0,8    |
| H <sub>u</sub>  | kJ·kg <sup>-1</sup>   | 42000  |        |        |
| ΔH <sub>u</sub> | -                     | 0      | 0      | 0      |
| M <sub>1</sub>  | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,7029 | 0,7029 | 0,8517 |
| γ <sub>r</sub>  | -                     | 0,0015 | 0,0010 | 0,0014 |
| q               | kJ·kmol <sup>-1</sup> | 47727  | 47750  | 47710  |

**Skutečný součinitel molární změny.**

Udává poměrnou změnu počtu molů při shoření paliva. Vyjadřuje tedy poměr mezi produkty hoření a molárním množstvím plynů vstupujících do procesu hoření tj. vzduch, palivo, reziduální plyny a recirkující plyny.

$$\mu = \frac{M_2 + \gamma_r \cdot M_1}{M_1 \cdot (1 + \gamma_r)}$$

|                |                       |        |        |        |
|----------------|-----------------------|--------|--------|--------|
| n              | ot·min <sup>-1</sup>  | 1000   | 1480   | 2200   |
| M <sub>2</sub> | kJ·kg <sup>-1</sup>   | 0,7255 | 0,7255 | 0,7255 |
| M <sub>1</sub> | kmol·kg <sup>-1</sup> | 0,7029 | 0,7029 | 0,7029 |
| γ <sub>r</sub> | -                     | 0,0015 | 0,0010 | 0,0014 |
| μ              | kJ·kmol <sup>-1</sup> | 1,0321 | 1,0321 | 1,0320 |

#### 4.5 Krokový výpočet celého termodynamického cyklu

Celý krokový výpočet oběhu motoru je zpracován v excelu, uvedu zde tedy pouze teoretický postup výpočtu spolu se zdůvodněním volby parametrů a konečnými vypočtenými parametry. Tabulku s kompletními vypočtenými hodnotami krokového cyklu jsou přidány v příloze.

#### Výpočet teplot a tlaků při kompresi.

##### Úhel předstihu vstřiku.

Zjištěno dle obdobného motoru.

| n              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|----------------|----------------------|------|------|------|
| Φ <sub>t</sub> | °                    | 8    | 4    | 0    |

##### Doba hoření.

Zjištěno dle obdobného motoru.

| n              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|----------------|----------------------|------|------|------|
| Δ <sub>2</sub> | °                    | 55   | 46   | 40   |

#### Počáteční úhel natočení klikové hřídele a objem válce.

Vzhledem k tomu, že komprese začíná v dolní úvrati, položíme za počáteční úhel roven 180° a objem je roven maximálnímu.

$$\alpha_0 = 180^\circ$$

$$V_o = V_M = 1,108 \text{ l}$$

#### Molární objem nasáté směsi.

Jedná se o upravenou stavovou rovnici plynů s uvažováním reziduálních výfukových plynů.

$$V_0 = \frac{R \cdot T_{k0}}{(1 + \gamma_r) \cdot p_{k0}}$$



|                 |                                      |          |          |          |
|-----------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| n               | ot·min <sup>-1</sup>                 | 1000     | 1480     | 2200     |
| R               | J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> | 8,3143   | 8,3143   | 8,3143   |
| T <sub>k0</sub> | K                                    | 312,61   | 334,66   | 326,49   |
| γ <sub>r</sub>  | -                                    | 0,001501 | 0,001047 | 0,001869 |
| p <sub>k0</sub> | Mpa                                  | 211,2    | 293,5    | 267,4    |
| v <sub>0</sub>  | m <sup>3</sup> ·kmol <sup>-1</sup>   | 12,2881  | 9,4704   | 10,1327  |

**Poměrná změna objemu při pootočení klikového hřídele.**

$$\Psi_i = 1 + \frac{\varepsilon_z - 1}{2} \cdot \left[ 1 - \cos\left(\Pi \cdot \frac{\alpha}{180}\right) + \frac{\lambda_{kl}}{4} \cdot \left( 1 - \cos\left(2 \cdot \Pi \cdot \frac{\alpha}{180}\right) \right) \right]$$

**Molární objem při pootočení klikového hřídele.**

$$v = \psi \cdot \frac{V_0}{\varepsilon_z}$$

**Geometrický objem při pootočení klikového hřídele.**

$$V = \psi \cdot \frac{V_0}{\varepsilon_z}$$

**Koeficient polytropy v závislosti na teplotě vzduchu.**

$$n_1 = \kappa_1 - 0,02$$

$$\kappa_1 = 1 + \frac{R}{m_{celk}}$$

Polynomy čtvrtého stupně v následujícím výpočtu vznikly numerickou aproximací bodů pro jednotlivé teploty v excelu.

$$m_{cv.vz} = (3 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0.0009 \cdot T + 20,651)$$

$$m_{cv.sp} = 2 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 1 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 2 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0034T + 21,008$$

**Tepelná kapacita kompresovaného vzduch se zohledněním recirkulujících plynů.**

$$m_{cv.celk} = (1 - EGR) \cdot c_{mv} + EGR \cdot (r_{m2} \cdot m_{cv.vz} + r_{L2} \cdot m_{cv.sp})$$

**Výpočet teplot při kompresi.**

$$T_{k_{0+1}} = \left( \frac{v_0}{v_{0+1}} \right)^{n_1-1} \cdot T_{k_0}$$

**Výpočet tlaků při kompresi.**

$$p_{k_{0+1}} = \left( \frac{v_0}{v_{0+1}} \right)^{n_1} \cdot p_{k_0}$$

**Teploty a tlaky na konci komprese.**

| n               | ot·min <sup>-1</sup> | 1000   | 1480   | 2200   |
|-----------------|----------------------|--------|--------|--------|
| p <sub>α1</sub> | Mpa                  | 8,93   | 11,95  | 11,01  |
| T <sub>α1</sub> | K                    | 824,68 | 868,12 | 869,36 |

**Výpočet teplot a tlaků v prodlevě vznícení.**

**Experimentálně zjištěná konstanta zahrnující dvě fáze plamenných reakcí.**

$$C_1 = 0,5$$

**Tlak v okamžiku vstřiku paliva.**

Hodnoty odečteny z krokového výpočtu dle hodnoty předstihu vstřiku. Viz příloha.

$$p_x = p_{k_{360-\phi_t}}$$

|                      |                                      |      |       |       |
|----------------------|--------------------------------------|------|-------|-------|
| <b>n</b>             | ot·min <sup>-1</sup>                 | 1000 | 1480  | 2200  |
| <b>p<sub>x</sub></b> | J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> | 7,69 | 11,60 | 11,01 |

**Teplota v okamžiku vstřiku paliva.**

Hodnoty opět odečteny z krokového výpočtu, dle hodnoty předstihu vstřiku. Viz příloha.

$$T_x = T_{k_{360-\phi_t}}$$

|                      |                                      |        |        |        |
|----------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|
| <b>n</b>             | ot·min <sup>-1</sup>                 | 1000   | 1480   | 2200   |
| <b>T<sub>x</sub></b> | J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> | 803,10 | 862,57 | 869,36 |

**Prodleva vznětu dle Sitkea**

$$\Delta\alpha = 6 \cdot n \cdot 10^{-3} \cdot \left\{ C_1 + \left[ 0,02651 \cdot (p_x)^{-0,7} + 0,07345 \cdot (p_x)^{-1,8} \right] \cdot e^{\frac{3930}{T_x}} \right\}$$

|                      |                                      |             |             |              |
|----------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>n</b>             | ot·min <sup>-1</sup>                 | 1000        | 1480        | 2200         |
| <b>C<sub>1</sub></b> | -                                    | 0,5         |             |              |
| <b>p<sub>x</sub></b> | J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> | 7,69        | 11,60       | 11,01        |
| <b>T<sub>x</sub></b> | K                                    | 803,10      | 862,57      | 869,36       |
| <b>e</b>             | -                                    | 2,7182      |             |              |
| <b>Δα</b>            | °                                    | <b>8,79</b> | <b>9,08</b> | <b>13,78</b> |

**Zaokrouhlené hodnoty prodlevy vznětu**

| n              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|----------------|----------------------|------|------|------|
| $\Delta\alpha$ | °                    | 8    | 9    | 14   |

**Teploty a tlaky v prodlevě vznětu**

Z diagramů tlaků a teplot naměřených na obdobném motoru vyplývá, že tlaky i teploty vystoupí na kompresní v horní úvrati a dále již nestoupají ani neklesají a jsou tedy shodné s tlaky na konci komprese, uvedenými již dříve.

**Výpočet teplot a tlaků při hoření**

**Začátek hoření.**

$$\alpha_{hz} = 360 - \phi_t + \Delta\alpha$$

| n              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|----------------|----------------------|------|------|------|
| $\Phi_t$       | °                    | 8    | 4    | 0    |
| $\Delta\alpha$ | °                    | 8    | 9    | 14   |
| $\alpha_{hz}$  | °                    | 360  | 365  | 374  |

**Konec hoření.**

$$\alpha_{hk} = \alpha_{hz} + \Delta_2$$

| n             | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|---------------|----------------------|------|------|------|
| $\alpha_{hz}$ | °                    | 360  | 365  | 374  |
| $\Delta_2$    | °                    | 55   | 46   | 40   |
| $\alpha_{hk}$ | °                    | 415  | 411  | 414  |





**Poměrná změna objemu při pootočení klikového hřídele.**

$$\Psi_i = 1 + \frac{\varepsilon_z - 1}{2} \cdot \left[ 1 - \cos\left(\Pi \cdot \frac{\alpha}{180}\right) + \frac{\lambda_{kl}}{4} \cdot \left( 1 - \cos\left(2 \cdot \Pi \cdot \frac{\alpha}{180}\right) \right) \right]$$

**Molární objem při pootočení klikového hřídele.**

$$v = \psi \cdot \frac{V_0}{\varepsilon_z}$$

**Geometrický objem při pootočení klikového hřídele.**

$$V = \psi \cdot \frac{V_0}{\varepsilon_z}$$

**Uvolněné teplo hořením při jednotlivých natočeních hřídele.**

$$w = 6.908 \cdot (m_1 + 1) \cdot \left\{ \frac{\alpha - [360 + (-\phi_t + \Delta\alpha_p)]}{\Delta 2} \right\}^{m_1} \cdot \exp \left\{ \frac{\alpha - [360 + (-\phi_t + \Delta\alpha_p)]}{\Delta 2} \right\}^{m_1 + 1}$$

$$n_1 = \kappa_1 - 0,02$$

$$\kappa_1 = 1 + \frac{R}{m_{cv.celk}}$$

$$m_{cv.vz} = (3 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0.0009 \cdot T + 20,651)$$

$$m_{cv.sp} = 2 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 1 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 2 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0034T + 21,008$$

### Tepelná kapacita směsi.

$$m_{cv,celk} = (r_{M2} \cdot m_{cv,vz} + r_{L2} \cdot m_{cv,sp})$$

### Výpočet teplot při hoření.

$$T_{\alpha} = \left( \frac{V_{\alpha-1}}{V_{\alpha}} \right)^{(n-1)} \cdot T_{\alpha-1} + \frac{\Delta q}{m \cdot c_v}$$

### Výpočet tlaků při hoření.

$$p_{\alpha} = \left( \frac{V_{\alpha-1}}{V_{\alpha}} \right)^n \cdot p_{\alpha-1} + \frac{p_{\alpha-1} \cdot T_{\alpha}}{\left( \frac{V_{\alpha-1}}{V_{\alpha}} \right)^{(n-1)} \cdot T_{\alpha-1} - p_{\alpha-1}}$$

### Maximální teploty a tlaky.

Maximální hodnoty teplot a tlaků opět získány z krokového výpočtu motoru.

| n                | ot·min <sup>-1</sup> | 1000    | 1480    | 2200    |
|------------------|----------------------|---------|---------|---------|
| p <sub>max</sub> | Mpa                  | 13,75   | 16,61   | 14,10   |
| T <sub>max</sub> | K                    | 1870,03 | 1853,46 | 1746,56 |

### Teploty a tlaky na konci hoření.

| n              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000    | 1480    | 2200    |
|----------------|----------------------|---------|---------|---------|
| p <sub>x</sub> | Mpa                  | 3,38    | 4,88    | 5,56    |
| T <sub>x</sub> | K                    | 1568,13 | 1586,00 | 1563,28 |



**Výpočet teplot a tlaků při expanzi.**

**Poměrná změna objemu při pootočení klikového hřídele.**

$$\Psi_i = 1 + \frac{\varepsilon_z - 1}{2} \cdot \left[ 1 - \cos\left(\Pi \cdot \frac{\alpha}{180}\right) + \frac{\lambda_{kl}}{4} \cdot \left( 1 - \cos\left(2 \cdot \Pi \cdot \frac{\alpha}{180}\right) \right) \right]$$

**Molární objem při pootočení klikového hřídele.**

$$v = \psi \cdot \frac{V_0}{\varepsilon_z}$$

**Geometrický objem při pootočení klikového hřídele.**

$$V = \psi \cdot \frac{V_0}{\varepsilon_z}$$

**Koeficient polytropy v závislosti na teplotě vzduchu.**

$$n_1 = \kappa_1 - 0,02$$

$$\kappa_1 = 1 + \frac{R}{m_{cv.celk}}$$

$$m_{cv.vz} = (3 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 2 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0009 \cdot T + 20,651)$$

$$m_{cv.sp} = 2 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 1 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 2 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0034T + 21,008$$

**Tepelná kapacita směsi.**

$$m_{cv.celk} = (r_{M2} \cdot m_{cv.vz} + r_{L2} \cdot m_{cv.sp})$$



**Výpočet teplot při expanzi.**

$$T_{\alpha} = \left( \frac{V_{\alpha-1}}{V_{\alpha}} \right)^{(n-1)} \cdot T_{\alpha-1}$$

**Výpočet tlaků při expanzi.**

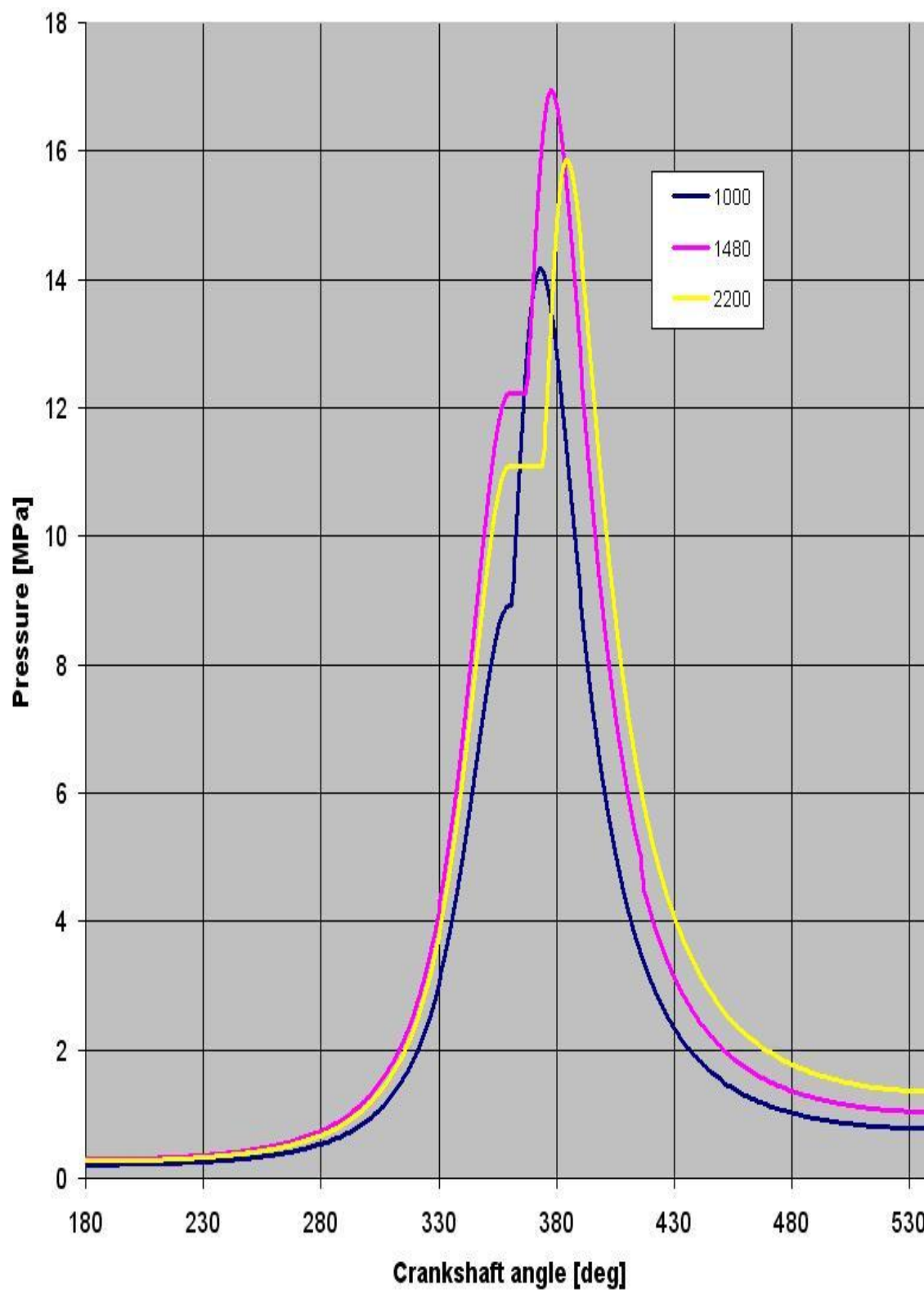
$$p_{\alpha} = \left( \frac{V_{\alpha-1}}{V_{\alpha}} \right)^n \cdot p_{\alpha-1}$$

**Teploty a tlaky na konci expanze.**

| n              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000    | 1480    | 2200    |
|----------------|----------------------|---------|---------|---------|
| p <sub>x</sub> | Mpa                  | 0,75    | 1,02    | 1,16    |
| T <sub>x</sub> | K                    | 1111,13 | 1106,55 | 1089,24 |

## 5. GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ TEPELNÉHO OBĚHU

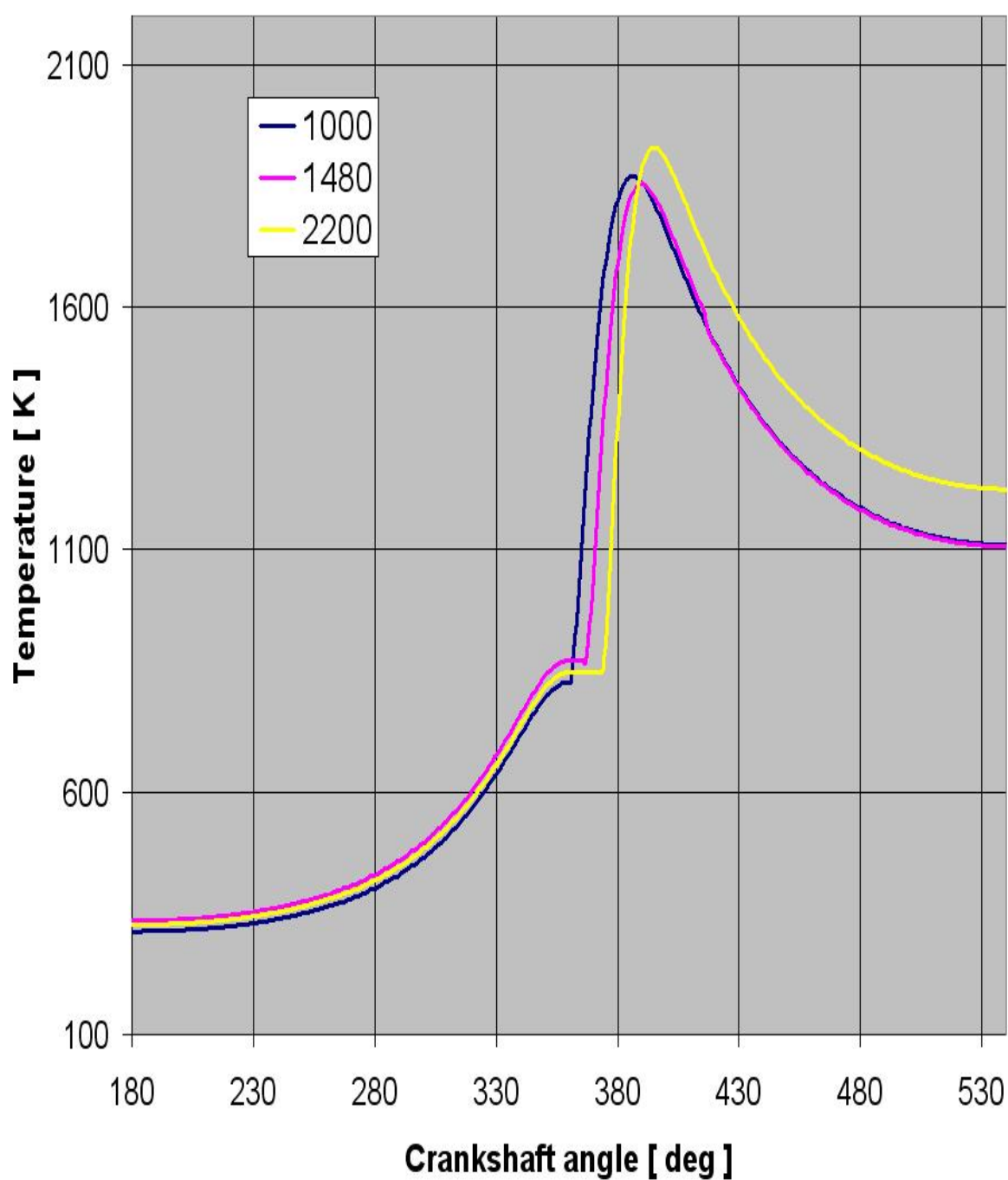
Tlak - úhel natočení klikové hřídele  $\alpha$





DIPLOMOVÁ PRÁCE

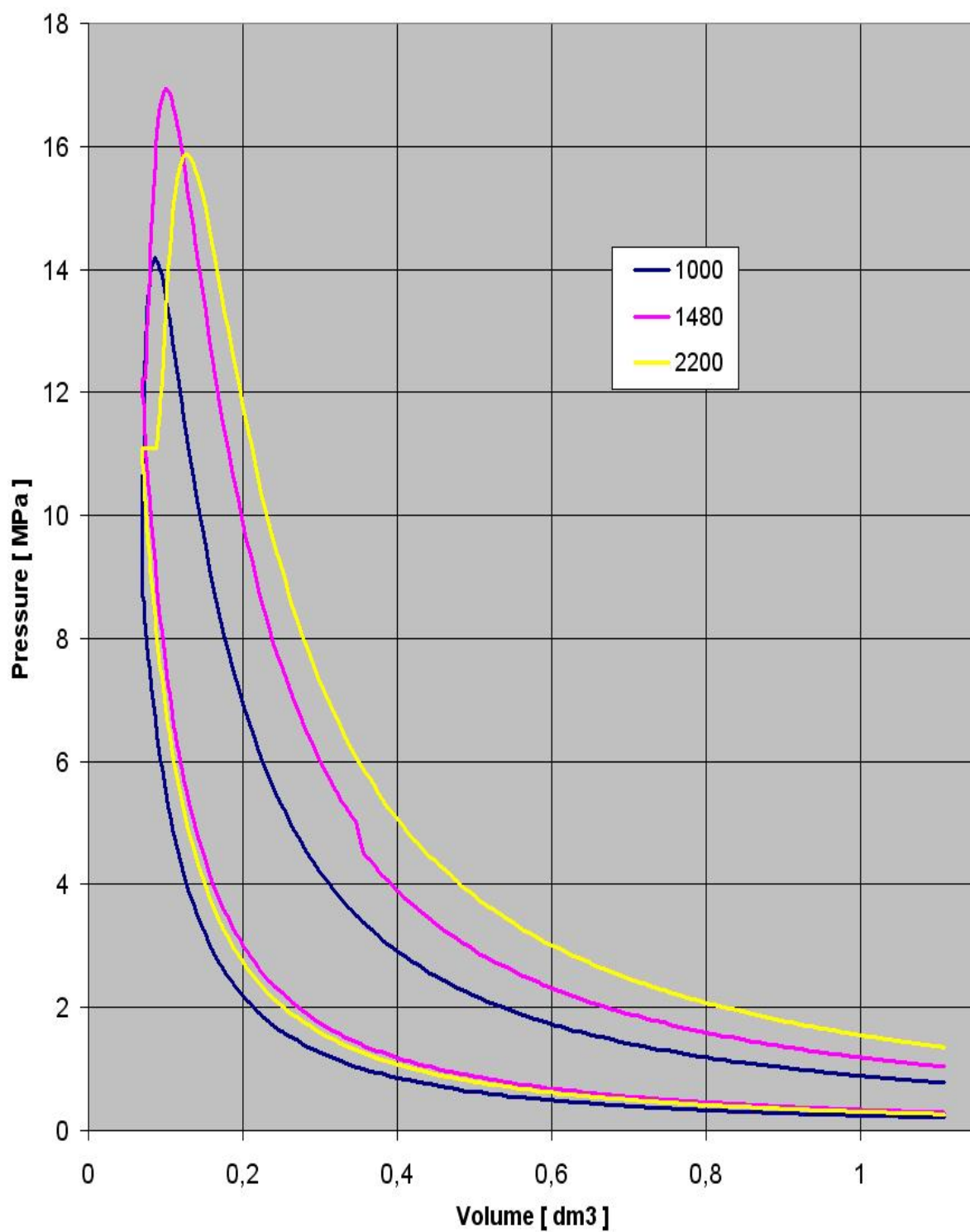
# Teplota - úhel natočení klikové hřídele $\alpha$ .





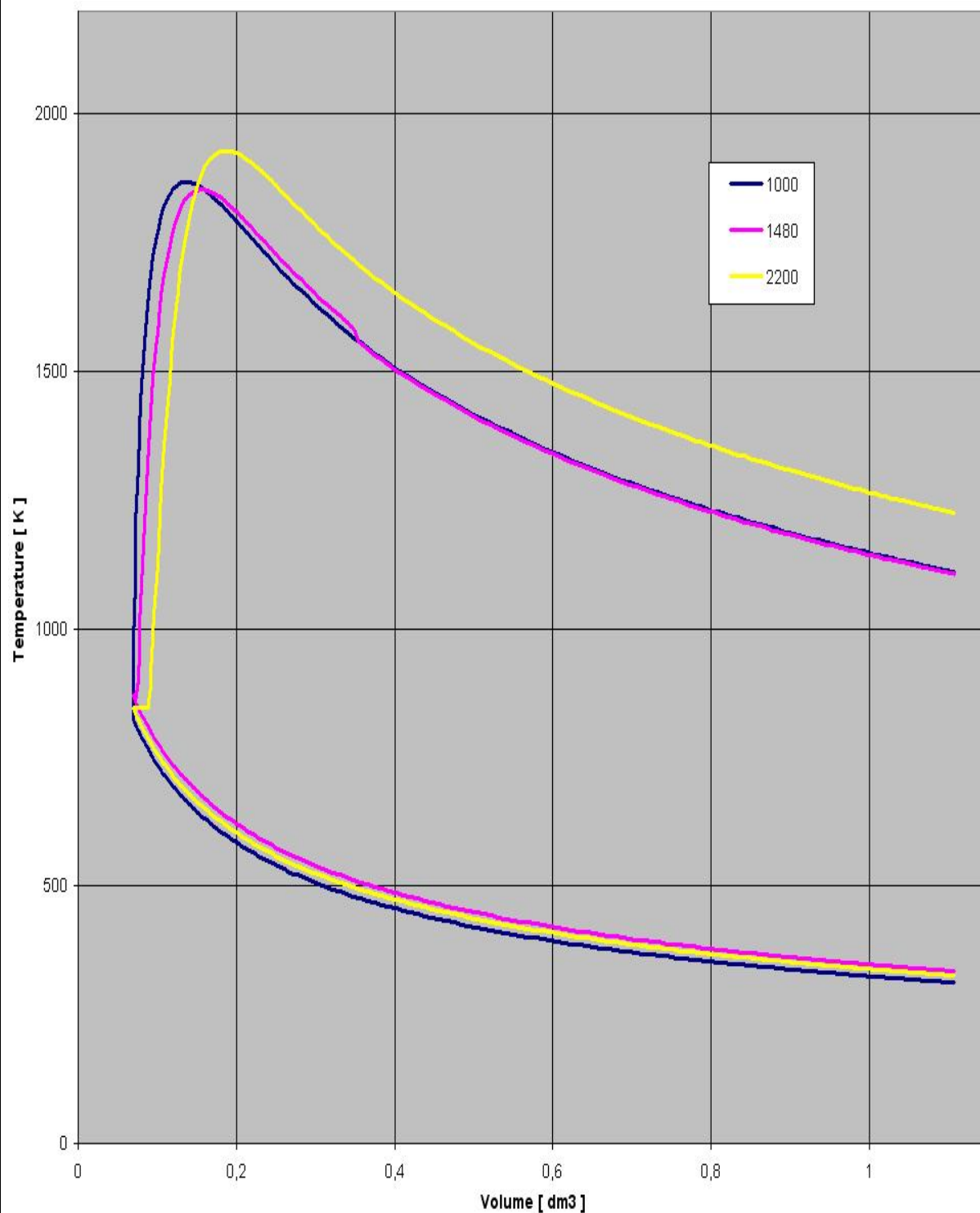


Tlak - Zdvihový objem válce.





DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Teplota - Zdvihový objem válce.**



DIPLOMOVÁ PRÁCE



## 5. SPOLUPRÁCE KOMPRESORU, MOTORU A TURBÍNY

Metoda použitá k výpočtu parametrů turbodmychadla je převzata od firmy Honeywell, vyrábějící turbodmychadla Garrett a je to metoda, která se používá v běžné praxi.

### Atmosferický tlak - Atmospheric pressure

Zvolená hodnota je platná pro všechny režimy motoru.

$$P_0 = 100 \text{ kPa}$$

### Tlaková ztráta v sání - Inlet depression.

Zvolena dle obdobných motorů

| n                | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|------------------|----------------------|------|------|------|
| ΔP <sub>in</sub> | kPa                  | 4    | 5    | 6    |

### Tlak na vstupu kompresoru - Compressor Inlet Pressure.

$$P_{1c} = P_0 - \Delta P_{in}$$

| n                | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
|------------------|----------------------|------|------|------|
| P <sub>0</sub>   | ot·min <sup>-1</sup> | 100  |      |      |
| ΔP <sub>in</sub> | kPa                  | 4    | 5    | 6    |
| P <sub>1c</sub>  | kPa                  | 96   | 95   | 94   |

### Kompresní poměr kompresoru - Compressor pressure ratio.

Počáteční kompresní poměr volím dle předběžného výpočtu, tento kompresní poměr se bude postupně měnit s tím jak budu dosazovat reálné účinnosti z kompresorové a turbínové mapy.

| n              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000  | 1480  | 2200  |
|----------------|----------------------|-------|-------|-------|
| Π <sub>c</sub> | -                    | 2,115 | 3,122 | 2,223 |

**Výstupní tlak kompresoru - Compressor outlet pressure.**

$$P_{2c} = P_{1c} \cdot \Pi_c$$

|                       |                      |               |               |               |
|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b>P<sub>1c</sub></b> | ot·min <sup>-1</sup> | 96,000        | 95,000        | 94,000        |
| <b>Π<sub>c</sub></b>  | kPa                  | 2,115         | 3,122         | 2,223         |
| <b>P<sub>2c</sub></b> | <b>kPa</b>           | <b>203,04</b> | <b>296,59</b> | <b>208,96</b> |

**Pokles tlaku v mezichladiči - Pressure drop across CAC**

Přibližné hodnoty získány z obdobných motorů a mezichladičů.

|                        |                      |      |      |      |
|------------------------|----------------------|------|------|------|
| <b>n</b>               | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
| <b>ΔP<sub>cc</sub></b> | kPa                  | 1,5  | 2,5  | 3,5  |

**Vstupní tlak do motoru - Engine Inlet pressure.**

$$P_{1e} = P_{2c} - \Delta P_{cc}$$

|                       |                      |               |               |               |
|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b>P<sub>2c</sub></b> | ot·min <sup>-1</sup> | 203,04        | 296,59        | 208,96        |
| <b>Π<sub>c</sub></b>  | kPa                  | 1,500         | 2,500         | 3,500         |
| <b>P<sub>1e</sub></b> | <b>kPa</b>           | <b>201,54</b> | <b>294,09</b> | <b>205,46</b> |

**Vstupní teplota do kompresoru - Compressor Inlet Temperature.**

Okolní teplota stejně jako při návrhovém výpočtu zvolena 20° C.

$$T_{1c} = 293,15 \quad K$$

**Účinnost kompresoru - Compressor Effectiveness.**

Účinnost kompresoru nejdříve zvolena 0,70 pro všechny režimy, později při dalších iteracích je dosazována přímo z kompresorové mapy dle hodnoty kompresního poměru a potřebného hmotnostního toku vzduchu kompresorem.

|                      |                      |      |      |      |
|----------------------|----------------------|------|------|------|
| <b>n</b>             | ot·min <sup>-1</sup> | 1000 | 1480 | 2200 |
| <b>η<sub>c</sub></b> | -                    | 0,69 | 0,73 | 0,71 |

**Nárůst teploty v kompresoru - Temperature Rise Across Compressor.**

$$\Delta T_c = T_{1c} \cdot \frac{(\Pi_c^{0,283} - 1)}{\eta_c}$$

|                       |                      |         |       |       |
|-----------------------|----------------------|---------|-------|-------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000    | 1480  | 2200  |
| <b>T<sub>1c</sub></b> | ot·min <sup>-1</sup> | 293,150 |       |       |
| <b>Π<sub>c</sub></b>  | kPa                  | 2,115   | 3,122 | 2,223 |
| <b>η<sub>c</sub></b>  | ot·min <sup>-1</sup> | 0,69    | 0,73  | 0,71  |
| <b>ΔT<sub>c</sub></b> | K                    | 100,3   | 152,7 | 104,7 |

**Teplota na výstupu z kompresoru - Compressor Outlet Temperature.**

$$T_{2c} = T_{1c} + \Delta T_c$$

|                       |                      |        |        |        |
|-----------------------|----------------------|--------|--------|--------|
| <b>n</b>              | ot·min <sup>-1</sup> | 1000   | 1480   | 2200   |
| <b>T<sub>1c</sub></b> | ot·min <sup>-1</sup> | 293,15 |        |        |
| <b>ΔT<sub>c</sub></b> | K                    | 100,3  | 152,7  | 104,7  |
| <b>T<sub>2c</sub></b> | K                    | 393,47 | 445,81 | 397,89 |

### Účinnost mezichladiče - Charge Cooler Efficiency.

Účinnost mezichladiče předpokládáme dle podobých motorů. Je použito chlazení typu vzduch – vzduch.

|                        |                      |       |      |      |
|------------------------|----------------------|-------|------|------|
| <b>n</b>               | ot·min <sup>-1</sup> | 1000  | 1480 | 2200 |
| <b>η<sub>cac</sub></b> | -                    | 0,900 | 0,85 | 0,8  |

### Teplota za mezichladičem - Charge Cooler Outlet temperature.

$$T_{2cac} = T_{2c} - \eta_{cac} \cdot (T_{2c} - T_{1x})$$

|                         |                      |               |               |               |
|-------------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>                | ot·min <sup>-1</sup> | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b>T<sub>2c</sub></b>   | K                    | 393,47        | 445,81        | 397,89        |
| <b>T<sub>1x</sub></b>   | K                    | 293,15        |               |               |
| <b>η<sub>cac</sub></b>  | K                    | 0,90          | 0,85          | 0,80          |
| <b>T<sub>2cac</sub></b> | ot·min <sup>-1</sup> | <b>303,18</b> | <b>316,05</b> | <b>314,10</b> |

### Teploty na vstupu do motoru - Engine Inlet Temperature.

$$T_{2cac} = T_{2c} - \eta_{cac} \cdot (T_{2c} - T_{1x})$$

|                        |                      |               |               |               |
|------------------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>               | ot·min <sup>-1</sup> | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b>T<sub>2c</sub></b>  | K                    | 393,47        | 445,81        | 397,89        |
| <b>T<sub>1x</sub></b>  | K                    | 293,15        |               |               |
| <b>η<sub>cac</sub></b> | K                    | 0,90          | 0,85          | 0,80          |
| <b>T<sub>1e</sub></b>  | K                    | <b>303,18</b> | <b>316,05</b> | <b>314,10</b> |



**Hustota vzduchu na vstupu do motoru - Engine Inlet Density.**

$$\rho_{1e} = \frac{P_{1e}}{(T_{1e} \cdot 0,287)}$$

|                       |                    |               |               |               |
|-----------------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>              | ot/min             | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b>P<sub>1e</sub></b> | kPa                | 201,54        | 294,09        | 205,46        |
| <b>T<sub>1e</sub></b> | K                  | 303,18        | 316,05        | 314,10        |
| <b>ρ<sub>1e</sub></b> | kg·m <sup>-3</sup> | <b>2,3162</b> | <b>3,2422</b> | <b>2,2792</b> |

**Plnicí účinnost - Volumetric efficiency**

$$\eta_{volEGR} = \eta_{pl} \cdot \left(1 - \frac{EGR}{100}\right)$$

|                           |        |        |       |       |
|---------------------------|--------|--------|-------|-------|
| <b>n</b>                  | ot/min | 1000   | 1480  | 2200  |
| <b>η<sub>vol</sub></b>    | -      | 0,880  | 0,900 | 0,890 |
| <b>EGR</b>                | %      | 7      | 15    | 10    |
| <b>η<sub>volEGR</sub></b> | -      | 0,8184 | 0,765 | 0,801 |

**Hmotnostní tok vzduchu motorem - Engine Air Flow.**

Plnicí účinnost použita dle předběžného výpočtu.

$$W_a = \frac{(\rho_{1e} \cdot \eta_{vol} \cdot V_z \cdot n)}{120}$$

|                           |                    |                |                |                |
|---------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>n</b>                  | ot/min             | 1000           | 1480           | 2200           |
| <b>ρ<sub>1e</sub></b>     | kg·m <sup>-3</sup> | 2,3162         | 3,2422         | 2,2792         |
| <b>η<sub>volEGR</sub></b> | -                  | 0,8184         | 0,765          | 0,801          |
| <b>V<sub>z</sub></b>      | l                  | 0,004156       |                |                |
| <b>W<sub>a</sub></b>      | g·s <sup>-1</sup>  | <b>0,06565</b> | <b>0,12713</b> | <b>0,13910</b> |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Korigovaný průtok kompresorem - Corrected Compressor Flow.**

$$W_c^* = W_a \cdot \left( \frac{T_{1c}}{298} \right)^{0,5} / \left( \frac{P_{1c}}{100} \right)$$

| n                                | ot/min                  | 1000           | 1480           | 2200           |
|----------------------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>W<sub>a</sub></b>             | <b>g·s<sup>-1</sup></b> | 0,0657         | 0,1271         | 0,1391         |
| <b>T<sub>1c</sub></b>            | <b>K</b>                | 293,15         | 293,15         | 293,15         |
| <b>P<sub>1c</sub></b>            | <b>kPa</b>              | 96             | 95             | 94             |
| <b>W<sub>c</sub><sup>*</sup></b> | <b>g·s<sup>-1</sup></b> | <b>0,06783</b> | <b>0,13273</b> | <b>0,14677</b> |

**Množství paliva motorem - Engine Fuel Flow.**

Vypočítám ho dle předpokládané měrné spotřeby paliva.

$$W_f = \frac{P \cdot BSFC}{(3600 \cdot 1000)}$$

| n                    | ot/min                                  | 1000           | 1480           | 2200           |
|----------------------|-----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>P</b>             | <b>kW</b>                               | 50,265         | 104,150        | 100,000        |
| <b>BSFC</b>          | <b>g·kW<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup></b> | 230            | 215            | 245            |
| <b>W<sub>f</sub></b> | <b>g·s<sup>-1</sup></b>                 | <b>0,00321</b> | <b>0,00622</b> | <b>0,00681</b> |

**Poměr vzduch/palivo - Air/Fuel Ratio.**

$$A / F = \frac{W_a}{W_f}$$

| n                    | ot/min                  | 1000         | 1480         | 2200         |
|----------------------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>W<sub>a</sub></b> | <b>g·s<sup>-1</sup></b> | 0,06565      | 0,12713      | 0,13910      |
| <b>W<sub>f</sub></b> | <b>g·s<sup>-1</sup></b> | 0,00321      | 0,00622      | 0,00681      |
| <b>A/F</b>           | <b>g·s<sup>-1</sup></b> | <b>20,44</b> | <b>20,44</b> | <b>20,44</b> |

**Teplota na výstupu z motoru - Engine outlet temperature.**

Teplota zjištěna z výpočtu tepelného cyklu a obdobného motoru.

| n                     | ot/min   | 1000       | 1480       | 2200       |
|-----------------------|----------|------------|------------|------------|
| <b>T<sub>1t</sub></b> | <b>K</b> | <b>820</b> | <b>926</b> | <b>886</b> |

**Hmotnostní tok turbínou - Turbine Mass Flow.**

$$W_t = W_a + W_f$$

| n                    | ot/min                  | 1000           | 1480           | 2200           |
|----------------------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>W<sub>a</sub></b> | <b>g·s<sup>-1</sup></b> | <b>0,06565</b> | <b>0,12713</b> | <b>0,1391</b>  |
| <b>W<sub>f</sub></b> | <b>g·s<sup>-1</sup></b> | <b>0,00321</b> | <b>0,00622</b> | <b>0,00681</b> |
| <b>W<sub>t</sub></b> | <b>g·s<sup>-1</sup></b> | <b>0,06886</b> | <b>0,13335</b> | <b>0,14591</b> |

**Mechanická účinnost turbíny - Turbine mechanical efficiency.**

Při první iteraci se odhadne, při dalších krocích se dodá reálná hodnota z turbínové mapy. První zvolená hodnota byla 0,65.

| n                     | ot/min   | 1000        | 1480       | 2200        |
|-----------------------|----------|-------------|------------|-------------|
| <b>η<sub>tm</sub></b> | <b>-</b> | <b>0,62</b> | <b>0,7</b> | <b>0,64</b> |

**Adiabatický pokles teploty v turbíně - Adiabatic Turbine Temperature Drop.**

$$\Delta T_{adt} = \frac{(0,882 \cdot \Delta T_c)}{\eta_{tm}}$$

| n                       | ot/min   | 1000          | 1480          | 2200          |
|-------------------------|----------|---------------|---------------|---------------|
| <b>ΔT<sub>c</sub></b>   | <b>K</b> | <b>100,32</b> | <b>152,66</b> | <b>104,74</b> |
| <b>η<sub>tm</sub></b>   | <b>-</b> | <b>0,62</b>   | <b>0,7</b>    | <b>0,64</b>   |
| <b>ΔT<sub>adt</sub></b> | <b>K</b> | <b>142,71</b> | <b>192,35</b> | <b>144,34</b> |

**Expanzní poměr na turbíně - Turbine Pressure ratio.**

$$\Pi_t^{0,25} = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{\Delta T_{adt}}{T_{1t}}\right)\right)}$$

|                                    |        |               |               |               |
|------------------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>                           | ot/min | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b><math>\Delta T_{adt}</math></b> | K      | 142,71        | 192,35        | 144,34        |
| <b><math>T_{1t}</math></b>         | K      | 820           | 926           | 886           |
| <b><math>\Pi_t^{0,25}</math></b>   | -      | <b>1,2107</b> | <b>1,2622</b> | <b>1,1946</b> |

$$\Pi_t = \left(\Pi_t^{0,25}\right)^4$$

|                                  |        |               |               |               |
|----------------------------------|--------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>                         | ot/min | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b><math>\Pi_t^{0,25}</math></b> | -      | 1,2107        | 1,2622        | 1,1946        |
| <b><math>\Pi_t</math></b>        | -      | <b>2,1486</b> | <b>2,5379</b> | <b>2,0367</b> |

**Výstupní tlak na turbíně - Turbine Outlet pressure.**

$$P_{2t} = P_0 + P_{exh}$$

|                             |            |            |            |            |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>n</b>                    | ot/min     | 1000       | 1480       | 2200       |
| <b><math>P_0</math></b>     | kPa        | 100        |            |            |
| <b><math>P_{exh}</math></b> | kPa        | 5          | 5          | 5          |
| <b><math>P_{2t}</math></b>  | <b>kPa</b> | <b>105</b> | <b>105</b> | <b>105</b> |

**Vstupní tlak na turbíně - Turbine Inlet Pressure.**

$$P_{1t} = \Pi_t \cdot P_{2t}$$

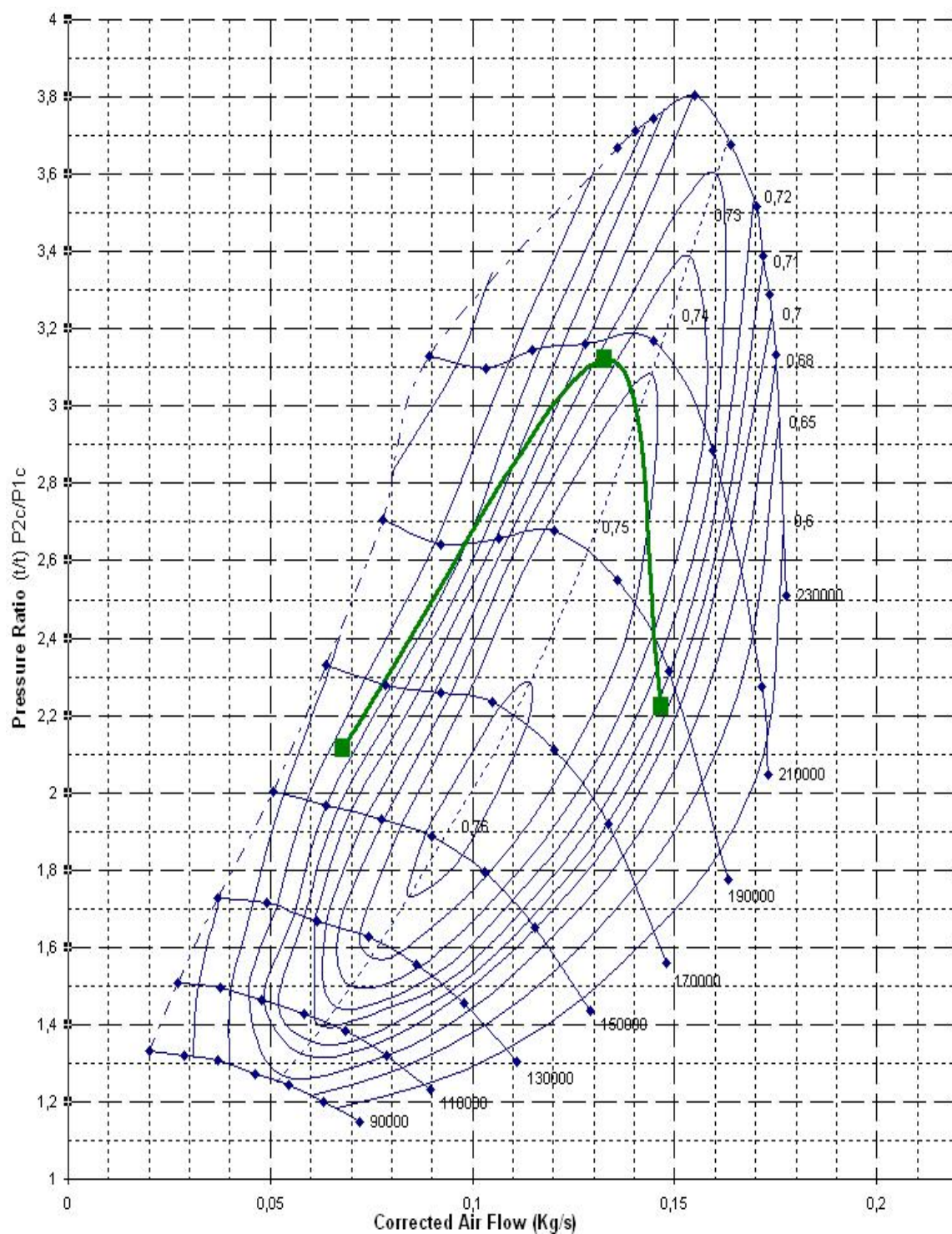
|                            |            |               |               |               |
|----------------------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>n</b>                   | ot/min     | 1000          | 1480          | 2200          |
| <b><math>\Pi_t</math></b>  | -          | 2,1486        | 2,5379        | 2,0367        |
| <b><math>P_{2t}</math></b> | kPa        | 105           | 105           | 105           |
| <b><math>P_{1t}</math></b> | <b>kPa</b> | <b>225,61</b> | <b>266,48</b> | <b>213,85</b> |

**Redukovaný hmotnostní tok turbínou - Corrected Turbine Flow.**

$$W_t^* = (1 - EGR) \cdot W_t \cdot \sqrt{\frac{T_{1t}}{288,3}} \cdot \frac{101,32}{P_{1t}}$$

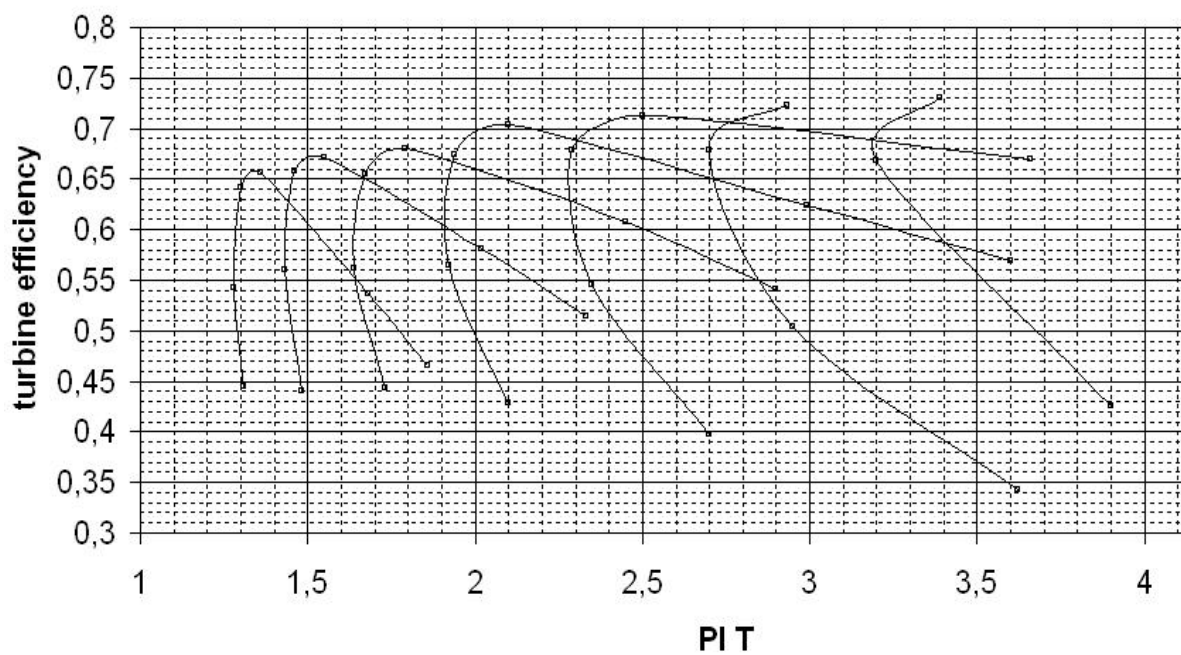
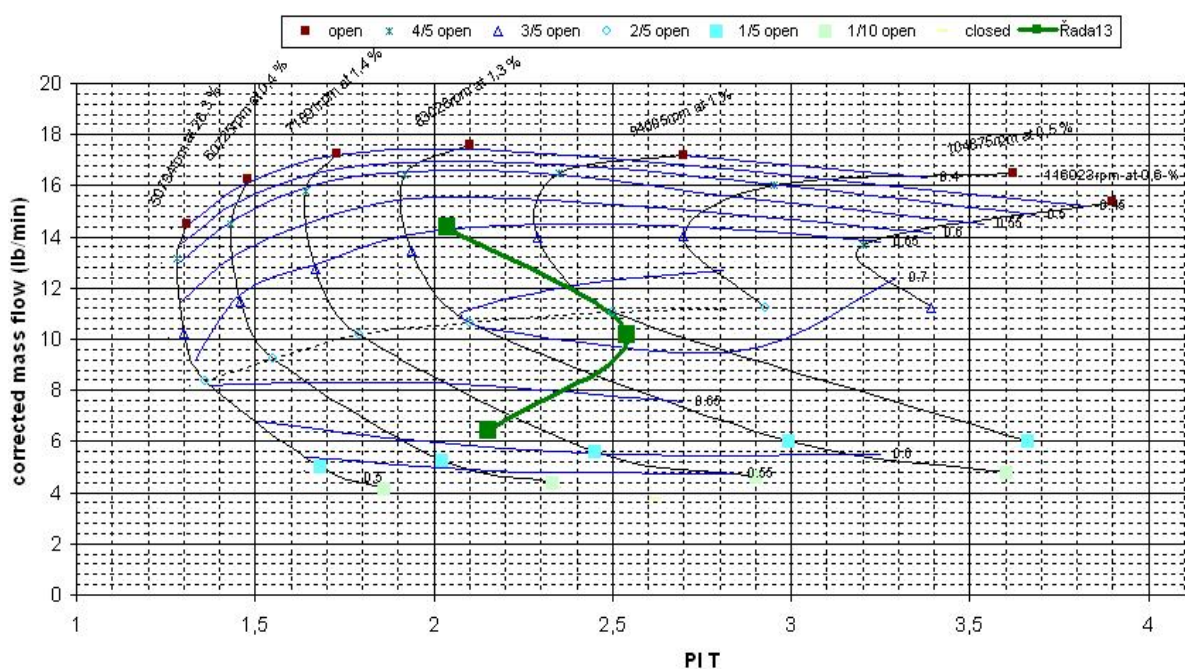
| n                                | ot/min                     | 1000           | 1480           | 2200           |
|----------------------------------|----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>W<sub>t</sub></b>             | <b>g·s<sup>-1</sup></b>    | 0,06886        | 0,13335        | 0,14591        |
| <b>T<sub>1t</sub></b>            | <b>K</b>                   | 820            | 926            | 886            |
| <b>P<sub>1t</sub></b>            | <b>kPa</b>                 | 226            | 266            | 214            |
| <b>W<sub>t</sub><sup>*</sup></b> | <b>g·s<sup>-1</sup></b>    | <b>0,04851</b> | <b>0,07724</b> | <b>0,10907</b> |
| <b>W<sub>t</sub><sup>*</sup></b> | <b>lb·min<sup>-1</sup></b> | <b>6,42</b>    | <b>10,22</b>   | <b>14,43</b>   |

# Kompresorová mapa – Compressor Map





## Turbínová mapa – Turbine Map





DIPLOMOVÁ PRÁCE





## Závěr

Navržené řešení přeplňování za pomoci turbodmychadla s variabilními lopatkami se sice mírně odchyluje od prvotního zadání turbodmychadla s přepouštěcím ventilem, které nám nevyhovovalo z důvodů potřeb recirkulace ve všech režimech, ale zase nám přináší mnoho výhod.

Mezi podstatné výhody patří přesnější řízení recirkulace spalin což má pozitivní vliv na emise, dále snížení měrné spotřeby ve vyšších otáčkách díky menšímu odporu který klade turbodmychadlo spalínám, ale také možnost pružněji upravovat výkonové charakteristiky bez nutnosti měnit turbodmychadlo. Závěrem tedy můžeme říci, že se jedná o vhodnou variantu přeplňování, která koresponduje s moderními trendy jak z hlediska pružnosti motoru už v nízkých otáčkách, poskytující dostatečný výkonu porovnatelný s konkurencí a zároveň s dobrým předpokladem pro splnění aktuálních emisních limitů.



DIPLOMOVÁ PRÁCE



### Seznam použitých zdrojů.

- [ 1 ] Hofmann K., Regulované přeplňování vozidlových motorů, Ústav dopravní techniky FSI-VUT, Brno 2000
- [ 2 ] Štoss M., Spalovací motory I, Ústav dopravní techniky FSI-VUT, Brno 1992
- [ 3 ] Kliment V., Naftový motor přeplňovaný turbodmychadlem, Praha 1989
- [ 4 ] Pavelek M. a kol., Termomechanika, Fakulta strojního inženýrství FSI-VUT, Brno 2003
- [ 5 ] Svoboda P., Brandejs J., Kovářík R., Sobek E. Základy strojnictví a konstruování Výběr z norem pro konstrukční cvičení, Fakulta strojní 1999
- [ 6 ] Vlk F., Vozidlové spalovací motory, vlastním nákladem, Brno 2003
- [ 7 ] Sbírka školících prezentací firmy Honeywell



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Seznam použitých zkratk a symbolů****Předběžný výpočet**

| symbol      | jednotka                                             | název                                         |
|-------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| $C_{Pcomb}$ | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | měrná tepelná kapacita směsi vzduchu a spalin |
| $C_{Pegr}$  | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | měrná tepelná kapacita spalin                 |
| $C_{Ppair}$ | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | měrná tepelná kapacita vzduchu                |
| $c_s$       | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                       | střední pístová rychlost                      |
| $D$         | mm                                                   | vrtání                                        |
| $EGR$       | %                                                    | množství recirkulujících plynů                |
| $H$         | mm                                                   | zdvih                                         |
| $H_{isT}$   | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$                     | isoentropický spád na turbíně                 |
| $H_u$       | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$                     | spodní výhřevnost paliva                      |
| $i$         | -                                                    | počet válců motoru                            |
| $L_t$       | $\text{kg}_L \cdot \text{kg}_P^{-1}$                 | hm. vzduchu pro spálení 1kg paliva            |
| $m_{air}$   | -                                                    | poměrné množství vzduchu v sání               |
| $m_{EGR}$   | -                                                    | poměrné množství spalin v sání                |
| $m_k$       | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$                      | hmotnostní tok vzduchu kompresorem            |
| $M_k$       | Nm                                                   | Kroutící moment                               |
| $M_p$       | $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$                       | časová spotřeba paliva                        |
| $m_{pe}$    | $\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  | měrná spotřeba paliva                         |
| $M_t$       | %                                                    | převýšení kroutícího momentu                  |
| $m_v$       | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$                      | hmotnostní tok turbínou                       |
| $n$         | $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$                    | otáčky                                        |
| $P$         | kW                                                   | výkon                                         |
| $p_a$       | MPa                                                  | atmosferický tlak                             |
| $P_c$       | kW                                                   | příkon dmyhadla                               |
| $p_e$       | Mpa                                                  | střední efektivní tlak na píst                |
| $p_{k1}$    | MPa                                                  | tlak na vstupu do kompresoru                  |
| $p_{k2}$    | MPa                                                  | tlak na výstupu z kompresoru                  |
| $p_s$       | MPa                                                  | tlak plnicího vzduchu                         |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|                |                                |                                                 |
|----------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|
| $P_T$          | kW                             | výkon turbíny                                   |
| $P_{T1}$       | MPa                            | tlak na výstupu turbíny                         |
| $P_{T2}$       | MPa                            | tlak na vstupu turbíny                          |
| $r_s$          | $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ | plynová konstanta                               |
| $r_{vp}$       | $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ | plynová konstanta spalín                        |
| $T_{air}$      | K                              | teplota vzduchu za mezichladičem                |
| $T_{egr}$      | K                              | teplota vzduchu z EGR větve                     |
| $T_{eng}$      | K                              | teplota vzduchu po přímíchání spalín            |
| $T_{k1}$       | $^{\circ}C$                    | okolní teplota                                  |
| $T_{T1}$       | K                              | teplota výfukových plynů                        |
| $T_{w1}$       | $^{\circ}C$                    | teplota chladícího vzduchu                      |
| $V$            | $dm^3$                         | zdvihový objem motoru                           |
| $W_{kc}$       | $kJ \cdot kg^{-1}$             | měrná energie pro stlačení 1kg vzduchu          |
| $\alpha$       | -                              | stupeň vypláchnutí spalovacího prostoru         |
| $\beta$        | -                              | impulzní součinitel provozu turbíny             |
| $\Delta p$     | MPa                            | pokles v sání                                   |
| $\Delta p_v$   | kPa                            | tlaková ztráta ve výfukovém potrubí             |
| $\Delta p_z$   | MPa                            | tlaková ztráta v mezichladiči                   |
| $\varepsilon$  | -                              | kompresní poměr                                 |
| $\zeta$        | -                              | součinitel odporu turbíny                       |
| $\eta_e$       | -                              | efektivní účinnost motoru                       |
| $\eta_{ch}$    | -                              | účinnost mezichladiče                           |
| $\eta_i$       | -                              | indikovaná účinnost motoru                      |
| $\eta_{KS}$    | -                              | izoentropické účinnost kompresoru               |
| $\eta_m$       | -                              | mechanická účinnost motoru                      |
| $\eta_{mT}$    | -                              | mechanická účinnost turbíny                     |
| $\eta_{pl}$    | -                              | plnicí účinnost                                 |
| $\eta_{plEGR}$ | -                              | upravená plnicí účinnost při recirkulaci spalín |
| $\eta_T$       | -                              | vnitřní účinnost turbíny                        |
| $\eta_{TDc}$   | -                              | celková účinnost turbodmychadla                 |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|             |                               |                                              |
|-------------|-------------------------------|----------------------------------------------|
| $K_s$       | -                             | izoentropický koeficient pro vzduch          |
| $K_{vp}$    | -                             | adiabatický exponent spalin                  |
| $\lambda$   | -                             | součinitel přebytku vzduchu                  |
| $\mu$       | -                             | průtpkový součinitel provozu turbíny         |
| $\Pi_c$     | -                             | kompresní poměr kompresoru                   |
| $\Pi_T$     | -                             | expanzní poměr na turbíně                    |
| $\rho_s$    | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | hustota plnícího vzduchu                     |
| $\tau$      | -                             | taktnost motoru                              |
| $\Phi_{pr}$ | -                             | součinitel propláchnutí spalovacího prostoru |

## Výpočet oběhu a stanovení parametrů přeplňování

| symbol     | jednotka                                          | název                                                  |
|------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $C$        | -                                                 | chemické označení uhlíku                               |
| $C_{p.sp}$ | $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  | měrná tepelná kapacita spalin                          |
| $C_{p.vz}$ | $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  | měrná tepelná kapacita vzduchu                         |
| $D$        | mm                                                | Vrtání válce                                           |
| $H$        | -                                                 | chemické označení vodíku                               |
| $H_m$      | mm                                                | Zdvih pístu                                            |
| $L_{oj}$   | mm                                                | Délka ojnice                                           |
| $m_1$      | -                                                 | tvarový součinitel                                     |
| $M_1$      | $\text{kmol}\cdot\text{kg}^{-1}$                  | skut. molární množství vz. připadajícího na 1kg paliva |
| $M_{Lo}$   | $\text{kmol}\cdot\text{kg}^{-1}$                  | teor mn. vzduchu pro spálení 1kg paliva                |
| $M_{vzd}$  | $\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$                  | zdánlivá molární hmotnost vzduchu                      |
| $n_1$      | -                                                 | exponent polytropy komprese                            |
| $n_2$      | -                                                 | exponent polytropy expanze                             |
| $n_v$      | -                                                 | Počet válců                                            |
| $p_a$      | kPa                                               | atmosferický tlak                                      |
| $p_{rez}$  | kPa                                               | předpokládaný tlak zbytkových plynů                    |
| $r$        | $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$   | plynová konsta vzduchu                                 |
| $R$        | $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kmol}^{-1}$ | univerzální plynová konstanta                          |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|                |                                |                                                   |
|----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|
| $r'$           | $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ | plynová konstanta spalin                          |
| $r_k$          | mm                             | rameno kliky klikového hřídele                    |
| $S$            | -                              | chemické označení díry                            |
| $T_{1z.teor}$  | K                              | teplota vzduchu na konci plnění válce             |
| $T_a$          | $^{\circ}C$                    | okolní teplota                                    |
| $T_{pl}$       | K                              | plnicí teplota                                    |
| $T_{rez}$      | K                              | teplota zbytkových výfukových plynů               |
| $V$            | $dm^3$                         | Zdvihový objem motoru                             |
| $V_c$          | $dm^3$                         | kompresní objem jednoho válce                     |
| $V_H$          | $dm^3$                         | zdvihový objem jednoho válce                      |
| $V_M$          | $dm^3$                         | celkový objem jednoho válce                       |
| $\gamma_r$     | -                              | koeficient reziduálních plynů                     |
| $\Delta T_1$   | K                              | ohřátí vzduchu o stěny válce                      |
| $\Delta T_s$   | K                              | změna teploty směsi v plnicím potrubí             |
| $\epsilon_z$   | -                              | Kompresní poměr                                   |
| $\eta_{pl}$    | -                              | plnicí účinnost                                   |
| $\kappa$       | -                              | exponenta adiabaty                                |
| $\lambda$      | -                              | součinitel přebytku vzduchu                       |
| $\lambda_{kl}$ | mm                             | klikový poměr motoru                              |
| $\mu_p$        | $kg \cdot kmol^{-1}$           | molekulová hmotnost uhlovodíkových paliv          |
| $\sigma_T$     | -                              | teoretický směšovací poměr                        |
| $\tau$         | -                              | Taktnost motoru                                   |
| $\phi_i$       | -                              | součinitel plnosti cyklu                          |
| $\Phi_{rez}$   | -                              | součinitel znečištění směsi od reziduálních plynů |
| $M_{p1}$       | g                              | spotřeba paliva na jeden termodynamický cyklus    |
| $m'_z$         | kg                             | specifická efektivní spotřeba vzduchu             |
| $m_z$          | $g \cdot sec^{-1}$             | hmotnostní tok vzduchu motorem                    |
| $i$            | -                              | počet válců motoru                                |
| $M_{CO}$       | $kmol \cdot kg^{-1}$           | molární množství oxidu uhelnatého                 |
| $M_{CO_2}$     | $kmol \cdot kg^{-1}$           | molární množství oxidu uhličitého                 |





## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|                  |                                     |                                                        |
|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $M_{H_2}$        | $\text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  | molární množství nevázaného vodíku                     |
| $M_{H_2O}$       | $\text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  | molární množství vody(vodních par)                     |
| $M_{N_2}$        | $\text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  | molární množství dusíku                                |
| $M_{O_2}$        | $\text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  | Molární množství kyslíku                               |
| $M_{2\lambda 1}$ | $\text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  | mol. mn. výfukových plynů při nulovém přebytku vzduchu |
| $M_2$            | $\text{kmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  | celkové molární množství výfukových plynů              |
| $r_{M2}$         | -                                   | poměrné zastoupení spalin ve výfukových plynech        |
| $r_L$            | -                                   | poměrné zastoupení vzduchu ve výfukových plynech       |
| $H_u$            | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$    | spodní výhřevnost paliva                               |
| $\Delta H_u$     | $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$     | změna výhřevnosti paliva při $\lambda < 1$             |
| $\Delta dis$     | %                                   | změna přivedeného tepla disociací paliva               |
| $\Delta odv$     | %                                   | změna přivedeného tepla odvodem do stěn válce          |
| $\xi_z$          | -                                   | koeficient sk využití tepla přivedeného v palivu       |
| $q$              | $\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$  | skutečně využitě teplo přivedené v palivu              |
| $\mu$            | $\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$  | skutečný součinitel molární změny                      |
| $\Phi_t$         | °                                   | úhel předstihu vstřiku                                 |
| $\Delta_2$       | °                                   | doba hoření                                            |
| $v_0$            | $\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$ | molární objem nasáté směsi                             |
| $\psi_i$         | -                                   | Poměrná změna objemu při pootočení klikového hřídele   |
| $v$              | $\text{m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$ | molární objem při pootočení klikového hřídele          |
| $V$              | $\text{dm}^3$                       | geometrický objem při pootočení klikového hřídele      |
| $m_{cv.vz}$      |                                     | tepelná kapacita vzduchu                               |
| $m_{cv.sp}$      |                                     | tepelná kapacita spalin                                |
| $m_{cv.celk}$    |                                     | tepelná kapacita směsi                                 |
| $T_k$            | K                                   | teplota při kompresi                                   |
| $p_k$            | Mpa                                 | tlak při expanzi                                       |
| $\Delta \alpha$  | °                                   | prodleva vznětu                                        |
| $C_1$            | -                                   | konstanta prodlevy vznětu                              |
| $\alpha_{hz}$    | °                                   | natočení klikového hřídele při začátku hoření          |



|               |   |                                                       |
|---------------|---|-------------------------------------------------------|
| $\alpha_{hk}$ | ° | natočení klikového hřídele na konci hoření            |
| $w$           | J | uvolněné teplo hořením dle natočení klikového hřídele |

### Spolupráce kompresoru, motoru a turbíny

| symbol           | jednotka                      | název                                |
|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| $P_0$            | kPa                           | atmosferický tlak                    |
| $\Delta P_{in}$  | kPa                           | Tlaková ztráta v sání                |
| $P_{1c}$         | kPa                           | Tlak na vstupu kompresoru            |
| $\Pi_c$          | -                             | Kompresní poměr kompresoru           |
| $P_{2c}$         | kPa                           | Výstupní tlak kompresoru             |
| $\Delta P_{cc}$  | kPa                           | Pokles tlaku v mezichladiči          |
| $P_{1e}$         | kPa                           | Vstupní tlak do motoru               |
| $T_{1c}$         | K                             | Vstupní teplota do kompresoru        |
| $\eta_c$         | -                             | Účinnost kompresoru                  |
| $\Delta T_c$     | K                             | Nárůst teploty v kompresoru          |
| $T_{2c}$         | K                             | Teplota na výstupu z kompresoru      |
| $\eta_{cac}$     | -                             | Účinnost mezichladiče                |
| $T_{2c}$         | K                             | Teplota za mezichladičem             |
| $T_{1e}$         | K                             | Teploty na vstupu do motoru          |
| $\rho_{1e}$      | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | Hustota vzduchu na vstupu do motoru  |
| $W_a$            | $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$  | Hmotnostní tok vzduchu motorem       |
| $W_c^*$          | $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$  | Korigovaný průtok kompresorem        |
| $W_f$            | $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$  | Hmotnostní tok paliva motorem        |
| $A/F$            | -                             | Poměr vzduch/palivo                  |
| $T_{1t}$         | K                             | Teplota na výstupu z motoru          |
| $W_t$            | $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$  | Hmotnostní tok turbínou              |
| $\eta_{tm}$      | -                             | Mechanická účinnost turbíny          |
| $\Delta T_{adt}$ | K                             | Adiabatický pokles teploty v turbíně |
| $\Pi_t$          | -                             | Expanzní poměr na turbíně            |
| $P_{2t}$         | kPa                           | Výstupní tlak na turbíně             |



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**$P_{1t}$**

kPa

Vstupní tlak na turbíně

**$W_t^*$**

$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$

Redukovaný hmotnostní tok turbínou



DIPLOMOVÁ PRÁCE



**Seznam příloh:**

- A. Vypočtené hodnoty tepelných cyklů
- B. Výkres návrhu koncepčního uspořádání přeplňování
- C. Výkres Komory sání.



DIPLOMOVÁ PRÁCE



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

## Vypočtená data tepelného cyklu pro případ 1480ot.

| $\alpha$ | $\psi$ | $V$  | $v$   | $T_k$  | $\kappa_1$ | $n_1$ | $p_k$  |
|----------|--------|------|-------|--------|------------|-------|--------|
| 180      | 16,00  | 1,11 | 10,13 | 326,49 | 1,392      | 1,372 | 0,2674 |
| 181      | 16,00  | 1,11 | 10,13 | 326,50 | 1,392      | 1,372 | 0,2674 |
| 182      | 16,00  | 1,11 | 10,13 | 326,52 | 1,392      | 1,372 | 0,2675 |
| 183      | 15,99  | 1,11 | 10,13 | 326,55 | 1,392      | 1,372 | 0,2676 |
| 184      | 15,99  | 1,11 | 10,12 | 326,59 | 1,392      | 1,372 | 0,2677 |
| 185      | 15,98  | 1,11 | 10,12 | 326,65 | 1,392      | 1,372 | 0,2679 |
| 186      | 15,97  | 1,11 | 10,11 | 326,72 | 1,392      | 1,372 | 0,2681 |
| 187      | 15,96  | 1,11 | 10,11 | 326,80 | 1,392      | 1,372 | 0,2683 |
| 188      | 15,95  | 1,10 | 10,10 | 326,89 | 1,392      | 1,372 | 0,2686 |
| 189      | 15,93  | 1,10 | 10,09 | 327,00 | 1,392      | 1,372 | 0,2689 |
| 190      | 15,92  | 1,10 | 10,08 | 327,12 | 1,392      | 1,372 | 0,2693 |
| 191      | 15,90  | 1,10 | 10,07 | 327,25 | 1,392      | 1,372 | 0,2697 |
| 192      | 15,88  | 1,10 | 10,06 | 327,40 | 1,392      | 1,372 | 0,2701 |
| 193      | 15,86  | 1,10 | 10,04 | 327,55 | 1,392      | 1,372 | 0,2706 |
| 194      | 15,84  | 1,10 | 10,03 | 327,73 | 1,392      | 1,372 | 0,2712 |
| 195      | 15,81  | 1,10 | 10,02 | 327,91 | 1,392      | 1,372 | 0,2717 |
| 196      | 15,79  | 1,09 | 10,00 | 328,11 | 1,392      | 1,372 | 0,2723 |
| 197      | 15,76  | 1,09 | 9,98  | 328,32 | 1,392      | 1,372 | 0,273  |
| 198      | 15,73  | 1,09 | 9,96  | 328,54 | 1,392      | 1,372 | 0,2737 |
| 199      | 15,70  | 1,09 | 9,94  | 328,78 | 1,392      | 1,372 | 0,2744 |
| 200      | 15,67  | 1,09 | 9,92  | 329,03 | 1,392      | 1,372 | 0,2752 |
| 201      | 15,64  | 1,08 | 9,90  | 329,30 | 1,392      | 1,372 | 0,276  |
| 202      | 15,60  | 1,08 | 9,88  | 329,58 | 1,392      | 1,372 | 0,2768 |
| 203      | 15,56  | 1,08 | 9,86  | 329,87 | 1,392      | 1,372 | 0,2777 |
| 204      | 15,52  | 1,08 | 9,83  | 330,18 | 1,392      | 1,372 | 0,2787 |
| 205      | 15,48  | 1,07 | 9,81  | 330,50 | 1,392      | 1,372 | 0,2797 |
| 206      | 15,44  | 1,07 | 9,78  | 330,83 | 1,392      | 1,372 | 0,2807 |
| 207      | 15,40  | 1,07 | 9,75  | 331,18 | 1,392      | 1,372 | 0,2818 |
| 208      | 15,35  | 1,06 | 9,72  | 331,55 | 1,392      | 1,372 | 0,283  |
| 209      | 15,31  | 1,06 | 9,69  | 331,93 | 1,392      | 1,372 | 0,2842 |
| 210      | 15,26  | 1,06 | 9,66  | 332,32 | 1,392      | 1,372 | 0,2854 |
| 211      | 15,21  | 1,05 | 9,63  | 332,73 | 1,392      | 1,372 | 0,2867 |
| 212      | 15,15  | 1,05 | 9,60  | 333,16 | 1,392      | 1,372 | 0,2881 |
| 213      | 15,10  | 1,05 | 9,56  | 333,60 | 1,392      | 1,372 | 0,2895 |
| 214      | 15,04  | 1,04 | 9,53  | 334,05 | 1,392      | 1,372 | 0,291  |
| 215      | 14,99  | 1,04 | 9,49  | 334,53 | 1,392      | 1,372 | 0,2925 |
| 216      | 14,93  | 1,03 | 9,45  | 335,02 | 1,392      | 1,372 | 0,2941 |
| 217      | 14,87  | 1,03 | 9,42  | 335,52 | 1,392      | 1,372 | 0,2957 |
| 218      | 14,81  | 1,03 | 9,38  | 336,04 | 1,392      | 1,372 | 0,2974 |
| 219      | 14,74  | 1,02 | 9,34  | 336,58 | 1,392      | 1,372 | 0,2992 |
| 220      | 14,68  | 1,02 | 9,30  | 337,14 | 1,392      | 1,372 | 0,301  |
| 221      | 14,61  | 1,01 | 9,25  | 337,71 | 1,392      | 1,372 | 0,3029 |
| 222      | 14,54  | 1,01 | 9,21  | 338,30 | 1,392      | 1,372 | 0,3049 |
| 223      | 14,47  | 1,00 | 9,16  | 338,91 | 1,392      | 1,372 | 0,3069 |
| 224      | 14,40  | 1,00 | 9,12  | 339,54 | 1,392      | 1,372 | 0,309  |
| 225      | 14,33  | 0,99 | 9,07  | 340,18 | 1,392      | 1,372 | 0,3112 |
| 226      | 14,25  | 0,99 | 9,03  | 340,85 | 1,392      | 1,372 | 0,3134 |
| 227      | 14,17  | 0,98 | 8,98  | 341,53 | 1,392      | 1,372 | 0,3157 |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|     |       |      |      |        |       |       |        |
|-----|-------|------|------|--------|-------|-------|--------|
| 228 | 14,10 | 0,98 | 8,93 | 342,24 | 1,392 | 1,372 | 0,3181 |
| 229 | 14,02 | 0,97 | 8,88 | 342,96 | 1,392 | 1,372 | 0,3206 |
| 230 | 13,93 | 0,97 | 8,82 | 343,70 | 1,392 | 1,372 | 0,3232 |
| 231 | 13,85 | 0,96 | 8,77 | 344,47 | 1,392 | 1,372 | 0,3259 |
| 232 | 13,77 | 0,95 | 8,72 | 345,25 | 1,392 | 1,372 | 0,3286 |
| 233 | 13,68 | 0,95 | 8,66 | 346,06 | 1,392 | 1,372 | 0,3315 |
| 234 | 13,59 | 0,94 | 8,61 | 346,88 | 1,392 | 1,372 | 0,3344 |
| 235 | 13,50 | 0,94 | 8,55 | 347,73 | 1,392 | 1,372 | 0,3374 |
| 236 | 13,41 | 0,93 | 8,49 | 348,60 | 1,392 | 1,372 | 0,3406 |
| 237 | 13,32 | 0,92 | 8,44 | 349,50 | 1,392 | 1,372 | 0,3438 |
| 238 | 13,23 | 0,92 | 8,38 | 350,41 | 1,391 | 1,371 | 0,3472 |
| 239 | 13,13 | 0,91 | 8,32 | 351,35 | 1,391 | 1,371 | 0,3506 |
| 240 | 13,03 | 0,90 | 8,25 | 352,32 | 1,391 | 1,371 | 0,3542 |
| 241 | 12,94 | 0,90 | 8,19 | 353,31 | 1,391 | 1,371 | 0,3579 |
| 242 | 12,84 | 0,89 | 8,13 | 354,32 | 1,391 | 1,371 | 0,3617 |
| 243 | 12,74 | 0,88 | 8,07 | 355,36 | 1,391 | 1,371 | 0,3656 |
| 244 | 12,63 | 0,87 | 8,00 | 356,43 | 1,391 | 1,371 | 0,3697 |
| 245 | 12,53 | 0,87 | 7,93 | 357,52 | 1,391 | 1,371 | 0,3739 |
| 246 | 12,42 | 0,86 | 7,87 | 358,64 | 1,391 | 1,371 | 0,3783 |
| 247 | 12,32 | 0,85 | 7,80 | 359,78 | 1,391 | 1,371 | 0,3828 |
| 248 | 12,21 | 0,85 | 7,73 | 360,95 | 1,391 | 1,371 | 0,3874 |
| 249 | 12,10 | 0,84 | 7,66 | 362,16 | 1,391 | 1,371 | 0,3922 |
| 250 | 11,99 | 0,83 | 7,59 | 363,39 | 1,391 | 1,371 | 0,3972 |
| 251 | 11,88 | 0,82 | 7,52 | 364,65 | 1,391 | 1,371 | 0,4023 |
| 252 | 11,76 | 0,81 | 7,45 | 365,94 | 1,391 | 1,371 | 0,4076 |
| 253 | 11,65 | 0,81 | 7,38 | 367,26 | 1,391 | 1,371 | 0,4131 |
| 254 | 11,53 | 0,80 | 7,30 | 368,62 | 1,391 | 1,371 | 0,4188 |
| 255 | 11,42 | 0,79 | 7,23 | 370,00 | 1,391 | 1,371 | 0,4247 |
| 256 | 11,30 | 0,78 | 7,16 | 371,42 | 1,391 | 1,371 | 0,4307 |
| 257 | 11,18 | 0,77 | 7,08 | 372,87 | 1,391 | 1,371 | 0,437  |
| 258 | 11,06 | 0,77 | 7,00 | 374,36 | 1,391 | 1,371 | 0,4435 |
| 259 | 10,94 | 0,76 | 6,93 | 375,88 | 1,39  | 1,37  | 0,4503 |
| 260 | 10,82 | 0,75 | 6,85 | 377,44 | 1,39  | 1,37  | 0,4572 |
| 261 | 10,69 | 0,74 | 6,77 | 379,04 | 1,39  | 1,37  | 0,4645 |
| 262 | 10,57 | 0,73 | 6,69 | 380,67 | 1,39  | 1,37  | 0,4719 |
| 263 | 10,44 | 0,72 | 6,61 | 382,34 | 1,39  | 1,37  | 0,4797 |
| 264 | 10,32 | 0,71 | 6,53 | 384,05 | 1,39  | 1,37  | 0,4877 |
| 265 | 10,19 | 0,71 | 6,45 | 385,80 | 1,39  | 1,37  | 0,496  |
| 266 | 10,06 | 0,70 | 6,37 | 387,59 | 1,39  | 1,37  | 0,5046 |
| 267 | 9,94  | 0,69 | 6,29 | 389,42 | 1,39  | 1,37  | 0,5136 |
| 268 | 9,81  | 0,68 | 6,21 | 391,29 | 1,39  | 1,37  | 0,5228 |
| 269 | 9,68  | 0,67 | 6,13 | 393,21 | 1,39  | 1,37  | 0,5325 |
| 270 | 9,55  | 0,66 | 6,05 | 395,18 | 1,39  | 1,37  | 0,5424 |
| 271 | 9,42  | 0,65 | 5,96 | 397,18 | 1,39  | 1,37  | 0,5528 |
| 272 | 9,28  | 0,64 | 5,88 | 399,24 | 1,389 | 1,369 | 0,5635 |
| 273 | 9,15  | 0,63 | 5,80 | 401,34 | 1,389 | 1,369 | 0,5747 |
| 274 | 9,02  | 0,62 | 5,71 | 403,50 | 1,389 | 1,369 | 0,5863 |
| 275 | 8,88  | 0,62 | 5,63 | 405,70 | 1,389 | 1,369 | 0,5983 |
| 276 | 8,75  | 0,61 | 5,54 | 407,96 | 1,389 | 1,369 | 0,6109 |
| 277 | 8,62  | 0,60 | 5,46 | 410,26 | 1,389 | 1,369 | 0,6239 |
| 278 | 8,48  | 0,59 | 5,37 | 412,63 | 1,389 | 1,369 | 0,6374 |
| 279 | 8,35  | 0,58 | 5,29 | 415,04 | 1,389 | 1,369 | 0,6515 |





## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|     |      |      |      |        |       |       |        |
|-----|------|------|------|--------|-------|-------|--------|
| 280 | 8,21 | 0,57 | 5,20 | 417,52 | 1,389 | 1,369 | 0,6662 |
| 281 | 8,08 | 0,56 | 5,12 | 420,05 | 1,389 | 1,369 | 0,6814 |
| 282 | 7,94 | 0,55 | 5,03 | 422,64 | 1,388 | 1,368 | 0,6973 |
| 283 | 7,81 | 0,54 | 4,94 | 425,29 | 1,388 | 1,368 | 0,7139 |
| 284 | 7,67 | 0,53 | 4,86 | 428,01 | 1,388 | 1,368 | 0,7311 |
| 285 | 7,54 | 0,52 | 4,77 | 430,79 | 1,388 | 1,368 | 0,7491 |
| 286 | 7,40 | 0,51 | 4,69 | 433,63 | 1,388 | 1,368 | 0,7679 |
| 287 | 7,26 | 0,50 | 4,60 | 436,55 | 1,388 | 1,368 | 0,7874 |
| 288 | 7,13 | 0,49 | 4,51 | 439,53 | 1,388 | 1,368 | 0,8079 |
| 289 | 6,99 | 0,48 | 4,43 | 442,58 | 1,387 | 1,367 | 0,8292 |
| 290 | 6,86 | 0,48 | 4,34 | 445,70 | 1,387 | 1,367 | 0,8515 |
| 291 | 6,72 | 0,47 | 4,26 | 448,90 | 1,387 | 1,367 | 0,8747 |
| 292 | 6,59 | 0,46 | 4,17 | 452,18 | 1,387 | 1,367 | 0,8991 |
| 293 | 6,46 | 0,45 | 4,09 | 455,53 | 1,387 | 1,367 | 0,9245 |
| 294 | 6,32 | 0,44 | 4,00 | 458,97 | 1,387 | 1,367 | 0,9511 |
| 295 | 6,19 | 0,43 | 3,92 | 462,48 | 1,386 | 1,366 | 0,979  |
| 296 | 6,06 | 0,42 | 3,84 | 466,09 | 1,386 | 1,366 | 1,0081 |
| 297 | 5,93 | 0,41 | 3,75 | 469,77 | 1,386 | 1,366 | 1,0387 |
| 298 | 5,79 | 0,40 | 3,67 | 473,55 | 1,386 | 1,366 | 1,0707 |
| 299 | 5,66 | 0,39 | 3,59 | 477,42 | 1,386 | 1,366 | 1,1043 |
| 300 | 5,53 | 0,38 | 3,51 | 481,38 | 1,386 | 1,366 | 1,1395 |
| 301 | 5,41 | 0,37 | 3,42 | 485,43 | 1,385 | 1,365 | 1,1765 |
| 302 | 5,28 | 0,37 | 3,34 | 489,59 | 1,385 | 1,365 | 1,2153 |
| 303 | 5,15 | 0,36 | 3,26 | 493,84 | 1,385 | 1,365 | 1,256  |
| 304 | 5,03 | 0,35 | 3,18 | 498,20 | 1,385 | 1,365 | 1,2988 |
| 305 | 4,90 | 0,34 | 3,10 | 502,66 | 1,384 | 1,364 | 1,3439 |
| 306 | 4,78 | 0,33 | 3,02 | 507,24 | 1,384 | 1,364 | 1,3912 |
| 307 | 4,65 | 0,32 | 2,95 | 511,92 | 1,384 | 1,364 | 1,4411 |
| 308 | 4,53 | 0,31 | 2,87 | 516,71 | 1,384 | 1,364 | 1,4935 |
| 309 | 4,41 | 0,31 | 2,79 | 521,62 | 1,383 | 1,363 | 1,5488 |
| 310 | 4,29 | 0,30 | 2,72 | 526,65 | 1,383 | 1,363 | 1,607  |
| 311 | 4,18 | 0,29 | 2,64 | 531,80 | 1,383 | 1,363 | 1,6684 |
| 312 | 4,06 | 0,28 | 2,57 | 537,07 | 1,383 | 1,363 | 1,7331 |
| 313 | 3,94 | 0,27 | 2,50 | 542,47 | 1,382 | 1,362 | 1,8014 |
| 314 | 3,83 | 0,27 | 2,43 | 547,99 | 1,382 | 1,362 | 1,8734 |
| 315 | 3,72 | 0,26 | 2,36 | 553,65 | 1,382 | 1,362 | 1,9495 |
| 316 | 3,61 | 0,25 | 2,29 | 559,44 | 1,381 | 1,361 | 2,0299 |
| 317 | 3,50 | 0,24 | 2,22 | 565,36 | 1,381 | 1,361 | 2,1148 |
| 318 | 3,39 | 0,24 | 2,15 | 571,42 | 1,381 | 1,361 | 2,2045 |
| 319 | 3,29 | 0,23 | 2,08 | 577,62 | 1,38  | 1,36  | 2,2994 |
| 320 | 3,19 | 0,22 | 2,02 | 583,95 | 1,38  | 1,36  | 2,3997 |
| 321 | 3,09 | 0,21 | 1,95 | 590,43 | 1,38  | 1,36  | 2,5058 |
| 322 | 2,99 | 0,21 | 1,89 | 597,05 | 1,379 | 1,359 | 2,6181 |
| 323 | 2,89 | 0,20 | 1,83 | 603,81 | 1,379 | 1,359 | 2,7368 |
| 324 | 2,79 | 0,19 | 1,77 | 610,71 | 1,378 | 1,358 | 2,8625 |
| 325 | 2,70 | 0,19 | 1,71 | 617,75 | 1,378 | 1,358 | 2,9954 |
| 326 | 2,61 | 0,18 | 1,65 | 624,94 | 1,378 | 1,358 | 3,136  |
| 327 | 2,52 | 0,17 | 1,60 | 632,26 | 1,377 | 1,357 | 3,2847 |
| 328 | 2,43 | 0,17 | 1,54 | 639,72 | 1,377 | 1,357 | 3,442  |
| 329 | 2,35 | 0,16 | 1,49 | 647,30 | 1,376 | 1,356 | 3,6083 |
| 330 | 2,27 | 0,16 | 1,44 | 655,02 | 1,376 | 1,356 | 3,7839 |
| 331 | 2,19 | 0,15 | 1,38 | 662,86 | 1,375 | 1,355 | 3,9693 |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|     |      |      |      |         |       |       |         |
|-----|------|------|------|---------|-------|-------|---------|
| 332 | 2,11 | 0,15 | 1,34 | 670,81  | 1,375 | 1,355 | 4,1649  |
| 333 | 2,03 | 0,14 | 1,29 | 678,86  | 1,374 | 1,354 | 4,3711  |
| 334 | 1,96 | 0,14 | 1,24 | 687,01  | 1,374 | 1,354 | 4,5882  |
| 335 | 1,89 | 0,13 | 1,20 | 695,25  | 1,373 | 1,353 | 4,8163  |
| 336 | 1,82 | 0,13 | 1,15 | 703,55  | 1,373 | 1,353 | 5,0558  |
| 337 | 1,76 | 0,12 | 1,11 | 711,90  | 1,372 | 1,352 | 5,3067  |
| 338 | 1,69 | 0,12 | 1,07 | 720,30  | 1,372 | 1,352 | 5,5689  |
| 339 | 1,63 | 0,11 | 1,03 | 728,70  | 1,371 | 1,351 | 5,8422  |
| 340 | 1,57 | 0,11 | 1,00 | 737,10  | 1,371 | 1,351 | 6,1264  |
| 341 | 1,52 | 0,11 | 0,96 | 745,46  | 1,37  | 1,35  | 6,4208  |
| 342 | 1,47 | 0,10 | 0,93 | 753,75  | 1,37  | 1,35  | 6,7246  |
| 343 | 1,42 | 0,10 | 0,90 | 761,95  | 1,369 | 1,349 | 7,0368  |
| 344 | 1,37 | 0,09 | 0,87 | 770,02  | 1,369 | 1,349 | 7,3559  |
| 345 | 1,33 | 0,09 | 0,84 | 777,93  | 1,368 | 1,348 | 7,6802  |
| 346 | 1,28 | 0,09 | 0,81 | 785,62  | 1,368 | 1,348 | 8,0077  |
| 347 | 1,25 | 0,09 | 0,79 | 793,06  | 1,367 | 1,347 | 8,336   |
| 348 | 1,21 | 0,08 | 0,77 | 800,20  | 1,367 | 1,347 | 8,6621  |
| 349 | 1,18 | 0,08 | 0,74 | 807,01  | 1,366 | 1,346 | 8,983   |
| 350 | 1,15 | 0,08 | 0,73 | 813,42  | 1,366 | 1,346 | 9,2952  |
| 351 | 1,12 | 0,08 | 0,71 | 819,39  | 1,365 | 1,345 | 9,5948  |
| 352 | 1,09 | 0,08 | 0,69 | 824,88  | 1,365 | 1,345 | 9,8779  |
| 353 | 1,07 | 0,07 | 0,68 | 829,84  | 1,365 | 1,345 | 10,1404 |
| 354 | 1,05 | 0,07 | 0,67 | 834,22  | 1,364 | 1,344 | 10,3783 |
| 355 | 1,04 | 0,07 | 0,66 | 837,99  | 1,364 | 1,344 | 10,5875 |
| 356 | 1,02 | 0,07 | 0,65 | 841,11  | 1,364 | 1,344 | 10,7644 |
| 357 | 1,01 | 0,07 | 0,64 | 843,54  | 1,364 | 1,344 | 10,9058 |
| 358 | 1,01 | 0,07 | 0,64 | 845,27  | 1,364 | 1,344 | 11,0088 |
| 359 | 1,00 | 0,07 | 0,63 | 846,27  | 1,364 | 1,344 | 11,0716 |
| 360 | 1,00 | 0,07 | 0,63 | 846,54  | 1,364 | 1,344 | 11,0928 |
| 361 | 1,00 | 0,07 | 0,63 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 362 | 1,01 | 0,07 | 0,64 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 363 | 1,01 | 0,07 | 0,64 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 364 | 1,02 | 0,07 | 0,65 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 365 | 1,04 | 0,07 | 0,66 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 366 | 1,05 | 0,07 | 0,67 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 367 | 1,07 | 0,07 | 0,68 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 368 | 1,09 | 0,08 | 0,69 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 369 | 1,12 | 0,08 | 0,71 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 370 | 1,15 | 0,08 | 0,73 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 371 | 1,18 | 0,08 | 0,74 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 372 | 1,21 | 0,08 | 0,77 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 373 | 1,25 | 0,09 | 0,79 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 374 | 1,28 | 0,09 | 0,81 | 846,54  | 1,344 | 1,324 | 11,09   |
| 375 | 1,33 | 0,09 | 0,84 | 905,14  | 1,34  | 1,32  | 11,53   |
| 376 | 1,37 | 0,09 | 0,87 | 985,14  | 1,335 | 1,315 | 12,19   |
| 377 | 1,42 | 0,10 | 0,90 | 1075,82 | 1,329 | 1,309 | 12,93   |
| 378 | 1,47 | 0,10 | 0,93 | 1170,63 | 1,323 | 1,303 | 13,65   |
| 379 | 1,52 | 0,11 | 0,96 | 1265,10 | 1,317 | 1,297 | 14,3    |
| 380 | 1,57 | 0,11 | 1,00 | 1356,19 | 1,311 | 1,291 | 14,85   |
| 381 | 1,63 | 0,11 | 1,03 | 1441,85 | 1,306 | 1,286 | 15,28   |
| 382 | 1,69 | 0,12 | 1,07 | 1520,78 | 1,302 | 1,282 | 15,59   |
| 383 | 1,76 | 0,12 | 1,11 | 1592,24 | 1,298 | 1,278 | 15,78   |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|     |       |       |       |         |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 384 | 1,82  | 0,13  | 1,15  | 1655,91 | 1,294 | 1,274 | 15,86 |
| 385 | 1,89  | 0,13  | 1,20  | 1711,77 | 1,291 | 1,271 | 15,84 |
| 386 | 1,96  | 0,14  | 1,24  | 1760,00 | 1,289 | 1,269 | 15,72 |
| 387 | 2,03  | 0,14  | 1,29  | 1800,97 | 1,287 | 1,267 | 15,54 |
| 388 | 2,11  | 0,15  | 1,34  | 1835,12 | 1,285 | 1,265 | 15,29 |
| 389 | 2,19  | 0,15  | 1,38  | 1862,97 | 1,283 | 1,263 | 14,99 |
| 390 | 2,27  | 0,16  | 1,44  | 1885,07 | 1,282 | 1,262 | 14,64 |
| 391 | 2,35  | 0,16  | 1,49  | 1901,99 | 1,281 | 1,261 | 14,27 |
| 392 | 2,43  | 0,17  | 1,54  | 1914,28 | 1,281 | 1,261 | 13,87 |
| 393 | 2,52  | 0,17  | 1,60  | 1922,47 | 1,28  | 1,26  | 13,46 |
| 394 | 2,61  | 0,18  | 1,65  | 1927,08 | 1,28  | 1,26  | 13,04 |
| 395 | 2,70  | 0,19  | 1,71  | 1928,58 | 1,28  | 1,26  | 12,61 |
| 396 | 2,79  | 0,19  | 1,77  | 1927,40 | 1,28  | 1,26  | 12,19 |
| 397 | 2,89  | 0,20  | 1,83  | 1923,93 | 1,28  | 1,26  | 11,77 |
| 398 | 2,99  | 0,21  | 1,89  | 1918,55 | 1,28  | 1,26  | 11,35 |
| 399 | 3,09  | 0,21  | 1,95  | 1911,56 | 1,281 | 1,261 | 10,95 |
| 400 | 3,19  | 0,22  | 2,02  | 1903,25 | 1,281 | 1,261 | 10,56 |
| 401 | 3,29  | 0,23  | 2,08  | 1893,86 | 1,282 | 1,262 | 10,18 |
| 402 | 3,39  | 0,24  | 2,15  | 1883,62 | 1,282 | 1,262 | 9,81  |
| 403 | 3,50  | 0,24  | 2,22  | 1872,70 | 1,283 | 1,263 | 9,46  |
| 404 | 3,61  | 0,25  | 2,29  | 1861,27 | 1,283 | 1,263 | 9,12  |
| 405 | 3,72  | 0,26  | 2,36  | 1849,46 | 1,284 | 1,264 | 8,79  |
| 406 | 3,83  | 0,27  | 2,43  | 1837,38 | 1,285 | 1,265 | 8,48  |
| 407 | 3,94  | 0,27  | 2,50  | 1825,14 | 1,285 | 1,265 | 8,18  |
| 408 | 4,06  | 0,28  | 2,57  | 1812,81 | 1,286 | 1,266 | 7,9   |
| 409 | 4,18  | 0,29  | 2,64  | 1800,45 | 1,287 | 1,267 | 7,63  |
| 410 | 4,29  | 0,30  | 2,72  | 1788,12 | 1,287 | 1,267 | 7,37  |
| 411 | 4,41  | 0,31  | 2,79  | 1775,87 | 1,288 | 1,268 | 7,12  |
| 412 | 4,53  | 0,31  | 2,87  | 1763,72 | 1,288 | 1,268 | 6,88  |
| 413 | 4,65  | 0,32  | 2,95  | 1751,71 | 1,289 | 1,269 | 6,66  |
| 414 | 4,78  | 0,33  | 3,02  | 1739,85 | 1,29  | 1,27  | 6,44  |
| 415 | 4,9   | 0,339 | 3,103 | 1728,25 | 1,282 | 1,262 | 6,239 |
| 416 | 5,025 | 0,348 | 3,182 | 1716,86 | 1,283 | 1,263 | 6,043 |
| 417 | 5,151 | 0,357 | 3,262 | 1705,68 | 1,283 | 1,263 | 5,857 |
| 418 | 5,278 | 0,366 | 3,343 | 1694,71 | 1,284 | 1,264 | 5,679 |
| 419 | 5,406 | 0,374 | 3,424 | 1683,94 | 1,284 | 1,264 | 5,51  |
| 420 | 5,535 | 0,383 | 3,505 | 1673,38 | 1,285 | 1,265 | 5,348 |
| 421 | 5,664 | 0,392 | 3,587 | 1663,01 | 1,285 | 1,265 | 5,193 |
| 422 | 5,795 | 0,401 | 3,67  | 1652,85 | 1,286 | 1,266 | 5,045 |
| 423 | 5,926 | 0,41  | 3,753 | 1642,87 | 1,287 | 1,267 | 4,904 |
| 424 | 6,057 | 0,419 | 3,836 | 1633,08 | 1,287 | 1,267 | 4,768 |
| 425 | 6,19  | 0,429 | 3,92  | 1623,48 | 1,288 | 1,268 | 4,639 |
| 426 | 6,323 | 0,438 | 4,004 | 1614,06 | 1,288 | 1,268 | 4,515 |
| 427 | 6,456 | 0,447 | 4,089 | 1604,82 | 1,289 | 1,269 | 4,396 |
| 428 | 6,59  | 0,456 | 4,173 | 1595,76 | 1,289 | 1,269 | 4,283 |
| 429 | 6,724 | 0,466 | 4,258 | 1586,88 | 1,29  | 1,27  | 4,174 |
| 430 | 6,859 | 0,475 | 4,344 | 1578,16 | 1,29  | 1,27  | 4,069 |
| 431 | 6,994 | 0,484 | 4,429 | 1569,61 | 1,291 | 1,271 | 3,969 |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|     |        |       |       |         |       |       |       |
|-----|--------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 432 | 7,129  | 0,494 | 4,515 | 1561,23 | 1,291 | 1,271 | 3,873 |
| 433 | 7,264  | 0,503 | 4,6   | 1553,01 | 1,291 | 1,271 | 3,781 |
| 434 | 7,399  | 0,512 | 4,686 | 1544,95 | 1,292 | 1,272 | 3,693 |
| 435 | 7,535  | 0,522 | 4,772 | 1537,05 | 1,292 | 1,272 | 3,608 |
| 436 | 7,671  | 0,531 | 4,858 | 1529,3  | 1,293 | 1,273 | 3,526 |
| 437 | 7,806  | 0,541 | 4,944 | 1521,7  | 1,293 | 1,273 | 3,448 |
| 438 | 7,942  | 0,55  | 5,029 | 1514,25 | 1,294 | 1,274 | 3,372 |
| 439 | 8,077  | 0,559 | 5,115 | 1506,95 | 1,294 | 1,274 | 3,3   |
| 440 | 8,212  | 0,569 | 5,201 | 1499,79 | 1,294 | 1,274 | 3,23  |
| 441 | 8,347  | 0,578 | 5,286 | 1492,77 | 1,295 | 1,275 | 3,163 |
| 442 | 8,482  | 0,587 | 5,372 | 1485,89 | 1,295 | 1,275 | 3,098 |
| 443 | 8,617  | 0,597 | 5,457 | 1479,14 | 1,296 | 1,276 | 3,036 |
| 444 | 8,751  | 0,606 | 5,542 | 1472,53 | 1,296 | 1,276 | 2,976 |
| 445 | 8,885  | 0,615 | 5,627 | 1466,05 | 1,296 | 1,276 | 2,918 |
| 446 | 9,018  | 0,624 | 5,711 | 1459,7  | 1,297 | 1,277 | 2,863 |
| 447 | 9,151  | 0,634 | 5,795 | 1453,48 | 1,297 | 1,277 | 2,809 |
| 448 | 9,283  | 0,643 | 5,879 | 1447,38 | 1,297 | 1,277 | 2,757 |
| 449 | 9,415  | 0,652 | 5,962 | 1441,4  | 1,298 | 1,278 | 2,707 |
| 450 | 9,546  | 0,661 | 6,046 | 1435,54 | 1,298 | 1,278 | 2,659 |
| 451 | 9,677  | 0,67  | 6,128 | 1429,8  | 1,298 | 1,278 | 2,613 |
| 452 | 9,807  | 0,679 | 6,211 | 1424,17 | 1,299 | 1,279 | 2,568 |
| 453 | 9,936  | 0,688 | 6,292 | 1418,66 | 1,299 | 1,279 | 2,525 |
| 454 | 10,064 | 0,697 | 6,374 | 1413,26 | 1,299 | 1,279 | 2,483 |
| 455 | 10,192 | 0,706 | 6,454 | 1407,97 | 1,3   | 1,28  | 2,443 |
| 456 | 10,319 | 0,715 | 6,535 | 1402,79 | 1,3   | 1,28  | 2,404 |
| 457 | 10,445 | 0,723 | 6,615 | 1397,72 | 1,3   | 1,28  | 2,367 |
| 458 | 10,57  | 0,732 | 6,694 | 1392,75 | 1,3   | 1,28  | 2,33  |
| 459 | 10,694 | 0,741 | 6,772 | 1387,88 | 1,301 | 1,281 | 2,295 |
| 460 | 10,817 | 0,749 | 6,85  | 1383,11 | 1,301 | 1,281 | 2,261 |
| 461 | 10,939 | 0,758 | 6,928 | 1378,44 | 1,301 | 1,281 | 2,228 |
| 462 | 11,06  | 0,766 | 7,004 | 1373,87 | 1,302 | 1,282 | 2,197 |
| 463 | 11,18  | 0,774 | 7,08  | 1369,4  | 1,302 | 1,282 | 2,166 |
| 464 | 11,299 | 0,782 | 7,156 | 1365,02 | 1,302 | 1,282 | 2,136 |
| 465 | 11,417 | 0,791 | 7,23  | 1360,73 | 1,302 | 1,282 | 2,108 |
| 466 | 11,534 | 0,799 | 7,304 | 1356,53 | 1,303 | 1,283 | 2,08  |
| 467 | 11,65  | 0,807 | 7,378 | 1352,42 | 1,303 | 1,283 | 2,053 |
| 468 | 11,764 | 0,815 | 7,45  | 1348,4  | 1,303 | 1,283 | 2,027 |
| 469 | 11,877 | 0,822 | 7,522 | 1344,47 | 1,303 | 1,283 | 2,002 |
| 470 | 11,989 | 0,83  | 7,593 | 1340,62 | 1,303 | 1,283 | 1,978 |
| 471 | 12,1   | 0,838 | 7,663 | 1336,86 | 1,304 | 1,284 | 1,954 |
| 472 | 12,209 | 0,845 | 7,732 | 1333,18 | 1,304 | 1,284 | 1,931 |
| 473 | 12,317 | 0,853 | 7,8   | 1329,58 | 1,304 | 1,284 | 1,909 |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|     |        |       |       |         |       |       |       |
|-----|--------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 474 | 12,424 | 0,86  | 7,868 | 1326,06 | 1,304 | 1,284 | 1,888 |
| 475 | 12,529 | 0,868 | 7,935 | 1322,62 | 1,305 | 1,285 | 1,867 |
| 476 | 12,633 | 0,875 | 8     | 1319,25 | 1,305 | 1,285 | 1,847 |
| 477 | 12,736 | 0,882 | 8,065 | 1315,97 | 1,305 | 1,285 | 1,827 |
| 478 | 12,837 | 0,889 | 8,129 | 1312,75 | 1,305 | 1,285 | 1,809 |
| 479 | 12,936 | 0,896 | 8,193 | 1309,61 | 1,305 | 1,285 | 1,79  |
| 480 | 13,035 | 0,903 | 8,255 | 1306,55 | 1,305 | 1,285 | 1,773 |
| 481 | 13,132 | 0,909 | 8,316 | 1303,55 | 1,306 | 1,286 | 1,756 |
| 482 | 13,227 | 0,916 | 8,376 | 1300,63 | 1,306 | 1,286 | 1,739 |
| 483 | 13,321 | 0,922 | 8,436 | 1297,77 | 1,306 | 1,286 | 1,723 |
| 484 | 13,413 | 0,929 | 8,494 | 1294,98 | 1,306 | 1,286 | 1,708 |
| 485 | 13,504 | 0,935 | 8,552 | 1292,26 | 1,306 | 1,286 | 1,692 |
| 486 | 13,593 | 0,941 | 8,608 | 1289,61 | 1,306 | 1,286 | 1,678 |
| 487 | 13,681 | 0,947 | 8,664 | 1287,02 | 1,307 | 1,287 | 1,664 |
| 488 | 13,767 | 0,953 | 8,719 | 1284,5  | 1,307 | 1,287 | 1,65  |
| 489 | 13,852 | 0,959 | 8,772 | 1282,03 | 1,307 | 1,287 | 1,637 |
| 490 | 13,935 | 0,965 | 8,825 | 1279,64 | 1,307 | 1,287 | 1,624 |
| 491 | 14,016 | 0,971 | 8,876 | 1277,3  | 1,307 | 1,287 | 1,612 |
| 492 | 14,096 | 0,976 | 8,927 | 1275,02 | 1,307 | 1,287 | 1,6   |
| 493 | 14,175 | 0,982 | 8,977 | 1272,81 | 1,307 | 1,287 | 1,588 |
| 494 | 14,251 | 0,987 | 9,025 | 1270,65 | 1,308 | 1,288 | 1,577 |
| 495 | 14,326 | 0,992 | 9,073 | 1268,55 | 1,308 | 1,288 | 1,566 |
| 496 | 14,4   | 0,997 | 9,119 | 1266,51 | 1,308 | 1,288 | 1,556 |
| 497 | 14,472 | 1,002 | 9,165 | 1264,52 | 1,308 | 1,288 | 1,545 |
| 498 | 14,542 | 1,007 | 9,209 | 1262,59 | 1,308 | 1,288 | 1,536 |
| 499 | 14,611 | 1,012 | 9,253 | 1260,72 | 1,308 | 1,288 | 1,526 |
| 500 | 14,678 | 1,016 | 9,295 | 1258,9  | 1,308 | 1,288 | 1,517 |
| 501 | 14,743 | 1,021 | 9,337 | 1257,13 | 1,308 | 1,288 | 1,508 |
| 502 | 14,807 | 1,025 | 9,377 | 1255,42 | 1,309 | 1,289 | 1,5   |
| 503 | 14,869 | 1,03  | 9,416 | 1253,76 | 1,309 | 1,289 | 1,491 |
| 504 | 14,929 | 1,034 | 9,454 | 1252,15 | 1,309 | 1,289 | 1,483 |
| 505 | 14,988 | 1,038 | 9,492 | 1250,59 | 1,309 | 1,289 | 1,476 |
| 506 | 15,045 | 1,042 | 9,528 | 1249,09 | 1,309 | 1,289 | 1,468 |
| 507 | 15,1   | 1,046 | 9,563 | 1247,63 | 1,309 | 1,289 | 1,461 |
| 508 | 15,154 | 1,049 | 9,597 | 1246,22 | 1,309 | 1,289 | 1,455 |
| 509 | 15,206 | 1,053 | 9,63  | 1244,86 | 1,309 | 1,289 | 1,448 |
| 510 | 15,257 | 1,057 | 9,662 | 1243,55 | 1,309 | 1,289 | 1,442 |
| 511 | 15,306 | 1,06  | 9,693 | 1242,29 | 1,309 | 1,289 | 1,436 |
| 512 | 15,353 | 1,063 | 9,723 | 1241,07 | 1,309 | 1,289 | 1,43  |
| 513 | 15,398 | 1,066 | 9,752 | 1239,9  | 1,309 | 1,289 | 1,424 |
| 514 | 15,442 | 1,069 | 9,779 | 1238,78 | 1,31  | 1,29  | 1,419 |
| 515 | 15,484 | 1,072 | 9,806 | 1237,7  | 1,31  | 1,29  | 1,414 |



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

|     |        |       |        |         |      |      |       |
|-----|--------|-------|--------|---------|------|------|-------|
| 516 | 15,525 | 1,075 | 9,832  | 1236,67 | 1,31 | 1,29 | 1,409 |
| 517 | 15,564 | 1,078 | 9,856  | 1235,69 | 1,31 | 1,29 | 1,404 |
| 518 | 15,601 | 1,08  | 9,88   | 1234,75 | 1,31 | 1,29 | 1,4   |
| 519 | 15,636 | 1,083 | 9,902  | 1233,85 | 1,31 | 1,29 | 1,396 |
| 520 | 15,67  | 1,085 | 9,924  | 1232,99 | 1,31 | 1,29 | 1,392 |
| 521 | 15,702 | 1,087 | 9,944  | 1232,19 | 1,31 | 1,29 | 1,388 |
| 522 | 15,733 | 1,089 | 9,963  | 1231,42 | 1,31 | 1,29 | 1,384 |
| 523 | 15,762 | 1,091 | 9,982  | 1230,7  | 1,31 | 1,29 | 1,381 |
| 524 | 15,789 | 1,093 | 9,999  | 1230,01 | 1,31 | 1,29 | 1,378 |
| 525 | 15,815 | 1,095 | 10,015 | 1229,38 | 1,31 | 1,29 | 1,375 |
| 526 | 15,838 | 1,097 | 10,03  | 1228,78 | 1,31 | 1,29 | 1,372 |
| 527 | 15,861 | 1,098 | 10,044 | 1228,23 | 1,31 | 1,29 | 1,37  |
| 528 | 15,881 | 1,1   | 10,058 | 1227,71 | 1,31 | 1,29 | 1,367 |
| 529 | 15,9   | 1,101 | 10,07  | 1227,24 | 1,31 | 1,29 | 1,365 |
| 530 | 15,918 | 1,102 | 10,08  | 1226,81 | 1,31 | 1,29 | 1,363 |
| 531 | 15,933 | 1,103 | 10,09  | 1226,42 | 1,31 | 1,29 | 1,362 |
| 532 | 15,947 | 1,104 | 10,099 | 1226,08 | 1,31 | 1,29 | 1,36  |
| 533 | 15,96  | 1,105 | 10,107 | 1225,77 | 1,31 | 1,29 | 1,359 |
| 534 | 15,97  | 1,106 | 10,114 | 1225,5  | 1,31 | 1,29 | 1,357 |
| 535 | 15,979 | 1,107 | 10,12  | 1225,28 | 1,31 | 1,29 | 1,356 |
| 536 | 15,987 | 1,107 | 10,124 | 1225,09 | 1,31 | 1,29 | 1,356 |
| 537 | 15,993 | 1,107 | 10,128 | 1224,95 | 1,31 | 1,29 | 1,355 |
| 538 | 15,997 | 1,108 | 10,131 | 1224,84 | 1,31 | 1,29 | 1,354 |
| 539 | 15,999 | 1,108 | 10,132 | 1224,78 | 1,31 | 1,29 | 1,354 |
| 540 | 16     | 1,108 | 10,133 | 1224,75 | 1,31 | 1,29 | 1,354 |



DIPLOMOVÁ PRÁCE



DIPLOMOVÁ PRÁCE





DIPLOMOVÁ PRÁCE

