

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV ATOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ



FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

# ODLEHČENÍ OJNICE VZNĚTOVÉHO ŘADOVÉHO ČTYŘVÁLCE

MASS REDUCTION OF FOUR-CYLINDER IN-LINE DIESEL ENGINE CONNECTING ROD

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LUKÁŠ ZATLOUKAL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. PAVEL NOVOTNÝ, Ph.D

BRNO 2008

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá odlehčením ojnice sériového traktorového motoru. V počáteční fázi tohoto projektu je důležitým úkolem vytvoření 3D modelu stávající ojnice, ze kterého se v dalších částech vychází. Po vytvoření 3D modelu následuje pevnostní kontrola tohoto modelu. Dále navazuje výpočet nevyváženosti motoru se stávající ojnici a tím i zjištění velikosti potřebného odlehčení. Po tomto úkolu již následuje tvorba nového 3D modelu odlehčeného o potřebnou hmotnost a pevnostní kontrola tohoto modelu. Závěrem je provedeno zhodnocení nové ojnice.

## **Klíčová slova**

Ojnice, 3D model, výpočtový model, metoda konečných prvků, redukované napětí, odlehčení, hmotnost posuvné části ojnice

## **Abstract**

This diploma thesis applies to the light-weight itself of a connecting rod of a mass-produced tractor-engine. As a one of the most important and first part of this task is creating a 3D simulation model of a connecting rod. The strength calculation is following skip factor of the light-weight, the exact calculated dimension of relieve is providing by means of an engine imbalance including the connecting rod. The outcome data of research are instrumental to the new relieve and strengthen 3D design. The conclusion and ending point of the diploma thesis evaluate results.

## **Key words**

Connecting rod, 3D model, computational model, finite element method, equivalent stress, mass reduction, mass of sliding parts of connecting rod

## **Bibliografická citace**

ZATLOUKAL, L. Odlehčení ojnice vznětového řadového čtyřválce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Novotný, Ph.D

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Pavla Novotného, Ph.D a s použitím literatury uvedené v zadní části práce.

V Brně 20.5.2008

.....

## **Poděkování**

Děkuji především panu Ing. Pavlovi Novotnému, Ph.D za velmi obětavé vedení při tvorbě této práce. Dále bych chtěl velmi poděkovat panu Ing. Pavlovi Ramíkovi za seznámení s programem Ansys a s velkou pomocí při scanování ojnice. V neposlední řadě bych rád poděkoval panu Ing. Davidovi Svídovi za přehlednou výuku programu Pro/Engineer.

## Obsah

1	Úvod.....	7
2	Rešerše soudobých ojníc obdobných parametrů.....	8
2.1	Základní popis ojnice.....	8
2.1.1	Okno ojnice.....	9
2.1.2	Dřík ojnice.....	9
2.1.3	Hlava ojnice.....	10
2.1.4	Víko ojnice.....	10
2.1.5	Ojniční šrouby.....	12
2.2	Namáhání ojnice.....	12
2.2.1	Namáhání oka ojnice.....	13
2.2.2	Namáhání dříku ojnice.....	13
2.2.3	Namáhání hlavy ojnice.....	14
2.2.3.1	Namáhání víka v rovině souměrnosti víka.....	14
2.2.3.2	Namáhání hlavy v místě ukotvení hlavy do dříku ojnice.....	15
2.2.4	Ukázky počítačové podpory při výpočtech zatížení ojníc.....	15
2.3	Vyvážení ojnice.....	17
2.4	Požadavky na ojnice.....	17
2.5	Výroba ojnice.....	17
2.5.1	Ukázka výroby ojníc.....	18
2.6	Porovnání ojníc různých výrobců.....	19
3	Technické parametry motoru a ojnice.....	21
3.1	Technické parametry motoru.....	21
3.2	Technické parametry ojnice.....	22
4	Tvorba 3D modelu stávající ojnice.....	23
4.1	Tvorba 3D modelu dle výkresové dokumentace.....	23
4.2	Scanování vyrobené ojnice.....	25
4.3	Prizpůsobení modelu ojnice skutečnému tvaru.....	28
4.4	Ověření rozložení hmotnosti reálné ojnice metodou odkývání.....	30
4.4.1	Měření odkývání ojnice.....	31
4.4.2	Výpočet redukovaných hmotností.....	32
4.5	Porovnání rozložení hmotností.....	34
5	Pevnostní analýza 3D modelu stávající ojnice.....	35
5.1	Převod 3D modelu do programu Ansys.....	35
5.2	Výpočet velikosti zatížení.....	36
5.2.1	Zrychlení pístu.....	36
5.2.2	Úhlová rychlost a úhlové zrychlení kolem osy pístního čepu.....	38
5.2.3	Působící síly na horní oko ojnice.....	39
5.3	Výběr druhů elementů a materiálových vlastností.....	42
5.4	Vytvoření prutové náhrady pístního a ojničního čepu.....	44
5.5	Vytvoření předpětí šroubů.....	46
5.5.1	Výpočet tahového napětí dříku šroubu.....	46
5.5.2	Vytvoření předpětí pomocí zadané teploty části dříku šroubu.....	47
5.6	Dokončení výpočtového modelu.....	48
5.6.1	Vytvoření sítě objemu ojnice a kontaktů.....	49
5.6.2	Zadání zatížení a okrajových podmínek.....	49
5.7	Výsledky pevnostní analýzy.....	50
6	Výpočet nevyváženosti motoru.....	55

7	Tvorba 3D modelu odlehčené ojnice.....	57
7.1	Kontrola vyváženosti motoru při použití nové ojnice.....	59
8	Pevnostní analýza 3D modelu nové ojnice.....	60
8.1	Převod 3D modelu do programu Ansys.....	60
8.2	Výpočet velikosti zatížení.....	60
8.3	Výběr druhů elementů a materiálových vlastností.....	60
8.4	Vytvoření prutové náhrady pístního a ojničního čepu.....	61
8.5	Vytvoření předpětí pomocí zadané teploty části dřívku šroubu.....	63
8.6	Dokončení výpočtového modelu.....	63
8.6.1	Vytvoření sítě objemu ojnice a kontaktů.....	63
8.6.2	Zadání zatížení a okrajových podmínek.....	63
8.7	Výsledky pevnostní analýzy.....	64
9	Únavová kontrola stávající a upravené ojnice.....	69
10	Shrnutí přínosů nové ojnice.....	71
11	Závěr.....	72
	Seznam použitých zdrojů.....	73
	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	74
	Seznam příloh.....	77
	Přílohy	

## 1 Úvod

Ojnice je základní částí klikového mechanismu a tím i celého motoru. Svým složitým pohybem převádí posuvný vratný pohyb pístu na rotační pohyb klikového mechanismu. Ojnice rovněž patří mezi nejvíce namáhané součásti motoru. Je zatěžována nejen vysokou silou od tlaků plynů, ale rovněž velkými setrvačnými silami. Ojnice, která je předmětem řešení této práce je z traktorového naftového motoru, který má však poměrně nízké otáčky motoru, takže působící setrvačné síly jsou relativně nízké. Časová proměnnost silových účinků způsobuje únavové namáhání ojnice.

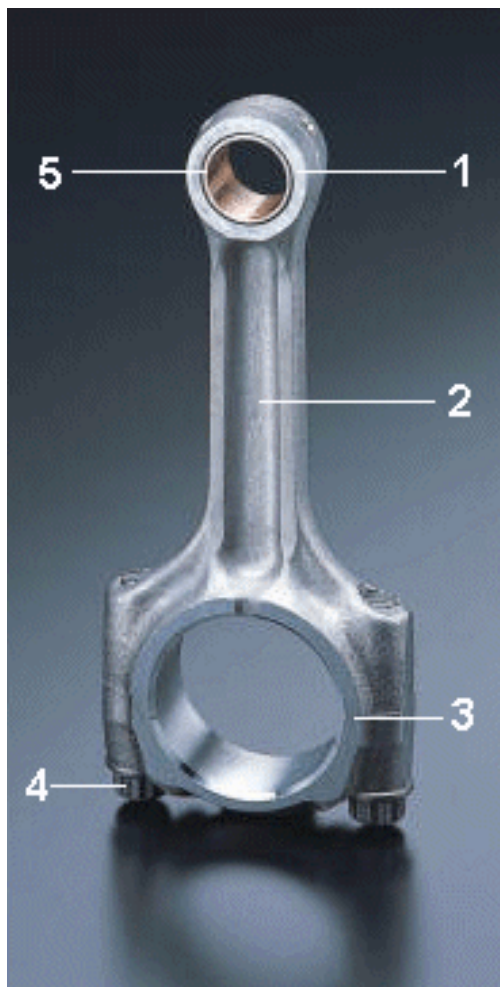
Současná doba se vyznačuje snahou odlehčit téměř všechny představitelné součásti motorových vozidel a to jak z důvodu snížení výrobních nákladů, tak i z důvodu snížení celkové hmotnosti vozidla za účelem nižší spotřeby paliva. Tyhle důvody však nejsou motivací této práce. Hlavním důvodem odlehčení je fakt, že současný motor má nevyvážený chod. Cílem této práce je odlehčení stávající ojnice o takovou hmotnost a v takovém místě, aby měl motor chod vyvážený. Odběr materiálu však musí být proveden s ohledem na zachování životnosti vzhledem ke stávající ojnicí.

Tuto práci jsem si vybral z několika důvodů. V první řadě mě zaujal fakt, že tato ojnice je používána již ve vyráběném motoru traktoru, tudíž jsem ji mohl fyzicky vidět. Dále na mě zapůsobila výzva, aby tato práce byla kvalitně zpracována, neboť existuje možnost využití upravené ojnice ve výrobě. V neposlední řadě mě ve výběru této práce utvrdila skutečnost, že pro vypracování zadaných úkolů je nutné užití trojrozměrného modelování využitím CAD systémů a následné pevnostní kontroly užitím metody konečných prvků. Tyto metody jsem totiž před započítím řešení této práce příliš neovládal.

## 2 Rešerše soudobých ojnic obdobných parametrů

### 2.1 Základní popis ojnice

Ojnice spojuje píst s klikovou hřídelí motoru a svým pohybem mění přímočarý vratný pohyb pístu ve válci na rotační pohyb ojničního čepu na klikovém hřídeli. Ojnice motoru přenáší sílu od tlaků plynů na dno pístu na ojniční čep umístěný na klikovém hřídeli a rotačním pohybem na rameni klikového hřídele kolem klikového čepu se vytváří kroutící moment. Ojnice se skládá z oka ojnice pro spojení s pístním čepem, do kterého se vkládá pouzdro, dále z hlavy ojnice pro spojení s ojničním čepem, dříku spojujícího oko a hlavu ojnice a ojničních šroubů, které spojují dělenou hlavu ojnice (víko a hlavu).



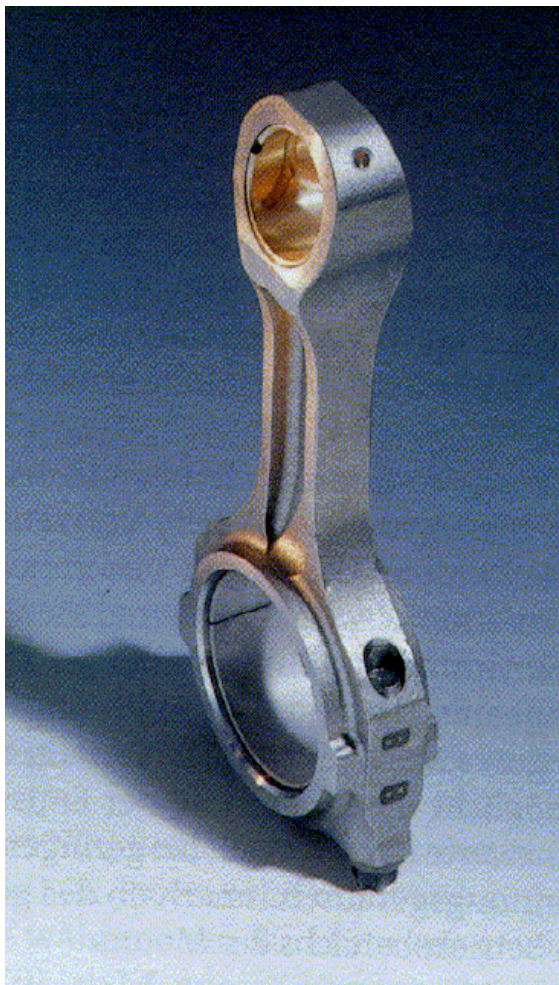
Oko ojnice se v drtivé většině případů konstruuje jako nedělené, protože se ojnice s pístem spojuje provlečením pístního čepu současně pístem a okem ojnice. Hlava ojnice může být buď dělená, nebo nedělená. To závisí na způsobu zhotovení klikového hřídele. Je-li klikový hřídel dělený, tak může být hlava ojnice nedělená. Je-li klikový hřídel nedělený, tak hlava ojnice musí být dělená. Dělené klikové hřídele a nedělené hlavy ojnice se v současné době používají výhradně u dvoudobých motorů, u kterých se používají valivá ložiska mezi hlavou ojnice a ojničním čepem. U čtyřdobých motorů se používají zcela výjimečně. Hlava ojnice je dělená především v rovině kolmé na podélnou osu ojnice a spojení obou polovin bývá provedeno ojničními šrouby. V případech kdy hlava ojnice nejde protáhnout válcem motoru, tak se používá dělení v šikmé rovině. Požadavek na protažení hlavy ojnice válcem motoru je důležitý z hlediska náročnosti oprav. Například kvůli výměně pístu by se v případě nemožnosti protažení hlavy ojnice válcem motoru, musela demontovat kliková hřídel a ojnice by se musela vytáhnout spodní stranou motoru. Úhel dělicí roviny od podélné osy ojnice bývá 30°, 45° nebo 60°. Hlava ojnice se šikmou dělicí rovinou však bývá, z důvodu nepříznivého rozložení napětí a nutnosti užití konstrukčního řešení zachycení sil působících v dělicí rovině hlavy, hmotnější.

**Obr. 2.1** Dvoudílná ojnice [8]  
1) oko ojnice, 2) dřík ojnice, 3) hlava ojnice, 4) ojniční šroub, 5) pouzdro ojnice

### 2.1.1 Oko ojnice

Slouží pro uložení pístního čepu. Uložení pístního čepu může být provedeno dvěma způsoby:

- a) Zalisováním bronzového pouzdra (CuSn) do otvoru v oku ojnice při použití plovoucího pístního čepu. Po vyvrtání mazacího otvoru a zajištění pouzdra pouzdra proti pootočení bývá vystružen vnitřní průměr ložiska.
- b) Zalisováním tenkostěnné ocelové pánve s výstelkou z olověného bronzu (CuPbSn) do vystruženého otvoru v oku ojnice.



**Obr. 2.2 Ojnice s lichoběžníkovou hlavou** [8]

Podle tvaru oka ojnice jsou ojnice rozděleny do tří skupin: a) ojnice s obdélníkovou okem (viz Obr. 2.1)

b) ojnice s lichoběžníkovou okem (viz Obr. 2.2)

c) ojnice se stupňovitou okem (v současné době se téměř nepoužívají)

Lichoběžníkového a stupňovitého tvaru se používá především u značně zatěžovaných přeplňovaných motorů. Podobný tvar mívají i nálitky pro pístní čep v pístu. Takové uspořádání se používá převážně proto, že velké měrné tlaky vyvolané vysokými spalovacími tlaky jsou přenášeny větší stykovou plochou pístního čepu a oka ojnice či nálitku v pístu. Setrvačné síly jsou menší, proto pro jejich přenesení stačí menší plocha oka a tím pádem také méně materiálu, z tohoto důvodu je ojnice v místě oka ojnice lehčí a snižují se setrvačné posuvné síly. Současně se tím vyrovnává i tloušťka mazací vrstvy oleje mezi čepem a ložiskovým pouzdrem.

U pevného pístního čepu je do vystruženého otvoru v oku ojnice za tepla nalisován pístní čep, tj. předehřátá ojnice a případně podchlazený čep. Po smrštění je spoj rozebíratelný pouze velkou velkou silou. Tento způsob uložení je v současné době méně používán méně často.

### 2.1.2 Dřík ojnice

Spojuje oko s hlavou ojnice. V současné době se nejčastěji používá pro běžné zážehové a vznětové motory profil ve tvaru I (viz Obr. 2.1). Pro některé motory závodních automobilů se používá profil dřívku ve tvaru H (viz Obr. 2.3) a nejnověji dřívku s vyztuženým žebrem (viz Obr. 2.4). U větších motorů nebo u vznětových motorů bývá dřívku vrtaný pro tlakové mazání pístního čepu.





**Obr. 2.3 Ojnice s dříkem ve tvaru H [9]**    **Obr. 2.4 Ojnice s dříkem vyztuženým žebrem [9]**

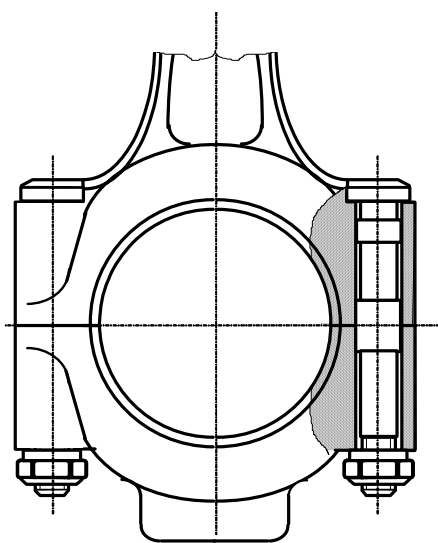
### 2.1.3 Hlava ojnice

Jelikož klikový hřídel čtyřdobých motorů bývá vykován nebo odlit vcelku, tak bývá hlava ojnice dělená. Společně s víkem ojnice obklopuje ojniční ložisko, obvykle dělené kluzné ložisko (tenkostěnné ocelové pánve, které mají na vnitřní straně nanesenu tenkou vrstvičku speciálního ložiskového kovu s vynikajícími třecími vlastnostmi). Spojení víka a hlavy ojnice bývá provedeno pomocí ojničních šroubů. Styčné plochy dělicích rovin obou částí bývají opatřeny drážkováním pro aretaci a přesnou montáž. Vždy jsou číselně nebo jiným znakem označeny souhlasné součásti, které nedovolí záměnu. Na vnitřní straně hlavy a víka ojnice bývají vytvořeny polohovací drážky pro zabezpečení polohy tenkostěnných ocelových pánví. Proti pootočení za provozu jsou ložiskové pánve zabezpečeny celkovým přesahem vnějšího průměru obou ložiskových pánví vzhledem k vnitřnímu průměru hlavy ojnice. V drtivé většině případů je vrchní a spodní zaměnitelná, i když je zatížení obou částí rozdílné. Horní pánev je zatěžována krátkodobě silami od tlaků plynů. Spodní pánev je zatěžována dlouhodobě silami setrvačnými od posuvných i rotačních hmotností, které jsou však menší než síly od tlaků plynů. Hlava ojnice by měla být lehká a tuhá, aby nedocházelo k deformaci ložiskových pánví. Tuhost zvyšují plynulé přechody do dříku ojnice.

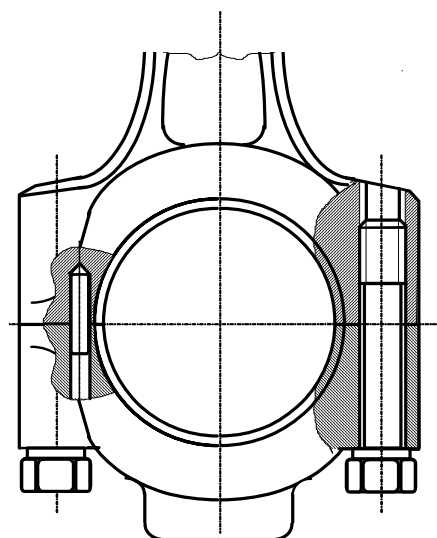
### 2.1.4 Víko ojnice

Víko bývá k hlavě ojnice připevněno ojničními šrouby. Otvor v hlavě a víku ojnice pro uložení ložiskových pánví bývá obroben ve smontovaném stavu. Z tohoto důvodu musí být vzájemná poloha hlavy a víka ojnice přesně ustavena. Přesné zajištění polohy víka vůči hlavě ojnice zabezpečuje, že po obrobení otvoru pro uložení ložiskových pánví, bude i při montáži na klikovou hřídel zachována potřebná kruhovitost a válcovitost ložiskové pánve. Zabezpečení polohy bývá vytvořeno pěti způsoby:

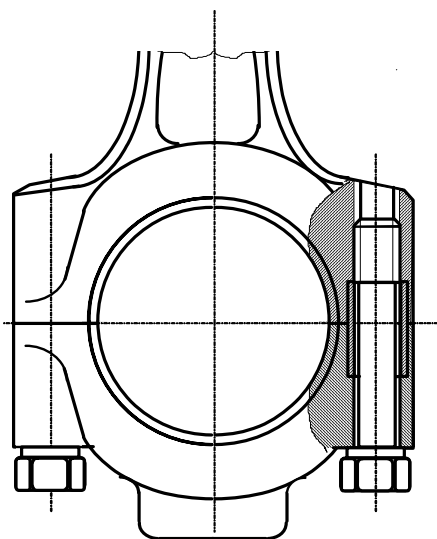
- a) válcovou plochou na dříku ojničního šroubu
- b) dvojicí válcových kolíků
- c) broušenou vložkou
- d) broušenou vložkou a drážkováním styčných ploch mezi hlavou a víkem (z důvodu zachycení sil v dělicí rovině) – u hlavy ojnice se šikmou dělicí rovinou
- e) dělicí rovinou hlavy ojnice vytvořenou řízeným lomem



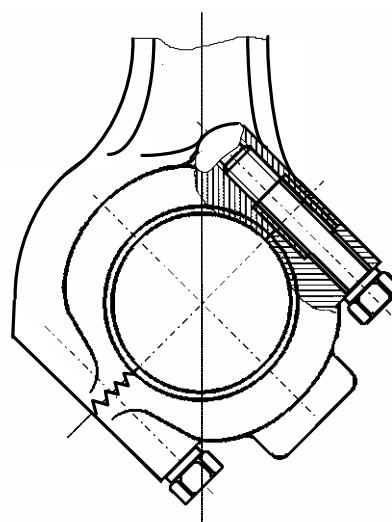
**Obr. 2.5** Polohování víka ojnice válcovou plochou na dřívku ojničního šroubu [9]



**Obr. 2.6** Polohování víka ojnice dvojicí válcových kolíků [9]



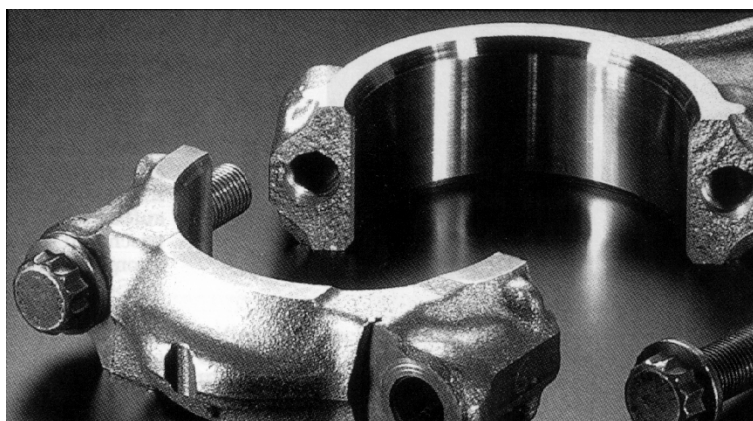
**Obr. 2.7** Polohování víka ojnice broušenou vložkou [9]



**Obr. 2.8** Polohování víka ojnice broušenou vložkou a drážkováním styčných ploch mezi hlavou a víkem ojnice [9]

Zabezpečení polohy dělicí rovinou hlavy ojnice vytvořenou řízeným lomem má dvě hlavní výhody. První je, že každý lom je zcela originální a tím nelze zaměnit víko hlavy ojnice s jinou hlavou ojnice a dokonce není možné přetočení víka na hlavě ojnice. Druhou výhodou jsou nižší náklady výroby. Tento způsob rovněž zabezpečuje zcela přesné dosednutí víka s hlavou ojnice.

Výrobní postup probíhá tak, že se na jednodílné ojnici vyznačí vrub na místě, kde má dojít k lomu. Ojnice je opracována jako celek s hlavou ojnice a po dokončení opracování bývá odlomena spodní část hlavy ojnice (např. rozpínacím trnem), které se říká víko ojnice. Hlavním požadavkem, že vzniklý lom musí být křehký a nesmějí nastat žádné plastické deformace.



*Obr. 2.9 Polohování víka ojnice dělicí rovinou hlavy ojnice vytvořenou řízeným lomem [9]*

### 2.1.5 Ojniční šrouby

Ojniční šrouby jsou namáhány proměnným dynamickým zatížením. Síly od tlaků plynů na namáhání ojnicích šroubů nemají vliv. Ojniční šrouby jsou namáhány především předepnutím šroubů a dále setrvačnými silami posuvných hmot pístní skupiny spolu s ojnicí bez jejího víka a setrvačnými silami rotačních hmot ojnice bez jejího víka. Dále může vznikat přídavné namáhání ojnicích šroubů a to především z důvodu nízké tuhosti hlavy ojnice. Nízká tuhost hlavy ojnice způsobuje deformaci, která má za následek přídavné ohybové namáhání ojnicích šroubů. Dále může vzniknout přídavné ohybové namáhání nedodržením kolmosti dosedací plochy šroubu k ose šroubu nebo dosedacích ploch hlavy ojnice k ose šroubu. Toto namáhání je o to nebezpečnější, protože při výpočtech není uvažováno a může způsobit utržení šroubu. Ojniční šrouby není třeba pojišťovat proti uvolnění, protože dotažením předepsaným momentem vzniknou tak silné třecí síly, které spolehlivě zabezpečí šrouby proti uvolnění. Umístění ojnicích šroubů je také velmi důležité, protože umístění ojnicích šroubů co nejbližší k ložiskovým pánvím zabezpečuje minimální rozevírání dělicí roviny hlavy a víka ojnice. Většinou se tato vzdálenost volí v rozmezí 1 až 1,5 mm. Stříhové namáhání ojnicích šroubů snižuje drážkování ozubených ploch v dělicí rovině hlavy ojnice.

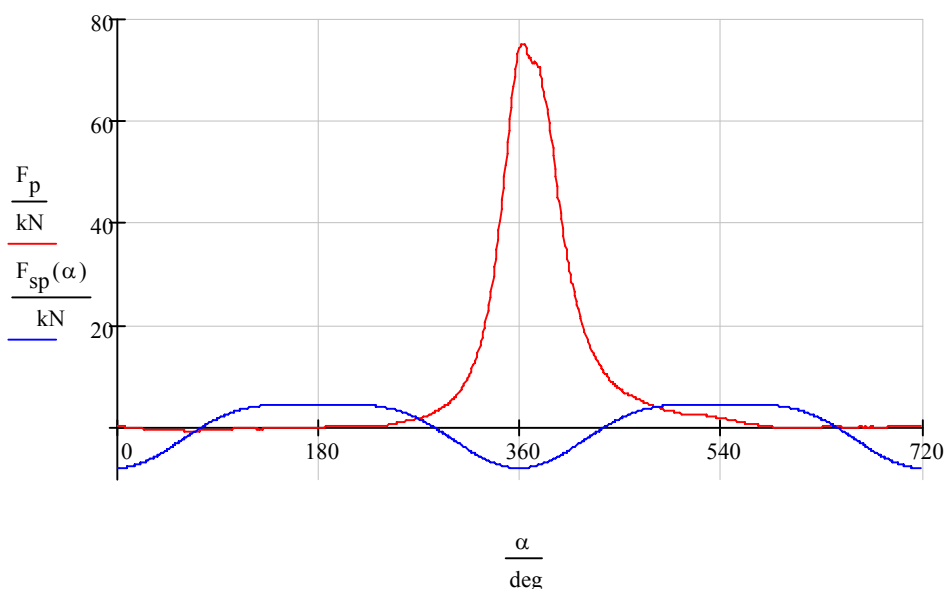
## 2.2 Namáhání ojnice

- Při provozu je ojnice namáhána:
- a) tlakovým namáháním v podélném směru od tlaků plynů na dno pístu
  - b) namáháním na vzpěr vlivem velkých tlakových sil
  - c) ohybovým namáháním dřívku ojnice vlivem neustálého kývavého pohybu dřívku kolem osy pístního čepu
  - d) namáháním od setrvačných sil ve formě tahových a tlakových sil v podélném směru následkem periodicky se měnících rychlostí pístu (setrvačné síly působí proti silám od tlaků plynů)

U čtyřdobých motorů je ojnice namáhána proměnnou silou na tah – tlak. U dvoudobých motorů je ojnice namáhána pouze na tlak. Vzhledem k časové proměnnosti silových účinků je ojnice namáhána únavově.

### 2.2.1 Namáhání oka ojnice

- Ojniční oko bývá zatěžováno:
- silami od tlaků plynů působících při spalování na dno pístu
  - setrvačnými silami posuvných hmot pístní skupiny
  - předpětím od zalísování a ohřevu ložiskového pouzdra



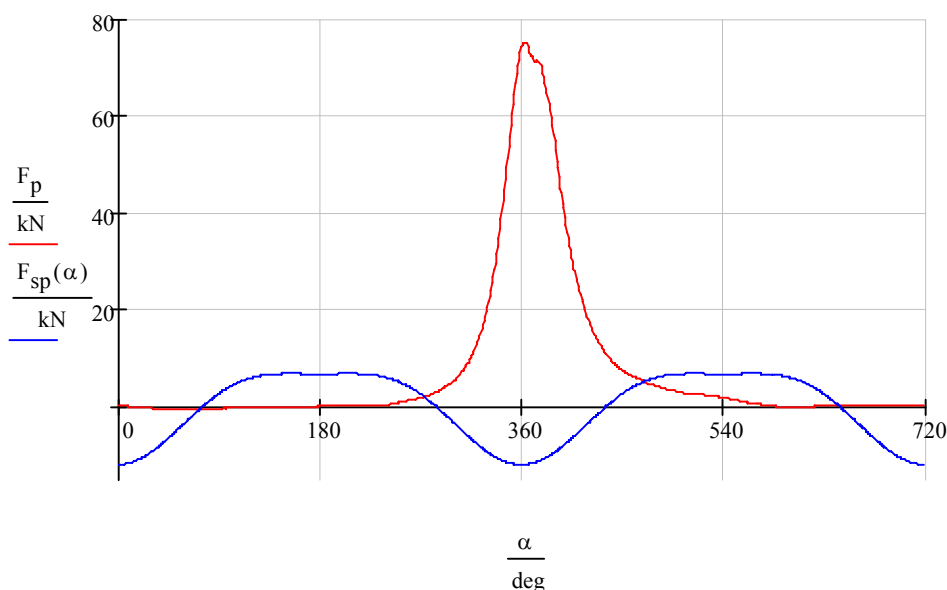
**Graf 2.1** Příklad průběhu sil zatěžujících oko ojnice v závislosti na natočení klikového hřídel

$F_p$  – síla od tlaků plynů,  $F_{sp}$  – síla od setrvačných sil

Z grafu je zřejmé, že horní část oka ojnice je zatěžována mnohem menší silou než spodní část oka ojnice. Z tohoto průběhu je zřejmé, že horní část může být užší a tím pádem se může užít oko ve tvaru lichoběžníku nebo stupňovité oko. Dále je zřejmé, že výsledné síly vzniknou tak, že jsou setrvačné síly odečteny od spalovacích tlaků. Z toho plyne, že maximální tlakové síly budou menší.

### 2.2.2 Namáhání dřívku ojnice

- Dřívík ojnice je namáhán:
- silami od tlaků plynů působících při spalování na dno pístu
  - setrvačnými silami posuvných hmot pístní skupiny zvětšenými o posuvné hmoty ojnice nad kontrolovaným místem
  - na vzpěr působením velkých tlakových sil
  - ohybem v důsledku neustálého kývavého pohybu kolem osy pístního čepu



**Graf 2.2** Příklad průběhu sil zatěžujících střed dřívku ojnice v závislosti na natočení klikového hřídel  
 $F_p$  – síla od tlaků plynů,  $F_{sp}$  – síla od setrvačných sil

Je zřejmé, že setrvačné síly uvažované ojnice jsou větší (u namáhání ojnice měly minimální hodnotu kolem -8 kN, tak ve středu dřívku již tato hodnota činí téměř -12 kN). Je patrné, že s rostoucí vzdáleností od oka ojnice po hlavu ojnice hodnoty setrvačných sil rostou. Výsledkem je, že maximální tlakové síly jsou menší, ale tahové jsou větší.

### 2.2.3 Namáhání hlavy ojnice

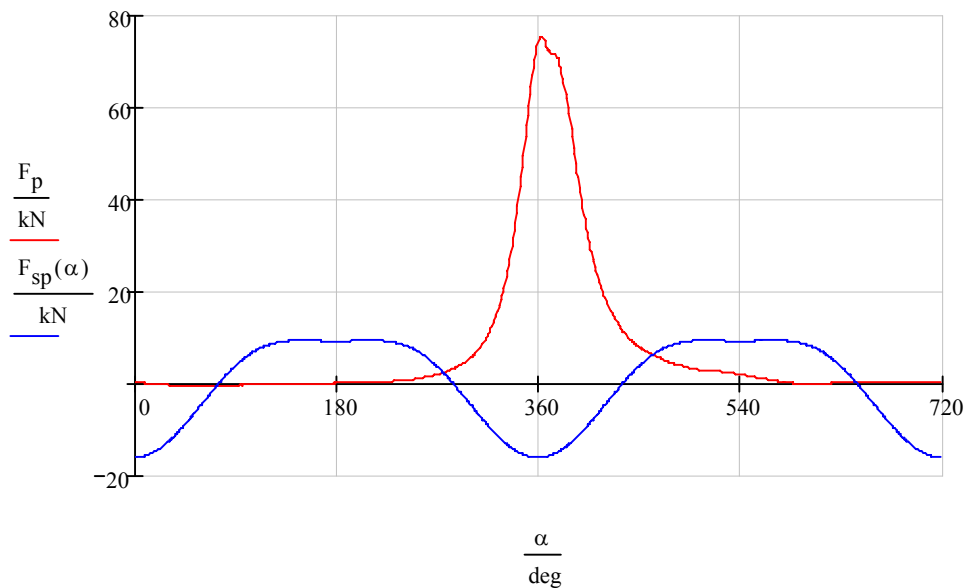
V důsledku působení velkých setrvačných sil od posuvných a rotujících hmotnostní vznikají v příčných průřezích hlavy ojnice velká napětí. Nebezpečná jsou především dvě místa:

- ve víku v rovině souměrnosti víka ojnice
- v místě ukotvení hlavy do dřívku ojnice

#### 2.2.3.1 Namáhání víka v rovině souměrnosti víka ojnice

Na tomto zatěžování se nepodílejí síly od tlaků plynů, ale pouze setrvačné síly od posuvných a rotujících hmotností. Setrvačné síly vznikají součtem posuvné hmotnosti pístní skupiny a příslušné části posuvných hmot ojnice s odstředivou silou rotující hmoty ojnice zmenšenou o hmotnost víka ojnice. Namáhání víka je kombinované na ohyb a na tah.

Jak již bylo výše uvedeno, na zatěžování víka v rovině souměrnosti ojnice nemají vliv tlakové síly, takže ani kladné setrvačné síly na zatěžování víka vliv nemají. Z Obr. 2.4 je zřejmé, že setrvačné síly působící na víko uvažované ojnice jsou opět větší (největší hodnota je nyní kolem -16 kN). Nárůst setrvačných je opět způsoben započítáním hmotností ojnice nad kontrolovaným místem.



**Graf 2.3 Příklad průběhu sil zatěžujících víko v rovině souměrnosti víka ojnice v závislosti na natočení klikového hřídel**  
 $F_p$  – síla od tlaků plynů,  $F_{sp}$  – síla od setrvačných sil

### 2.2.3.2 Namáhání hlavy v místě ukotvení hlavy do dřívku ojnice

V místě ukotvení hlavy do dřívku ojnice je průřez namáhán:

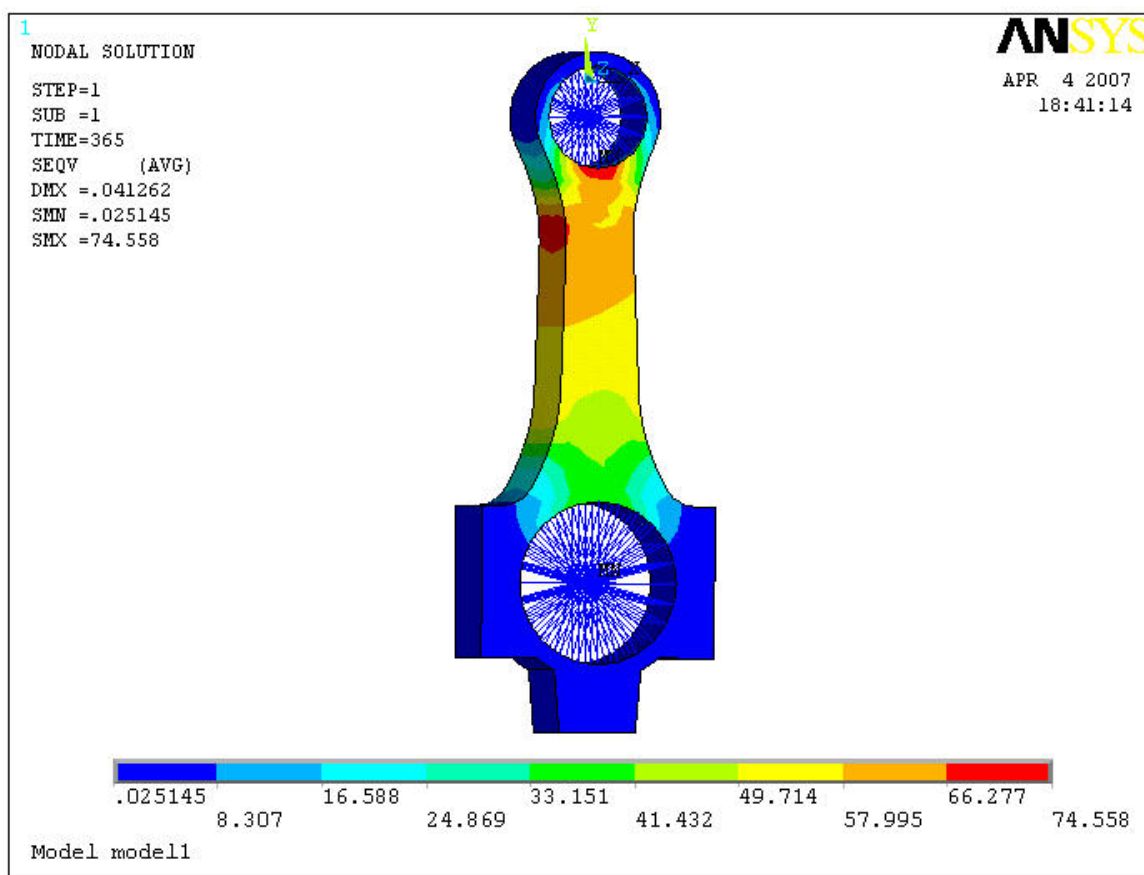
- silami od tlaků plynů působících při spalování na dno pístu
- setrvačnými silami posuvných hmot pístní skupiny zvětšenými o posuvné hmoty ojnice a odstředivou sílu rotujících hmotnosti ojnice – zmenšenými o hmotnost víka ojnice (setrvačná síla má stejnou velikost jako v předchozím případě)

Výsledné namáhání tohoto místa je kombinované na tah, ohyb a smyk. Jelikož je namáhání tohoto místa velmi složité a setrvačné síly jsou značné, tak se mu musí při výpočtech věnovat zvýšené pozornosti.

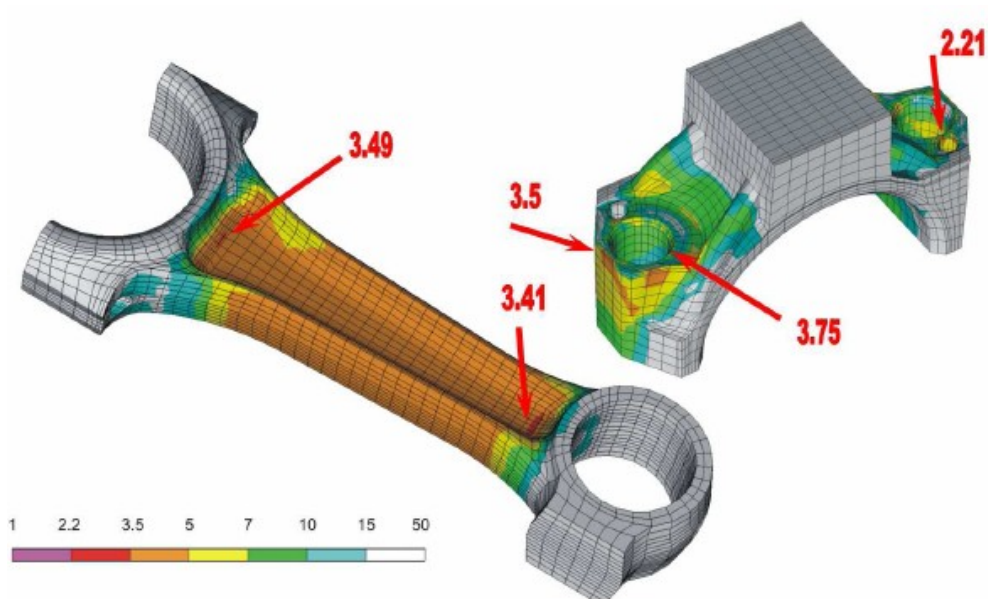
### 2.2.4 Ukázky počítačové podpory při výpočtech zatížení ojníc

Obr 2.10 názorně ukazuje redukované napětí podle von Mises ve velmi zjednodušeném modelu ojnice pomocí FEM (FINITE ELEMENT METHOD). Z obrázku je zřejmé, že maximální napětí je v místě přechodu oka do dřívku ojnice a činí téměř 75 MPa. Jen pro porovnání, mez kluzu materiálu ojnice neklesá pod 400 MPa.

Obr 2.11 znázorňuje únavovou analýzu ojnice pomocí softwaru FEMFAT. Tento obrázek zobrazuje rozdělení únavové bezpečnosti po povrchu ojnice. Tato ojnice je z naftového motoru užitkového vozidla, u kterých jsou nižší otáčky motoru, proto byla analýza provedena pro jmenovité otáčky motoru 2200 ot/min, jelikož u těchto motorů nejsou obvykle rezonance v celém rozsahu otáček. Největším přispěvatelem napětí bývají spalovací tlaky, předpětí šroubů a částečně odstředivé síly, které se zvyšují s druhou mocninou úhlové rychlosti.



Obr. 2.10 Ukázka napět'ové analýzy ojnice



Obr. 2.11 Únavová analýza ojnice [5]



## 2.3 Vyvážení ojníc



**Obr. 2.12 Umístění vyvažovacích nákovků**

Použití ojníc, které mají stejné hmotnosti posuvných a rotačních částí na jednom motoru je velice důležité z důvodu omezení kmitání motoru.

Dříve se použití ojníc stejných hmotností zajišťovalo pomocí užití vyvažovacích nákovků v oblasti oka a víka ojnice (viz Obr. 2.12). Stejná hmotnost posuvných a rotačních částí se dosáhla odbrušováním těchto nákovků.

V současné době se však většinou ojnice již při výrobě zařazují podle hmotnosti posuvných a rotačních částí do různých hmotnostních tříd a pro užití na motoru se užívají pouze ojnice stejné hmotnostní třídy.

## 2.4 Požadavky na ojnice

Hlavní požadavek je kladen na pevnost ojnice a z toho plynoucí požadavek na vysokou tuhost hlavy a oka ojnice. Dále je kladen důraz na nízkou hmotnost ojnice, kvůli snížení velikosti setrvačných sil. V neposlední řadě jsou velmi důležité i tvarové a rozměrové požadavky, které spočívají v sousostí jednotlivých hlavních částí ojnice, oka a hlavy. Rozteč středů oka a hlavy by měla být co nejpřesnější, neboť přímo ovlivňuje kompresní poměr a může způsobit i havárii motoru. Posledním rozměrovým požadavkem je velmi malé zkroucení ojnice – přetočení os oka a hlavy ojnice.

## 2.5 Výroba ojnice

V současné době se ojnice vyrábějí převážně z ocelí tříd 11 až 15, pro vysoce namáhané ojnice přeplňovaných motorů se používají i třídy 16. Ojnice se výhradně kovají v zápustce. Tato metoda zabezpečuje materiál dostatečně pevný a houževnatý vlivem zhuštění vnitřní struktury kováním. Přesnost vyrobených zápustek snižuje podíl třískové obrábění na minimum. To je prakticky prováděno pouze na místech uložení pístního čepu a ložiskových pánví. Po obrobení se v některých případech provádí tepelné zušlechťování. Pro zvýšení únavové pevnosti se povrch vysoce namáhaných ojníc kuličkuje nebo leští. Někdy se pro kování používají legované práškové oceli a vzniká slinitý výkovek, který má lepší parametry než výkovek vzniklý kováním v zápustce z legované oceli. U malých motorů se používají lité ojnice z kujné nebo tvárné litiny. U velmi málo zatěžovaných motorů (např. zahradní technika) se někdy užívají hliníkové ojnice.



### 2.5.1 Ukázka výroby ojníc



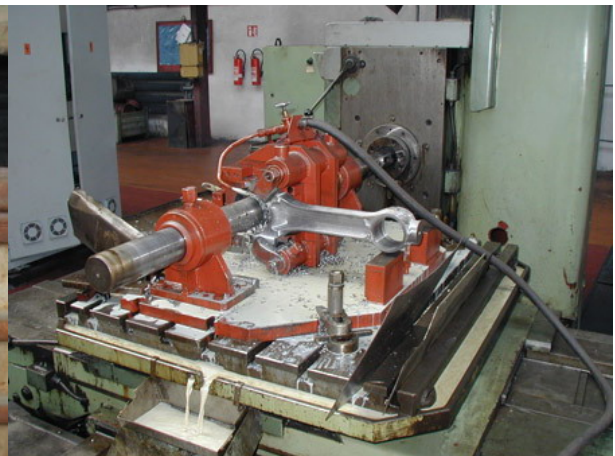
*Obr. 2.13 Zápustka [10]*



*2.14 Polotovár ojnice [10]*



*Obr. 2.15 Výkovek ojnice [10]*



*Obr. 2.16 Opracování hlavy a oka [10]*



*Obr. 2.17 Srovnání dosedací plochy hlavy [10]*



*Obr. 2.18 Hotová ojnice [10]*

## 2.6 Porovnání ojníc různých výrobců



*Obr. 2.18 Ojnice Zetor, typ motoru UŘ III*

Na Obr. 2.18 je vyobrazena ojnice, která je předmětem řešení této práce. Je to ojnice firmy Zetor modelové řady motoru UŘ III. Tato ojnice je charakteristická pozvolným rozšiřováním dříku od oka k hlavě ojnice. Dále je patrné umístění vyvažovacích nákovků na spodní části víka ojnice a boku oka ojnice. Ustavení víka a hlavy ojnice je zprostředkováno přes dvojici válcových kolíků. Dělicí rovina víka a hlavy ojnice je provedeno v kolmé rovině a spojení obou částí je uskutečněno přes dvojici ojničních šroubů. Oko ojnice má obdélníkový tvar.



*Obr. 2.19 Ojnice Liaz, řada vozidla 200*

Na Obr. 2.19 je vyobrazena ojnice firmy Liaz modelové řady vozidla 200. Dřík se v čelním pohledu nerozšiřuje a v bočním pohledu se dokonce směrem do středu úží. Toto provedení je vytvořeno z důvodu snížení hmotnosti v místě, kde ojnice není nebezpečně namáhána. Vyvažovací nákovky jsou také u této ojnice umístěny na spodní části víka a z boku oka ojnice. Ustavení vzájemné polohy víka a hlavy ojnice je provedeno přes drážkovanou dosedací plochu mezi hlavou a víkem ojnice. Oko ojnice má lichoběžníkový tvar. Zajímavostí je, že víko k hlavě je připojeno přes čtyři ojniční šrouby.





*Obr. 2.20 Ojnice Avia, typ vozidla A31T*

Na Obr. 2.20 je vyobrazena ojnice firmy Avia modelové řady vozidla A31T. Tato ojnice má mírně rozšiřující se dřík od oka po hlavu ojnice. Zajímavostí je, že tato ojnice neobsahuje žádné vyvažovací nákovky. Vzájemné středění víka a hlavy ojnice provedeno přes válcovou plochu na dříku ojničního šroubu. Dělicí rovina víka a hlavy ojnice je v kolmé rovině. Oko ojnice má obdélníkový tvar.



*Obr. 2.21 Ojnice Mercedes Benz, typ vozidla Actros*

Na Obr. 2.21 je zobrazena bezesporu konstrukčně nejzajímavější ojnice. Je to ojnice firmy Mercedes Benz modelové řady vozidla Actros. Dřík ojnice zachovává konstantní tloušťku a rozšiřuje se až těsně před připojením k hlavě a oku ojnice. Tato ojnice obsahuje pouze jeden vyvažovací nákovek a to na spodní části víka ojnice. Víko a hlava ojnice je vzájemně ustavena přes dělicí rovinu vytvořenou řízeným lomem. Dělení víka a hlavy ojnice je provedeno v šikmé rovině. Oko ojnice má lichoběžníkový tvar.

### 3 Technické parametry motoru a ojnice

Ojnice (viz Obr. 2.18), která je předmětem této diplomové práce je ojnice vznětového motoru firmy Zetor, modifikované řady UŘ III. Pro řešení této diplomové práce jsem vybral technické parametry motoru označení Zetor 1504 (viz Obr. 3.1), který se montuje do traktorů Zetor Forterra (viz Obr. 3.2), jež je v současné době vlajkovou lodí firmy Zetor. Tento typ motoru jsem vybral z toho důvodu, že má nejvyšší jmenovitý výkon a krouticí moment, tudíž působí nejvyšší zatížení ojnice.



Obr. 3.1 Motor Zetor 1504 [11]



Obr. 3.2 Traktor typové řady Zetor Forterra [12]

#### 3.1 Technické parametry motoru

označení motoru:

typ motoru:

výkon:

krouticí moment:

převýšení kroutícího momentu:

jmenovité otáčky:

max. přeběhové otáčky:

volnoběžné otáčky:

taktnost motoru (4 taktní):

počet válců:

kompresní poměr:

vrtání válce:

zdvih pístu:

zdvihový objem válců:

způsob plnění:

plnění motoru:

mezichlazení:

chlazení motoru:

druh rozvodu:

Zetor 1504

vznětový, řadový, stojatý

$P_e = 90$  [kW]

$M_k = 525$  [Nm]

$M_{kp} = 35$  [%]

$n = 2200$  [1/min]

$n_p = 2460$  [1/min]

$n_v = 750$  [1/min]

$\tau = 0,5$

$i = 4$

$\varepsilon = 17$

$D = 105$  [mm]

$Z = 120$  [mm]

$V_z = 4156$  [cm<sup>3</sup>]

přímý vstřík

turbodmychadlo

vzduch – vzduch

kapalinové

OHV

rameno klikového hřídele:	$r$	=	60	[mm]
hmotnost pístní skupiny (píst + pístní kroužky + pístní čep + pojistky)	$m_{\text{pist}}$	=	2,068	[kg]
<b>vyvážení motoru:</b>				
počet vyvažovacích hřídelů:	$n_h$	=	2	
hmotnost vyvažovacího hřídele:	$m_h$	=	4,229	[kg]
poloměr těžiště:	$r_{\text{Th}}$	=	5,022	[mm]

### 3.2 Technické parametry ojnice

materiál ojnice:	ocel: 14240.3			
vzdálenost středů horního a dolního oka:	$L_{\text{oj}}$	=	215	[mm]
průměr horního oka:	$D_H$	=	44	[mm]
průměr dolního oka:	$D_D$	=	70	[mm]
průměr horního oka s pouzdem:	$D_{\text{HP}}$	=	40	[mm]
průměr dolního oka s pánevemi:	$D_{\text{DP}}$	=	66	[mm]
šířka horního a dolního oka:	$H_{\text{HD}}$	=	40	[mm]
udávaná hmotnost ojnice:	$m_{\text{oj-u}}$	=	2,649	[kg]
udávaná hmotnost posuvných částí ojnice:	$m_{\text{A-u}}$	=	0,899	[kg]
udávaná hmotnost rotačních částí ojnice:	$m_{\text{B-u}}$	=	1,750	[kg]

## 4 Tvorba 3D modelu stávající ojnice

Pro vytvoření modelu jsem využil software PRO/ENGINEER 3.0 (dále Pro/E). Při modelování jsem použil základní příkazy objemového modelování. Nejprve jsem vymodeloval ojnici a všechny související části (víko, kolíky, šrouby, pouzdro a pánve) dle výkresové dokumentace společnosti Zetor. Při srovnání s vyrobenou ojnicí jsem zjistil, že se můj vytvořený model mírně liší, proto jsem využil nabídku pana Ing. Ramíka a použil ústavní 3D-scanner Atos k nasnímání vyrobené ojnice. Pomocí porovnání mnou vymodelované ojnice s vyrobenou, jsem upravil hlavní rozdíly. Po těchto úkonech jsem ještě vyrobenou ojnici zvážil a odkýval, abych prostřednictvím 2 bodové redukce určil posuvné a rotační hmotnosti reálné ojnice a tyto hmotnosti jsem porovnal s vymodelovanou ojnicí a hmotnostmi udávanými ve výkresové dokumentaci.

### 4.1 Tvorba 3D modelu dle výkresové dokumentace

V této fázi práce jsem si vytvořil jednotlivé části (PART) ojnice systémem postupného přidávání objemů a jednotlivé části jsem sloučil do sestavy (ASSEMBLY).

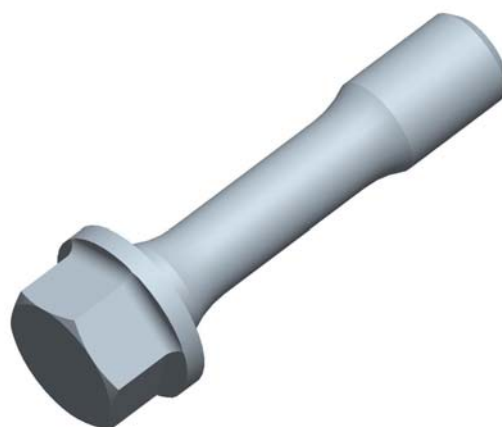
Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny jednotlivé vymodelované části ojnice na základě výkresové dokumentace.



*Obr. 4.1 Vymodelovaná ojnice*



*Obr. 4.2 Vymodelované víko*



*Obr. 4.3 Vymodelovaný šroub*



**Obr. 4.4** Vymodelované pánve



**Obr. 4.5** Vymodelované pouzdro

Na následujícím obrázku je vyobrazeno umístění jednotlivých částí do sestavy (viz Obr. 4.6) a na druhém obrázku je ukázána kompletní sestava (viz Obr. 4.7).



**Obr. 4.6** Umístění částí do sestavy



**Obr. 4.7** Vymodelovaná sestava



Už na první pohled při srovnání vymodelované ojnice (viz Obr. 4.7) se skutečnou (viz Obr. 2.18) je zřejmé, že se model odlišuje. Proto následuje 3D scanování skutečné ojnice, z důvodů zjištění nejpodstatnějších rozdílů.

## 4.2 Scanování vyrobené ojnice

Jak již bylo výše uvedeno pro nasnímání ojnice bylo využito ústavní 3D pracoviště, jehož hlavním vybavením je 3D scanner ATOS.

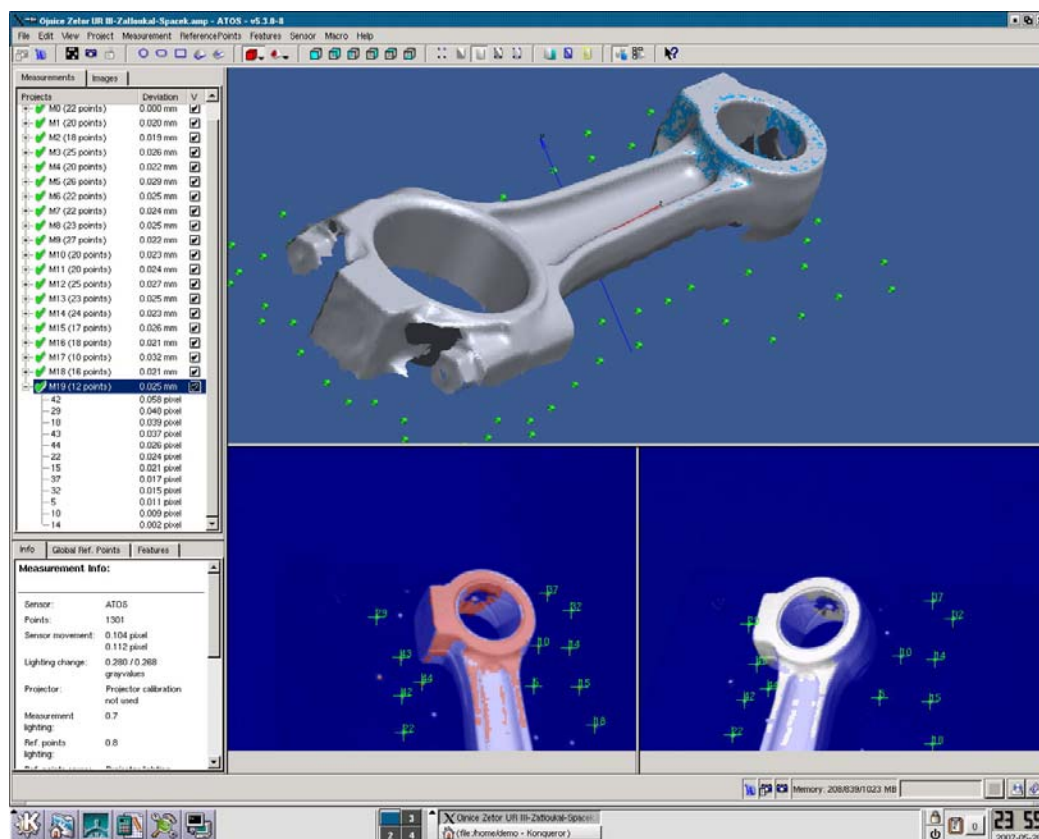
Na začátku je nutné pokrýt součást křídlovou směsí rozředěnou v lihu a umístit lokalizační body (viz Obr. 4.8) na součást a podložku. Obslužný software tyto body potřebuje, aby mohl umístit navazující snímky na správné místo, podmínkou jsou nejméně 3 viditelné body.



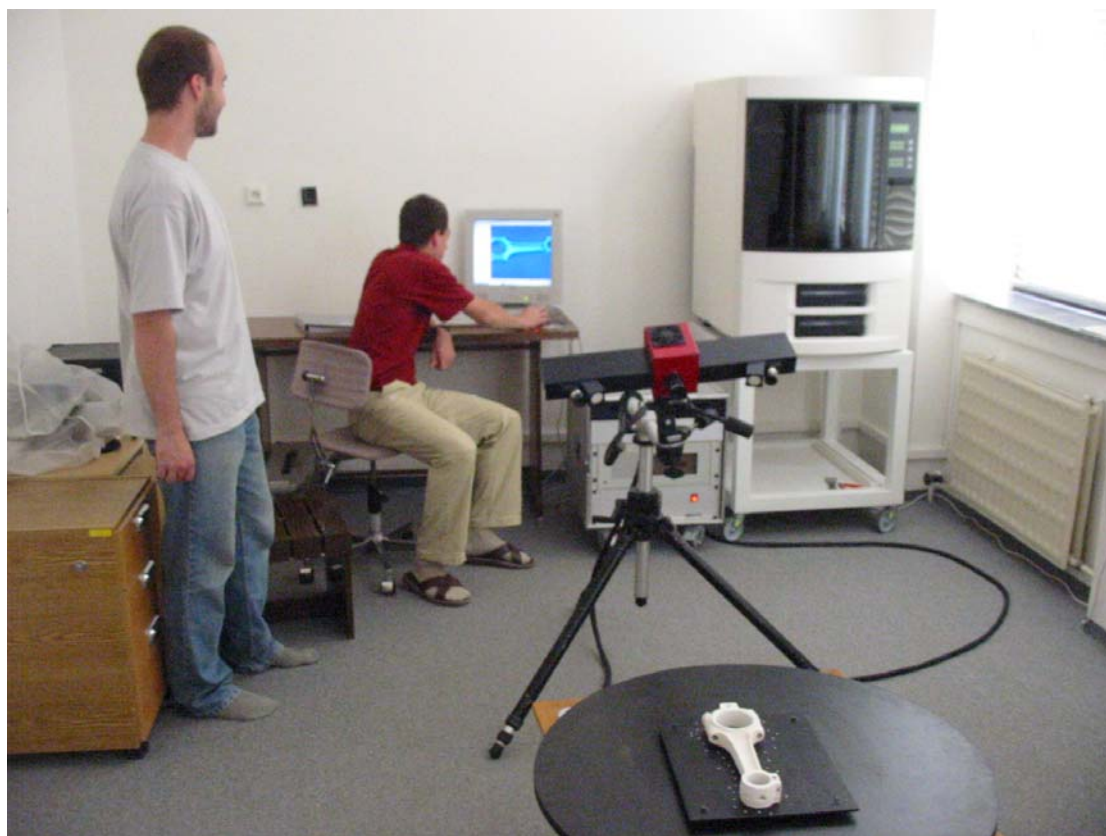
**Obr. 4.8 Umístění lokalizačních bodů**

Po nasnímání celé poloviny součásti je při otočení důležité, odstranit veškeré body z podložky a umístit body, které mají jinou polohu. Při nedodržení tohoto pravidla software přiřadí špatnou polohu novým snímkům. Na Obr. 4.9 je vidět, jak přibývají plochy a ojnice získává konečný tvar. Na Obr. 4.10 je ještě pohled na místnost 3D pracoviště, v jejímž středu je umístěna na podložce snímaná ojnice, nad ní je umístěn 3D scanner ATOS a na pozadí je vidět monitor, který právě zobrazuje obslužný software scanneru. Na Obr. 4.11 je již vidět kompletní nasnímaná ojnice a z obrázku je zřejmé, že software umístil souřadný systém náhodně do dířku ojnice. Toto umístění je však pro další práci se součásti velice nevýhodné, proto obslužný software umožňuje vytvoření primitiv, což jsou např. plochy, přímky, body. U ojnice je velmi výhodné využít válcový tvar horního a dolního oka, což umožňuje získat osy obou ok. Dále je dobré použít opěrné plochy horního a dolního oka. Já jsem tvorbu primitiv v tomto softwaru nevyužil. Nasnímanou ojnici jsem uložil jako formát STL a pro další zpracování užil software Pro/E. V tomto softwaru jsem vymazal plošky, které na první pohled nepatřily k ojnici a pro vytvoření os využil příkazu RESTYLE, pomocí kterého jsem vytvořil válcovou plochu horního a dolního oka. Poté jsem vytvořil opěrnou rovinu pomocí 3 bodů na opěrné ploše horního a dolního oka a rovnoběžnou rovinou jsem vytvořil souřadný systém ve středu dolního oka. Na Obr. 4.12 je vyobrazena upravená nasnímaná ojnice v Pro/E s novým souřadným systémem.

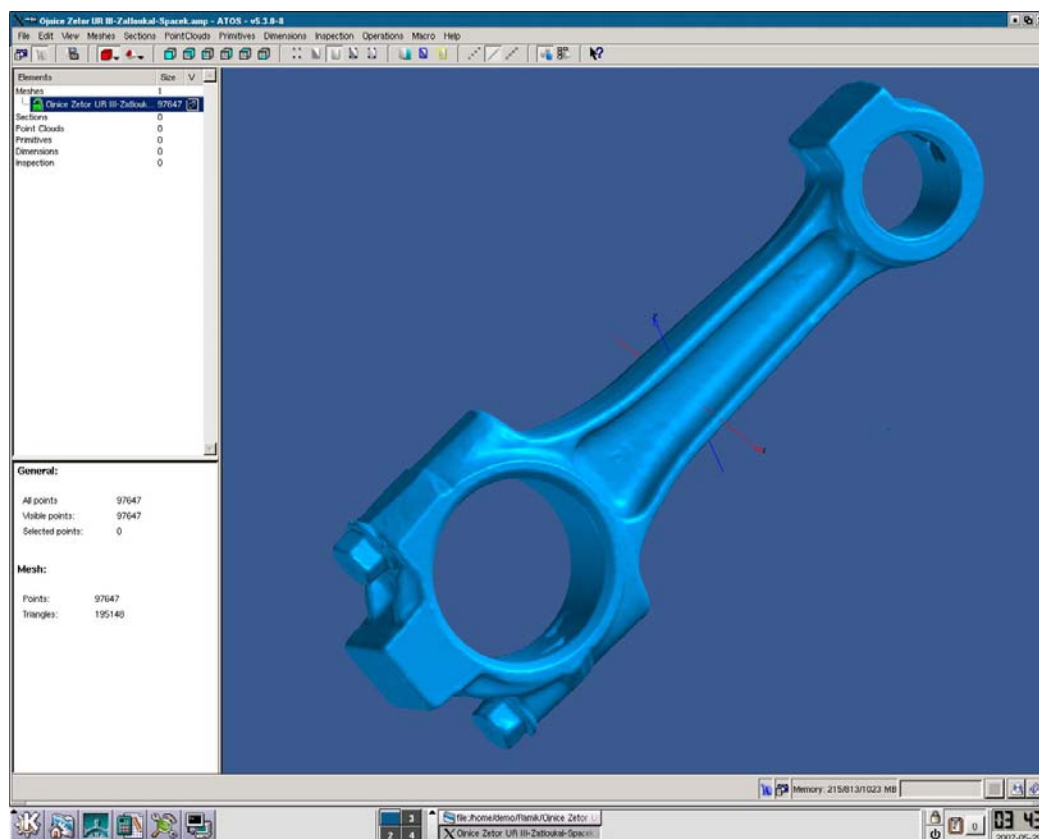




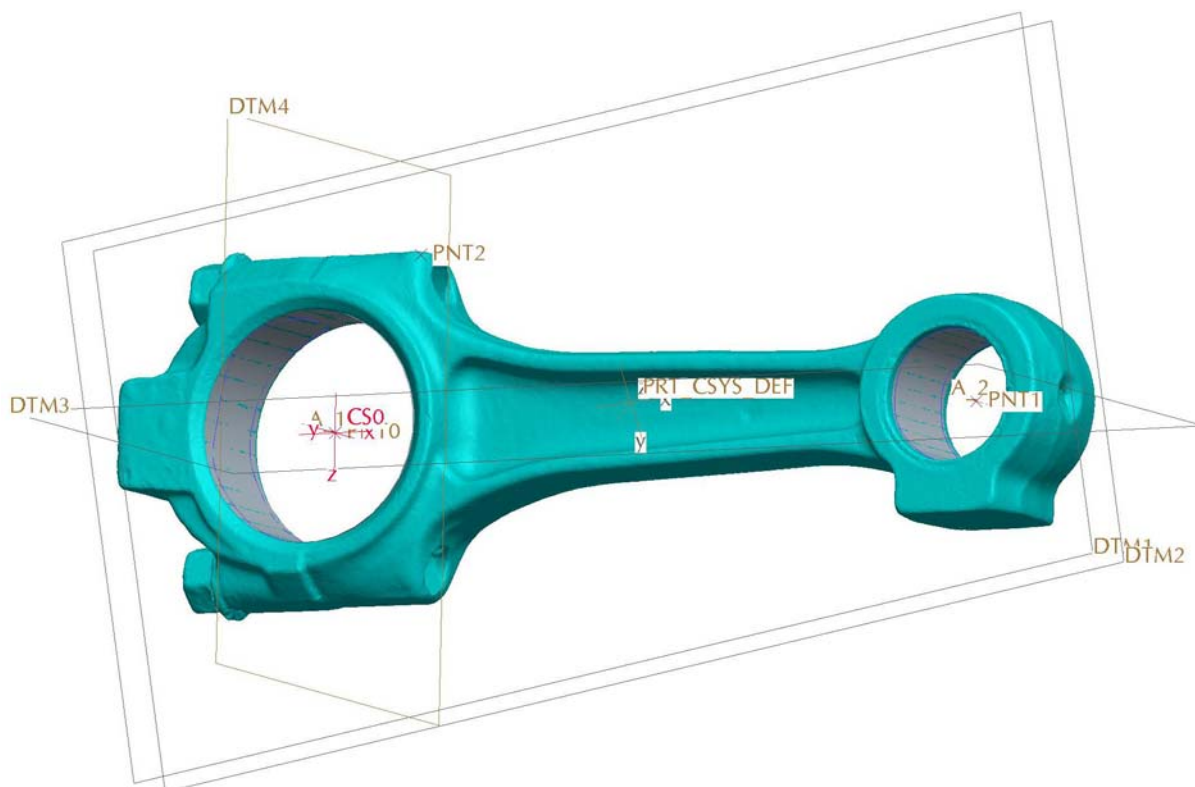
Obr. 4.9 Rozpracované snímání



Obr. 4.10 Pohled na místnost 3D pracoviště



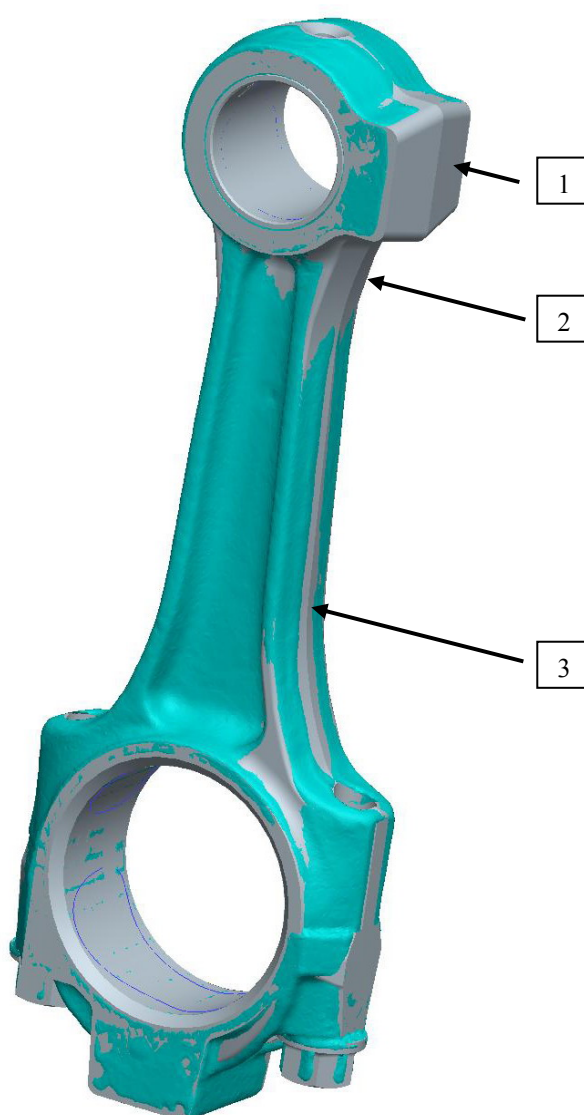
Obr. 4.11 Kompletní nasnímaná ojnice



Obr. 4.12 Upravená nasnímaná ojnice v Pro/E

### 4.3 Přizpůsobení modelu ojnice skutečnému tvaru

Na Obr. 4.13 je vidět přiložený model ojnice k nasnímanému tvaru reálné ojnice. Z obrázku je zřejmé, že nasnímaný tvar ojnice model přesně nepřekrývá. To je způsobeno zejména tím, že nanesená vrstva křídové směsi přece jen něco na objemu přidá a zejména tím, že vytvořený souřadný systém na nasnímané ojnici není přesný, což způsobuje zejména na tak rozměrné součásti už docela podstatné rozměrové odchylky. Na modelu jsem však udělal několik úprav a to zejména, jak ukazují šipky, zmenšil vyvažovací nákovek v oblasti horního oka (viz šipka č. 1), zmenšil poloměr zaoblení přechodu dřívku do horního oka (viz šipka č. 2) z  $r = 90$  na  $r = 70$  [mm] a srazil středovou hranu na obvodu ojnice (viz šipka č. 3). Úprav bylo provedeno samozřejmě víc, ale tohle byly ty nejpodstatnější. Na Obr. 4.14 je již vidět srovnání nasnímaného tvaru ojnice a upraveného modelu. Na Obr. 4.15 je vyobrazena konečná verze vymodelované ojnice.



Obr. 4.13 Přiložení scanu a modelu



Obr. 4.14 Přiložení scanu a upraveného modelu



Obr. 4.15 Konečná verze modelu ojnice

Program Pro/E též umožňuje využít hmotnostní analýzy. Této možnosti jsem využil také já, abych mohl porovnat odchylky mezi hmotnostmi napsanými ve výkresové dokumentaci a vymodelované ojnici.

**Údaje zjištěné z hmotnostní analýzy:**

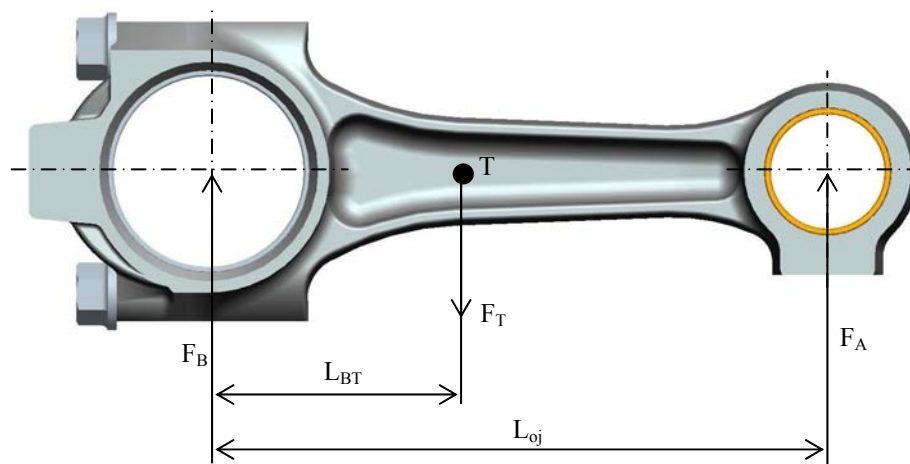
hmotnost vymodelované ojnice:

$$m_{oj-v} = 2,671 \text{ [kg]}$$

vzdálenost těžiště od středu dolního oka:

$$L_{AT} = 72,217 \text{ [mm]}$$

**Momentová rovnováha (ke středu dolního oka):**



Obr. 4.16 Schéma momentové rovnováhy

$$F_A \cdot L_{oj} - F_T \cdot L_{BT} = 0 \tag{4.1}$$

$$F_A \cdot L_{oj} = F_T \cdot L_{BT} \tag{4.2}$$

$$m_{A-v} \cdot g \cdot L_{oj} = m_{oj-v} \cdot g \cdot L_{BT} \tag{4.3}$$

**hmotnost posuvných částí vymodelované ojnice:**

$$m_{A-v} = \frac{m_{oj-v} \cdot L_{BT}}{L} \tag{4.4}$$

$$m_{A-v} = 0,896 \text{ [kg]}$$

**hmotnost rotačních částí vymodelované ojnice:**

$$m_{B-v} = m_{oj-v} - m_{A-v} \tag{4.5}$$

$$m_{B-v} = 1,775 \text{ [kg]}$$



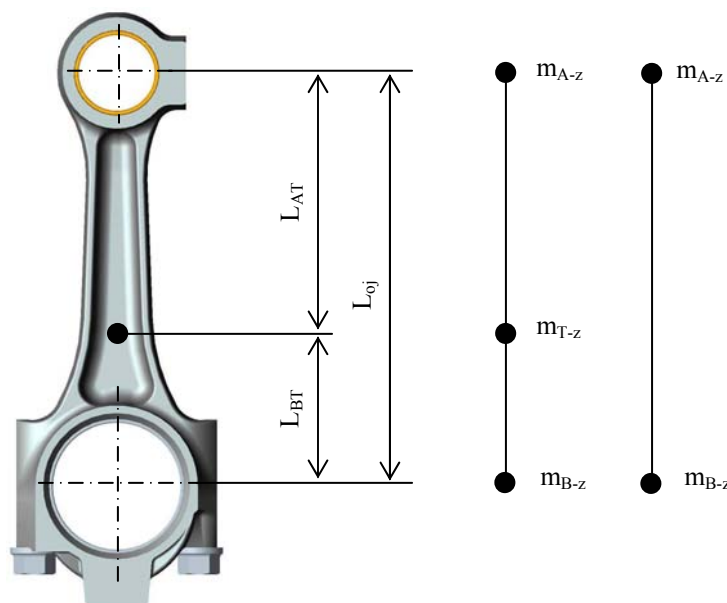
Jak je patrné, tak se výsledky ve srovnání s uvedenými údaji v kapitole 3.2 nepatrně liší. Hmotnosti posuvných částí jsou však téměř shodné (rozdíl činí pouze 0,003 [kg] ), mírně větší rozdíl je u hmotnosti rotačních částí, který činí 0,025 [kg] . Tyto rozdíly jsou však vzhledem k celkové váze ojnice zanedbatelné.

#### 4.4 Ověření rozložení hmotnosti reálné ojnice metodou odkývání

Tuto metodu jsem využil z důvodu porovnání rozložení hmotností v modelu s vyrobenou ojnici a uvedenými hmotnostmi ve výkresové dokumentaci. Reálná ojnice se dá jednoduše zvážit, ale už složitěji se dá zjistit rozložení hmotností do posuvných a rotačních hmot. Z tohoto důvodu se zjišťuje rozložení hmotností pomocí momentů setrvačnosti (metodou odkývání) a následnou redukcí do dvou nebo tří bodů.

Ojnice vykonává při chodu motoru velmi složitý pohyb. Horní oko koná přímočarý vratný pohyb spolu s pístní skupinou. Spodní oko koná rotační pohyb spolu s ojnicím čepem kolem hlavních klikových čepů a zbytek ojnice vykonává obecný rovinný pohyb.

Z výše uvedeného je patrné, že výpočet setrvačných sil by byl vzhledem k složitému pohybu ojnice velmi složitý, proto se prvky klikového mechanismu nahrazují soustavou hmotných bodů. Provádí se redukce do dvou ( střed horního a dolního oka), nebo tří (střed horního, dolního oka a těžiště) hmotných bodů.



Obr. 4.17 Schéma dvoubodové a třibodové redukce

Těleso libovolného tvaru lze nahradit soustavou pevně spojených hmotných bodů. Jejich velikost i poloha musí být taková, aby statické i dynamické účinky této soustavy této náhradní soustavy byly rovnocenné účinkům původního tělesa, proto musí platit následující tři podmínky.

##### Podmínky redukce hmotnosti:

- 1) součet hmotností náhradní soustavy musí být roven hmotnosti nahrazovaného tělesa:

$$m_{oj-z} = m_{A-z} + m_{B-z} + m_{T-z}$$

- 2) těžiště náhradní soustavy musí být totožné s těžištěm nahrazovaného tělesa:

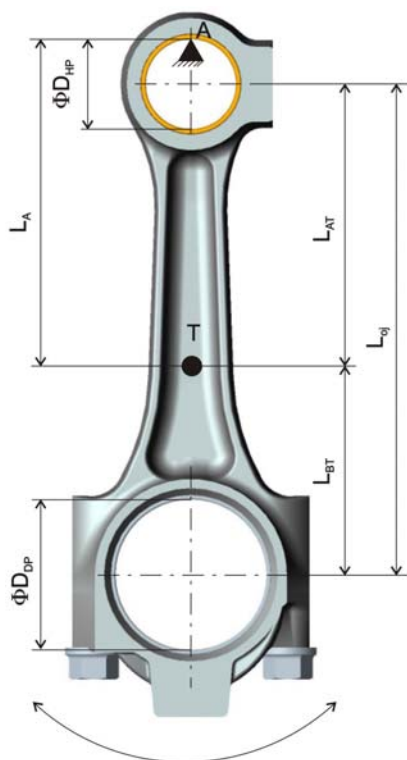
$$m_{A-z} \cdot L_{AT} = m_{B-z} \cdot L_{BT}$$

- 3) moment setrvačnosti náhradního tělesa k ose jdoucí těžištěm musí být roven momentu setrvačnosti nahrazovaného tělesa k téže ose

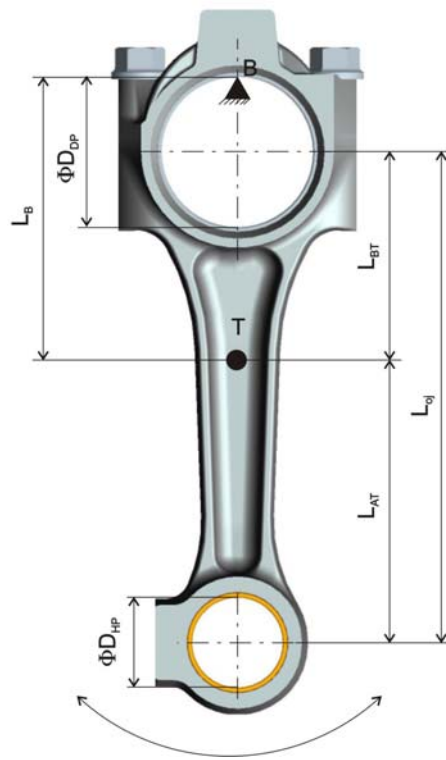
$$J_T = m_{A-z} \cdot L_{AT}^2 + m_{B-z} \cdot L_{BT}^2$$

#### 4.4.1 Měření odkývání ojnice

U tohoto měření se uvažuje ojnice jako fyzické kyvadlo. Měření probíhá tak, že se ojnice nejprve umístí horním okem na břit stojánku (viz Obr. 4.18). Spodní oko se posune z rovnovážné polohy a při uvolnění se na stopkách měří doba 200 kmitů. Jako doba jednoho kmitu se uvažuje doba, za kterou se spodní oko ojnice vrátí do polohy uvolnění. Po tomto měření se ojnice umístí na břit stojánku za spodní oko (viz Obr. 4.19) a měření doby kmitů za toto oko probíhá stejně jako za horní oko. Na břit se ojnice umísťuje z toho důvodu, protože pro uvažování fyzického kyvadla je důležité uložení bez tření, což samozřejmě nejde úplně zajistit, ale při užití břitu je toto tření velmi nízké. Na ojnici dále působí odpor vzduchu, což také mírně ovlivňuje přesnost měření. Pro zjištění hmotností se však kýváním způsobená nepřesnost dá zanedbat.



Obr. 4.18 Schéma odkývání za horní oko (bod A)



Obr. 4.19 Schéma odkývání za dolní oko (bod B)

#### Naměřené doby kmitů při uložení za horní oko:

počet kmitů:

$$n_A = 200$$

počet měření:

$$n_{mA} = 4$$

doba  $n_A$  kmitů při prvním měření:

$$t_{A1} = 189,56 \text{ [s]}$$

doba  $n_A$  kmitů při druhém měření:

$$t_{A2} = 189,97 \text{ [s]}$$

doba  $n_A$  kmitů při třetím měření:

$$t_{A3} = 190,13 \text{ [s]}$$

doba  $n_A$  kmitů při čtvrtém měření:

$$t_{A4} = 190,13 \text{ [s]}$$

**Naměřené doby kmitů při uložení za dolní oko:**

počet kmitů:	$n_B = 200$
počet měření:	$n_{mB} = 4$
doba $n_B$ kmitů při prvním měření:	$t_{B1} = 179,81$ [s]
doba $n_B$ kmitů při druhém měření:	$t_{B2} = 180,20$ [s]
doba $n_B$ kmitů při třetím měření:	$t_{B3} = 179,95$ [s]
doba $n_B$ kmitů při čtvrtém měření:	$t_{B4} = 179,64$ [s]

Z naměřených časů kmitů vyplývá, že odchylky mezi jednotlivým měřeními jsou velmi malé, tudíž je zajištěna poměrně vysoká přesnost výsledků.

Pro další výpočty bylo ještě nutné zvážit reálnou ojnici.

hmotnost ojnice:  $m_{oj-z} = 2,6903$  [kg]

**4.4.2 Výpočet redukovaných hmotností**

průměrná doba jednoho kmitu za horní oko:

$$T_A = \frac{t_{A1} + t_{A2} + t_{A3} + t_{A4}}{n_A \cdot n_{mA}} \quad T_A = 0,95 \quad [s] \quad (4.6)$$

průměrná doba jednoho kmitu za dolní oko:

$$T_B = \frac{t_{B1} + t_{B2} + t_{B3} + t_{B4}}{n_B \cdot n_{mB}} \quad T_B = 0,90 \quad [s] \quad (4.7)$$

pro malé výchylky z rovnovážné polohy lze říci, že platí  $\sin\omega = \omega$  a pak platí:

$$\omega^2 = \frac{m \cdot g \cdot a}{J} \quad (4.8)$$

perioda harmonického pohybu:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega} \quad (4.9)$$

dosazením rovnice (4.8) do rovnice (4.9) a vyjádřením momentu setrvačnosti vzniká:

$$J = \frac{T^2 \cdot m \cdot g \cdot a}{4 \cdot \pi^2} \quad (4.10)$$

vzdálenost od bodu A k těžišti:

$$L_A = L_{AT} + \frac{D_{HP}}{2} \quad (4.11)$$

vzdálenost od bodu B k těžišti:

$$L_B = L_{BT} + \frac{D_{DP}}{2} \quad (4.12)$$

vzdálenost od bodu A k bodu B:

$$L = L_{oj} + \frac{D_{HP}}{2} + \frac{D_{DP}}{2} \quad L = 268 \quad [mm] \quad (4.13)$$

Steinerova věta:

$$J_A + m_{oj-z} \cdot L_B^2 = J_B + m_{oj-z} \cdot L_A^2 \quad (4.14)$$

dosazením rovnice (4.10) do rovnice (4.11) vzniká:

$$\frac{T_A^2 \cdot m_{oj-z} \cdot g \cdot L_A}{4 \cdot \pi^2} + m_{oj-z} \cdot L_B^2 = \frac{T_B^2 \cdot m_{oj-z} \cdot g \cdot L_B}{4 \cdot \pi^2} + m_{oj-z} \cdot L_A^2 \quad (4.15)$$

z rovnice (4.14) se již může získat vzdálenost těžiště z bodů A a B:

$$L_B = -L \cdot \frac{-T_A^2 \cdot g + 4 \cdot \pi^2 \cdot L}{T_A^2 \cdot g - 8 \cdot \pi^2 \cdot L + T_B^2 \cdot g} \quad L_B = 106,129 \quad [\text{mm}] \quad (4.16)$$

$$L_A = L - L_B \quad L_A = 161,871 \quad [\text{mm}] \quad (4.17)$$

vzdálenost těžiště od středu horního oka:

$$L_{AT} = L_A - \frac{D_{HP}}{2} \quad L_{AT} = 141,871 \quad [\text{mm}] \quad (4.18)$$

vzdálenost těžiště od středu horního oka:

$$L_{BT} = L_B - \frac{D_{DP}}{2} \quad L_{BT} = 73,129 \quad [\text{mm}] \quad (4.19)$$

momenty setrvačnosti:

$$J_A = \frac{T_A^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot m_{oj-z} \cdot g \cdot L_A \quad J_A = 0,098 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{kg}] \quad (4.20)$$

$$J_B = \frac{T_B^2}{4 \cdot \pi^2} \cdot m_{oj-z} \cdot g \cdot L_B \quad J_B = 0,057 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{kg}] \quad (4.21)$$

$$J_T = J_A - m_{oj-z} \cdot L_A^2 \quad J_A = 0,027 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{kg}] \quad (4.22)$$

### Třibodová redukce:

úpravou podmínky o zachování těžiště lze získat tento vztah:

$$m_{A-z-3} = \frac{m_{B-z-3} \cdot L_{BT}}{L_{AT}} \quad (4.23)$$

dosazením rovnice (4.23) do rovnice podmínky o zachování momentu setrvačnosti vznikne:

$$J_T = \frac{m_{B-z-3} \cdot L_{BT}}{L_{AT}} \cdot L_{AT}^2 + m_{B-z-3} \cdot L_{BT}^2 \quad (4.24)$$

úpravou rovnice (4.24) lze získat vztah pro výpočet hmotnosti ve středu dolního oka:

$$m_{B-z-3} = \frac{J_T}{L_{BT} \cdot (L_{AT} + L_{BT})} \quad m_{B-z-3} = 1,722 \quad [\text{kg}] \quad (4.25)$$

dosazením známých parametrů do rovnice (4.23) se získá hmotnost ve středu horního oka:

$$m_{A-z-3} = 0,888 \quad [\text{kg}] \quad (4.26)$$



hmotnost v těžišti se získá úpravou rovnice podmínky o zachování hmotností:

$$m_T = m_{oj-z} - m_{A-z-3} - m_{B-z-3} \quad m_T = 0,08 \text{ [kg]} \quad (4.27)$$

### Dvoubodová redukce

Tato redukce spočívá v rozdělení hmotnosti v těžišti mezi střed horního a dolního oka pomocí momentové rovnováhy.

hmotnost ve středu horního oka:

$$m_{A-z} = m_{A-z-3} + m_T \cdot \frac{L_{BT}}{L_{oj}} \quad m_{A-z} = 0,915 \text{ [kg]} \quad (4.28)$$

hmotnost ve středu dolního oka:

$$m_{B-z} = m_{B-z-3} + m_T \cdot \frac{L_{AT}}{L_{oj}} \quad m_{B-z} = 1,775 \text{ [kg]} \quad (4.29)$$

## 4.5 Porovnání rozložení hmotností

V této podkapitole je provedeno krátké zhodnocení rozložení hmotností výpočtem z modelu, uvedených hmotností ve výkresové dokumentaci a zjištěných hodnot z reálné ojnice pomocí měření odkýváním.

	výkres	model	měření
celková hmotnost ojnice:	$m_{oj-u} = 2,649$	$m_{oj-v} = 2,671$	$m_{oj-z} = 2,690$
hmotnost ve středu horního oka:	$m_{A-u} = 0,899$	$m_{A-v} = 0,896$	$m_{A-z} = 0,915$
hmotnost ve středu dolního oka:	$m_{B-u} = 1,750$	$m_{B-v} = 1,775$	$m_{B-z} = 1,775$

Z uvedených hodnot jasně vyplývá, že odchylky jednotlivých hmotností jsou velmi malé a 3D model se velmi přibližuje jak hodnotám uvedeným ve výkresové dokumentaci, tak hodnotám reálné ojnice. Zejména pro další práci je důležitá hodnota hmotnosti ve středu horního oka ojnice, protože reprezentuje hmotnost posuvných částí ojnice. Tato hmotnost bude dále použita ve výpočtech vyvážení motoru. Je patrné, že rozdíl těchto hmotností je opravdu malý (rozdíl hmotnosti modelu a reálné ojnice v tomto místě činí pouze 0,019 [kg]).

V následujících kapitolách bude již použito pouze hmotností zjištěných z modelu.

## 5 Pevnostní analýza 3D modelu stávající ojnice

Tento úkol je řešen v programovém prostředí Ansys verze 10.0. Tento software je typickým představitelem výpočetních programů využívajících pro řešení úloh metodu konečných prvků (dále MKP). MKP používá numerickou metodu řešení parciálních diferenciálních rovnic. Software Ansys využívá tři moduly:

- 1 preprocessor
  - tvorba geometrického modelu
  - výběr elementů
  - definice reálných konstant a materiálových vlastností
  - tvorba síť z elementů
  - nadefinování zatížení modelu a posuvů
- 2 solver
  - řeší soustavy rovnic
- 3 postprocessor
  - umožňuje načtení a zobrazení výsledků

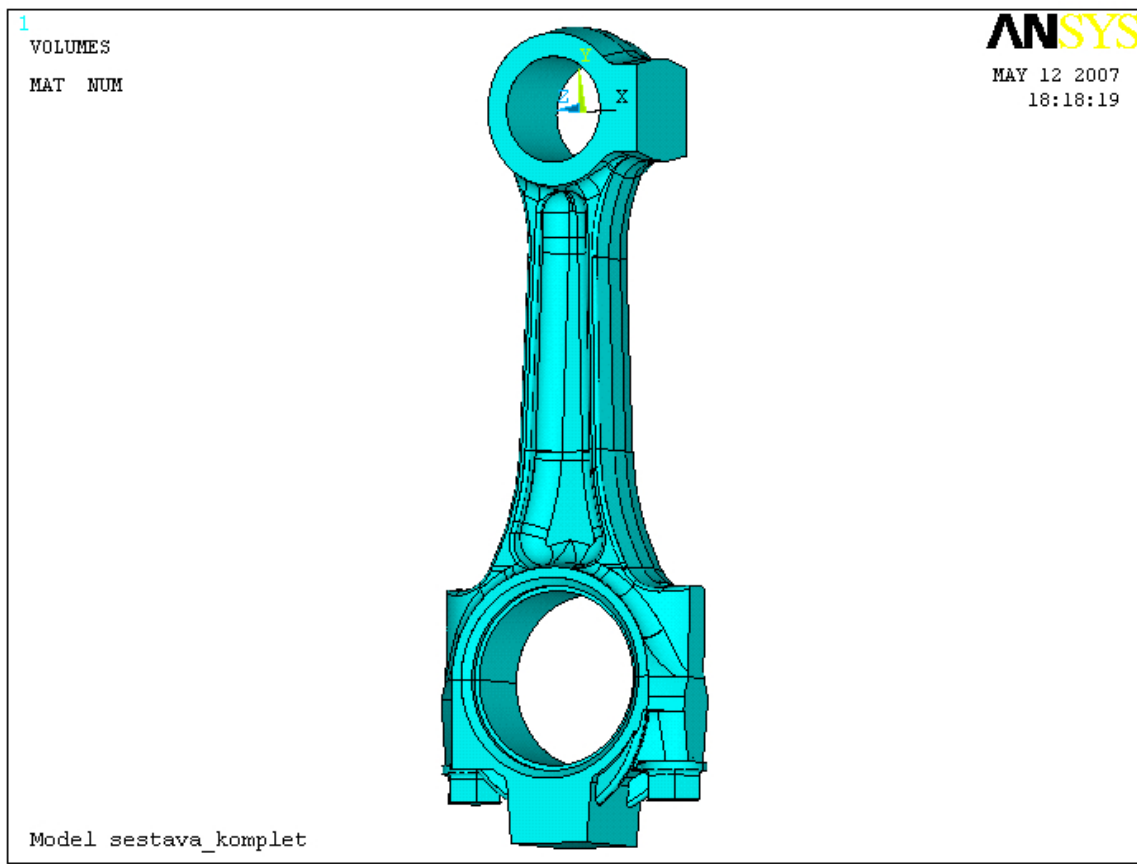
Pozn.: Vytváření geometrického modelu je v programu Ansys velmi složité a nástroje modelování jsou značně omezené. Také pro tvorbu sítě je vhodné zvolit jiný software, který je na tyto úkoly více zaměřen.

Následující činnost při tvorbě výpočtového modelu je rozdělena do několika fází. Nejprve je nutné provést převedení geometrie z Pro/E do programu Ansys. V zápětí je potřeba vypočítat vstupy pro zatížení ojnice. Poté se provede nadefinování elementů, reálných konstant a materiálových vlastností. V další části se musí vytvořit prutová náhrada za pístní a ojniční čep a nasimulování předpětí šroubů. Po uvedených činnostech se model ojnice vysítuje a vytvoří se kontakty mezi jednotlivými částmi. Nakonec se z vypočítaných hodnot zatížení ojnice zatíží a provede se omezení příslušných posuvů.

### 5.1 Převod 3D modelu do programu Ansys

Software Pro/E umožňuje převedení geometrie do programu Ansys bez větších problémů. Standardně by mělo vzniknout propojení mezi oběma programy již při instalaci programu Pro/E a v takovém případě stačí z horní lišty Pro/E vybrat ikonu s nápisem Ansys a po rozevření příkazů vybrat AnsysGeom. Tento postup vytvoří nový soubor s příponou anf a tento soubor se již jednoduše v programu Ansys načte přes funkci Read input from.

Po načtení geometrie je důležité ojnici správně umístit vzhledem k hlavnímu souřadnému systému. To je důležité hlavně z důvodu umístění úhlové rychlosti a úhlového zrychlení, protože tyto hodnoty zatížení působí právě kolem os hlavního souřadného systému. Z tohoto důvodu je vhodné umístit hlavní souřadný systém do horního oka ojnice. Na obr. 5.1 je vidět načtená geometrie v programovém prostředí Ansys a umístění hlavního souřadného systému.



Obr. 5.1 Zobrazená geometrie v programu Ansys

## 5.2 Výpočet velikosti zatížení

V tomto úkolu je nejprve vypočítáno zrychlení pístu, dále úhlová rychlost a úhlové zrychlení odklonu ojnice kolem osy pístního čepu a nakonec působící síly na horní oko ojnice. Veškeré následující výpočty respektují souřadný systém zavedený v předchozí kapitole. Výsledné hodnoty jsou počítány pro výpočetní krok natočení klikového hřídele  $\alpha_i = 5^\circ$  a pro dvě otočení klikového hřídele  $\alpha = 720^\circ$ . Veškeré hodnoty zatížení vkládané do programu Ansys jsou vyobrazeny v Příloze 1.

### 5.2.1 Zrychlení pístu

Aby bylo možné vypočítat zrychlení pístu je nutné nejprve vypočítat klikový poměr a úhlovou rychlost pro jmenovité otáčky klikového hřídele.

klikový poměr:

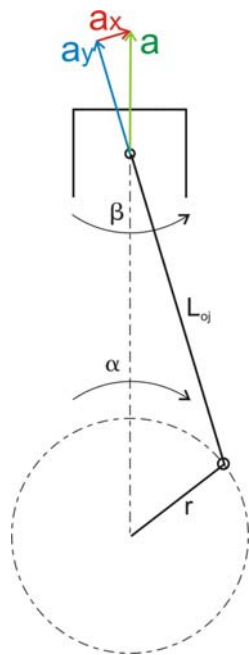
$$\lambda = \frac{r}{L_{oj}} \quad \lambda = 0,279 \quad (5.1)$$

úhlová rychlost pro jmenovité otáčky klikového hřídele:

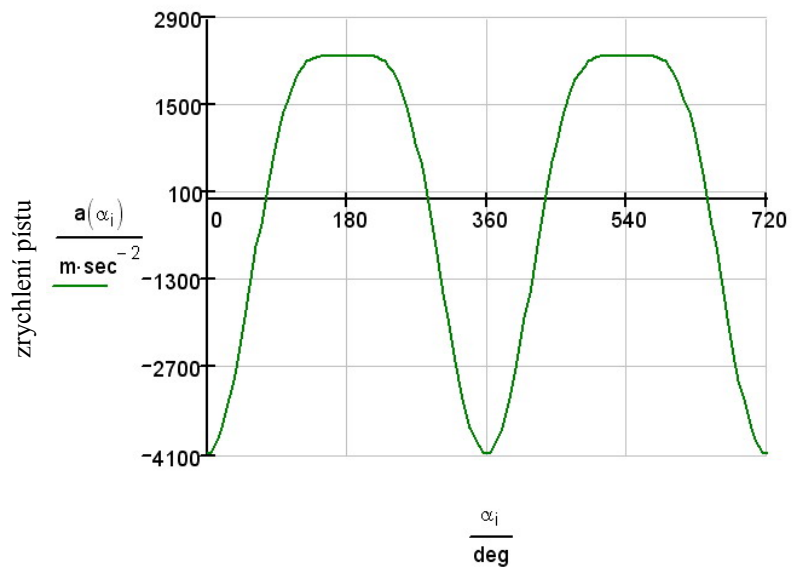
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad \omega = 230,383 \quad [\text{Hz}] \quad (5.2)$$

zrychlení pístu:

$$a(\alpha_i) = -[r \cdot \omega^2 \cdot (\cos(\alpha_i) + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha_i))] \quad (5.3)$$



**Obr. 5.2** Schéma působení zrychlení



úhel natočení klikového hřídele

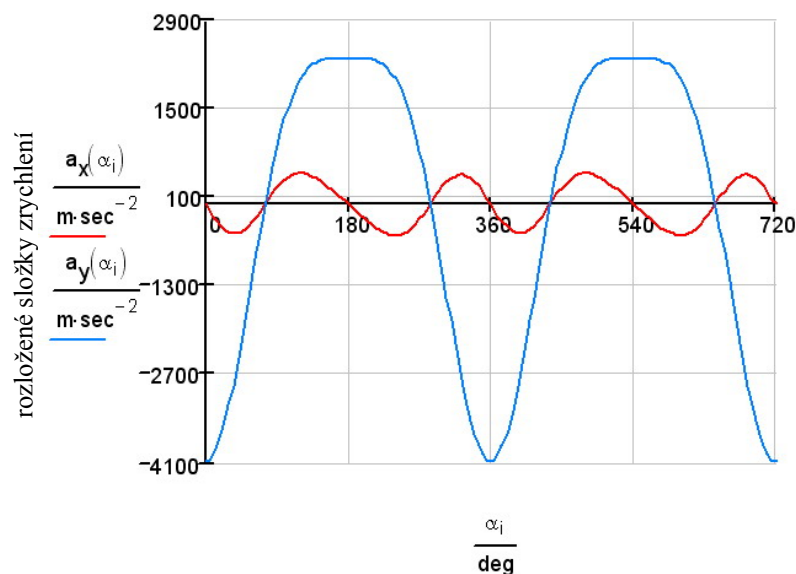
**Graf 5.1** Průběh zrychlení

Na Obr. 5.2 je znázorněné schéma rozložení zrychlení  $a$  v Grafu 5.1 je zobrazen průběh zrychlení. Tento průběh je vypočten dle rovnice (5.3) ze zrychlení  $a$  (viz Obr. 5.2). Kdyby byla tato výslednice zrychlení (ve směru osy válce) použita pro výpočty v programu Ansys, tak by se ojnice musela pro jednotlivé zátěžové kroky natáčet podle úhlu  $\beta$ , tento postup by byl velmi pracný. Z tohoto důvodu je vhodné přepočítat výslednici zrychlení do složek  $a_x$  a  $a_y$  (viz Obr. 5.2).

$$\beta_i(\alpha_i) = \arcsin(\lambda \cdot \sin(\alpha_i)) \quad (5.4)$$

$$a_x(\alpha_i) = a(\alpha_i) \cdot \sin(\beta_i) \quad (5.5)$$

$$a_y(\alpha_i) = a(\alpha_i) \cdot \cos(\beta_i) \quad (5.6)$$



úhel natočení klikového hřídele

**Graf 5.2** Průběh složek zrychlení

Z Grafu 5.2 je patrné, že dominantní význam má složka zrychlení ve směru osy válce a to v záporné orientaci, což znamená ve směru z horní do dolní úvrati, neboť v tomto směru je píst urychlován po vznícení paliva. Složka zrychlení ve vodorovném směru je velmi malá.

### 5.2.2 Úhlová rychlost a úhlové zrychlení kolem osy pístního čepu

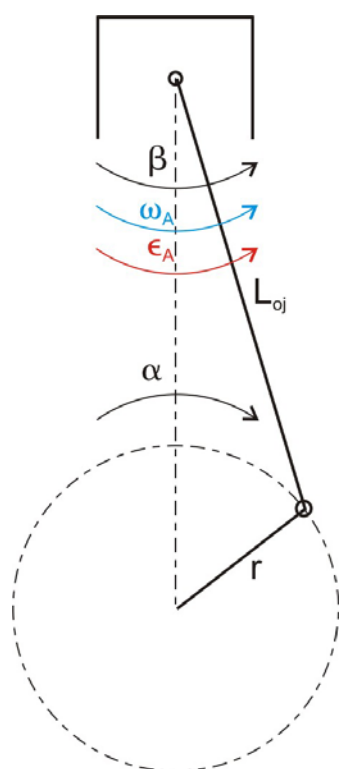
Tyto složky zatížení jsou počítány vzhledem k ose pístního čepu. V podstatě se počítá úhlová rychlost a úhlové zrychlení odklonu dřívku ojnice (úhel  $\beta$ ). Z tohoto důvodu byl hlavní souřadný systém v programu Ansys umístěn do středu horního oka ojnice a úhlová rychlost a úhlové zrychlení se zadává kolem osy z tohoto souřadného systému.

úhlová rychlost kolem osy pístního čepu:

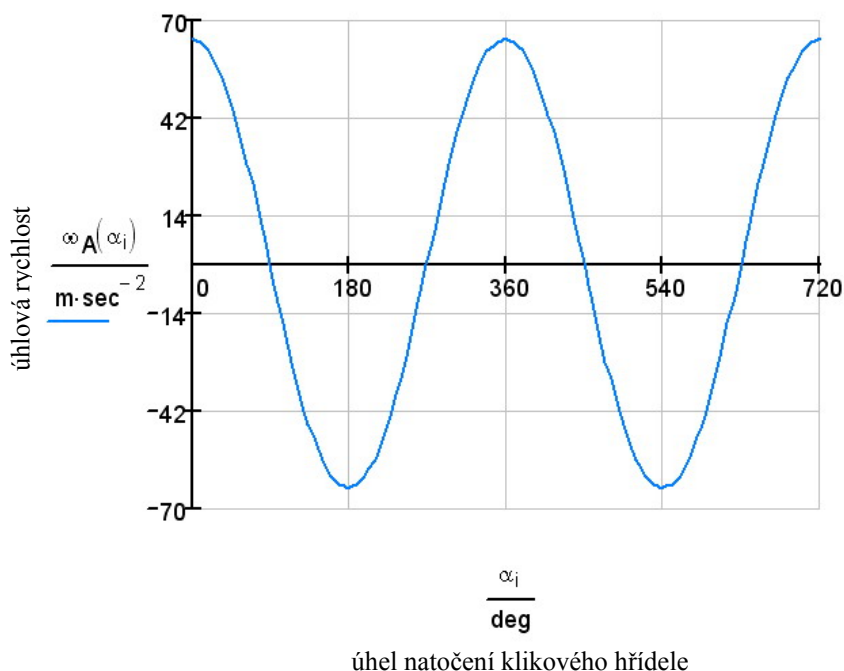
$$\omega_A(\alpha_i) = \omega \cdot \lambda \cdot \frac{\cos(\alpha_i)}{\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha_i)}} \quad (5.7)$$

úhlové zrychlení kolem osy pístního čepu:

$$\varepsilon_A(\alpha_i) = -\omega^2 \cdot \frac{\lambda \cdot (1 - \lambda^2) \cdot \sin(\alpha_i)}{(1 - \lambda^2 \cdot \sin^2(\alpha_i))^{1.5}} \quad (5.8)$$



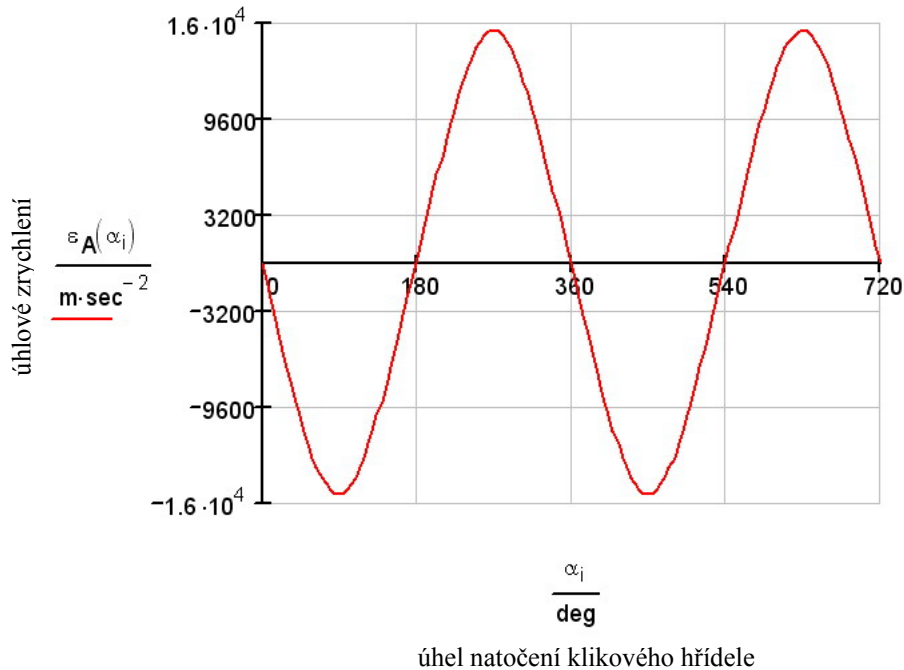
Obr. 5.3 Schéma úhlového zrychlení a úhlové rychlosti



Graf 5.3 Průběh úhlové rychlosti

Z Grafu 5.3 je patrné, že úhlová rychlost nabývá nejvyšších hodnot v horní a dolní úvrati. Naopak nulové hodnoty nabývá v půlce zdvihu (rameno klikového hřídele ve vodorovné poloze). Oproti tomu z Grafu 5.4 plyne, že nejvyšší hodnoty dosahuje úhlové zrychlení právě

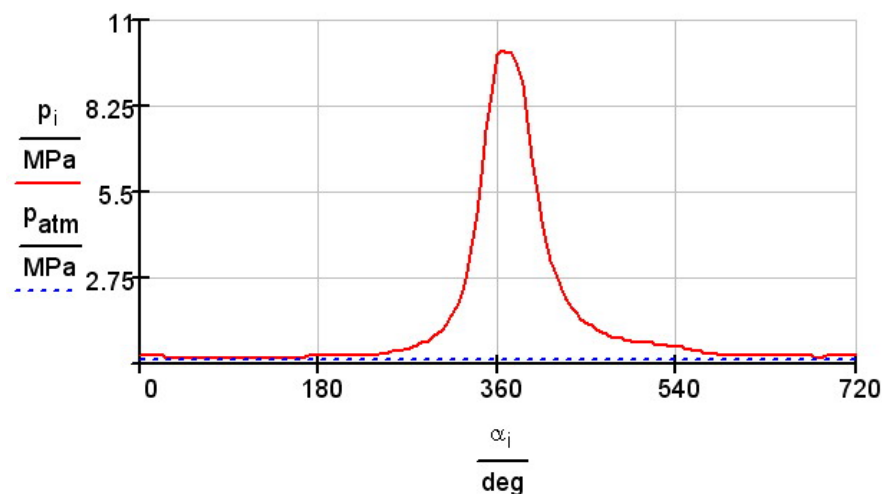
v polovině zdvihu pístu (rameno klikového hřídele ve vodorovné poloze) a nulové hodnoty nabývá v horní a dolní úvrati.



**Graf 5.4 Průběh úhlového zrychlení**

### 5.2.3 Působící síly na horní oko ojnice

Dominantní složkou síly působící na horní oko ojnice jsou síly od tlaků plynů, které působí na píst a přes pístní čep na samotné oko ojnice. V místě horního oka ojnice jsou však tyto síly zmenšeny o síly setrvačných hmot pístní skupiny. Hmotnost pístní skupiny se skládá z hmotnosti pístu, pístních kroužků, pojistných kroužků a pístního čepu. Pro zjištění sil od tlaků plynů je nezbytné znát průběh tlaků v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele, tzv.  $p$ - $\alpha$  digram. Průběhy tlaků mi poskytl vedoucí diplomové práce. Tyto hodnoty byly zjištěny experimentálním způsobem měření na reálném traktorovém motoru. V Grafu 5.5 je vykreslený  $p$ - $\alpha$  digram. Z grafu je patrné, že jsou všechny hodnoty tlaků nad hodnotou atmosférického tlaku  $p_{atm}$ , což odpovídá přeplňovanému motoru.



**Graf 5.5 Průběh tlaků**

Pro přehlednost je ještě doplněn Graf 5.6, ve kterém je vykreslen  $p$ - $V$  diagram vyznačující průběh tlaku v závislosti na poloze pístu ve válci motoru. Pro tvorbu diagramu je nutné vypočítat plochu pístu a kompresní objem. Dále se musí vypočítat okamžitá poloha pístu (dráha) a okamžitý objem.

plocha pístu:

$$S_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \qquad S_p = 86,590 \text{ [cm}^2\text{]} \qquad (5.9)$$

kompresní objem:

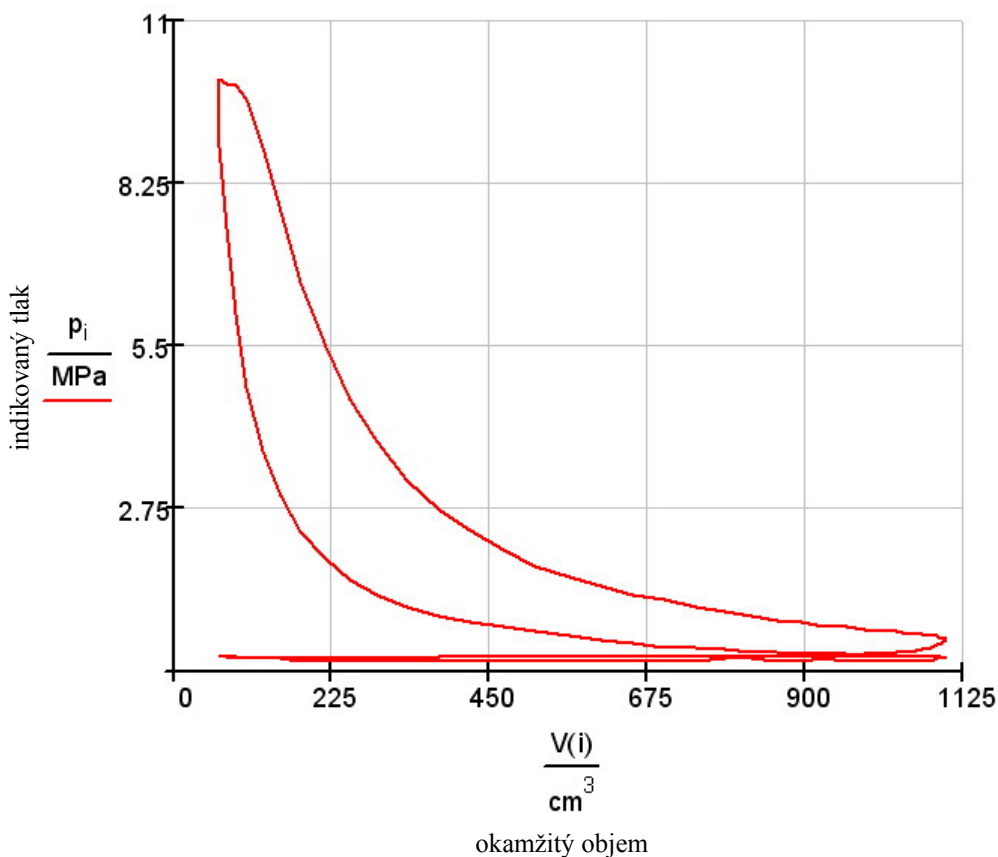
$$V_k = \frac{V_z}{\varepsilon - 1} \qquad V_k = 64,937 \text{ [cm}^3\text{]} \qquad (5.10)$$

dráha pístu:

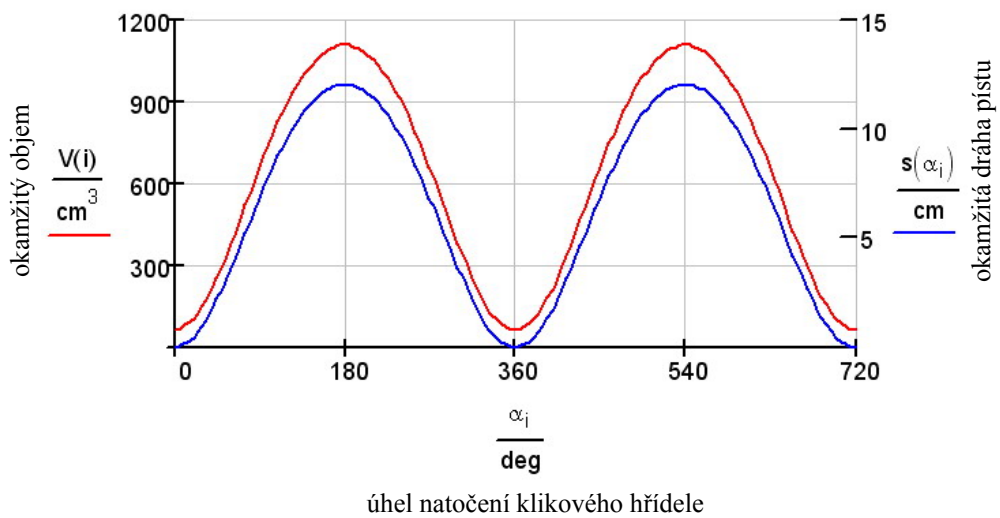
$$s(\alpha_i) = r \cdot \left[ (1 - \cos(\alpha_i)) + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha)) \right] \qquad (5.11)$$

okamžitý objem:

$$V(\alpha_i) = V_k + S_p \cdot s(\alpha_i) \qquad (5.12)$$



**Graf 5.6 Průběh indikovaného tlaku v závislosti na poloze pístu**



**Graf 5.7 Průběh okamžitého objemu a okamžité dráhy pístu**

Aby bylo možné vypočítat celkové síly působící na horní oko, tak se nejdřív musí vypočítat síly od tlaků plynů, od kterých se následně odečtou síly od setrvačných hmot pístní skupiny.

síly od tlaků plynů:

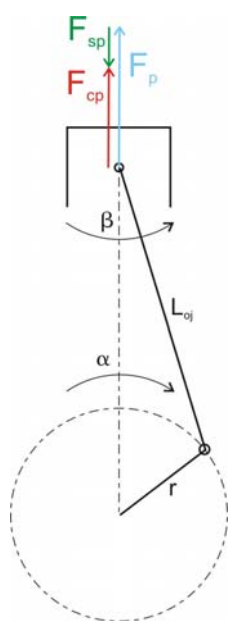
$$F_p(\alpha_i) = -(p(\alpha_i) - p_{atm}) \cdot S_p \quad (5.13)$$

síly od setrvačných hmot pístní skupiny:

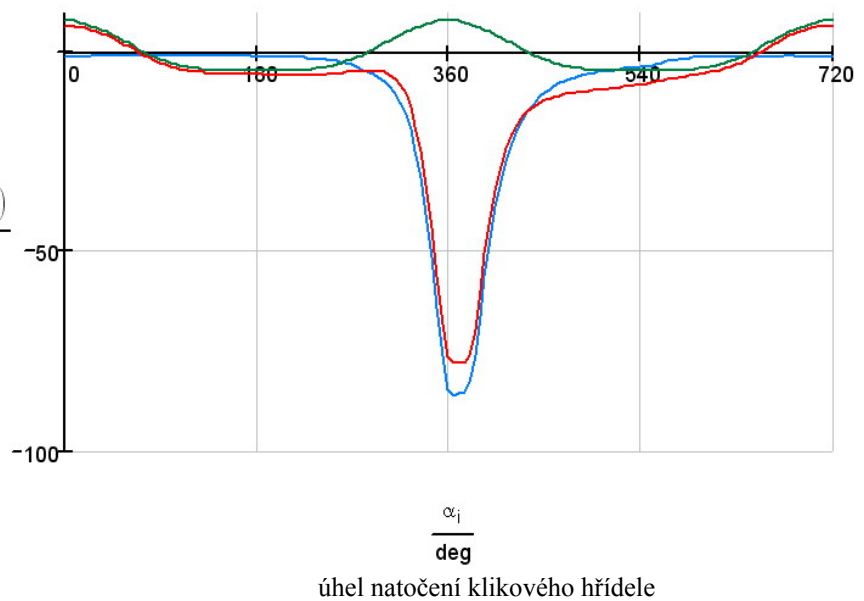
$$F_{sp}(\alpha_i) = -m_{pist} \cdot a(\alpha_i) \quad (5.14)$$

celkové síly působící na horní oko ojnice:

$$F_{cp}(\alpha_i) = F_p(\alpha_i) + F_{sp}(\alpha_i) \quad (5.15)$$



**Obr. 5.4 Schéma působících sil v ose válce**



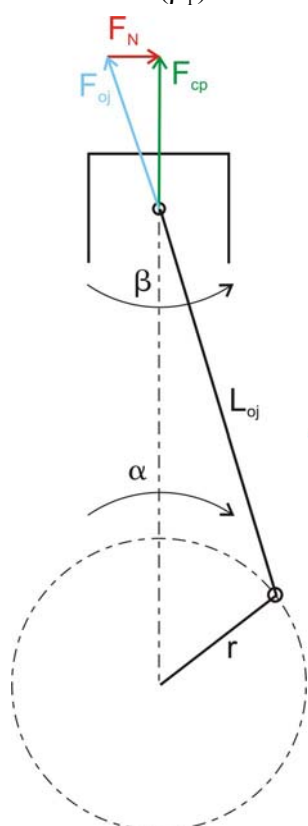
**Graf 5.8 Průběh působících sil v ose válce**



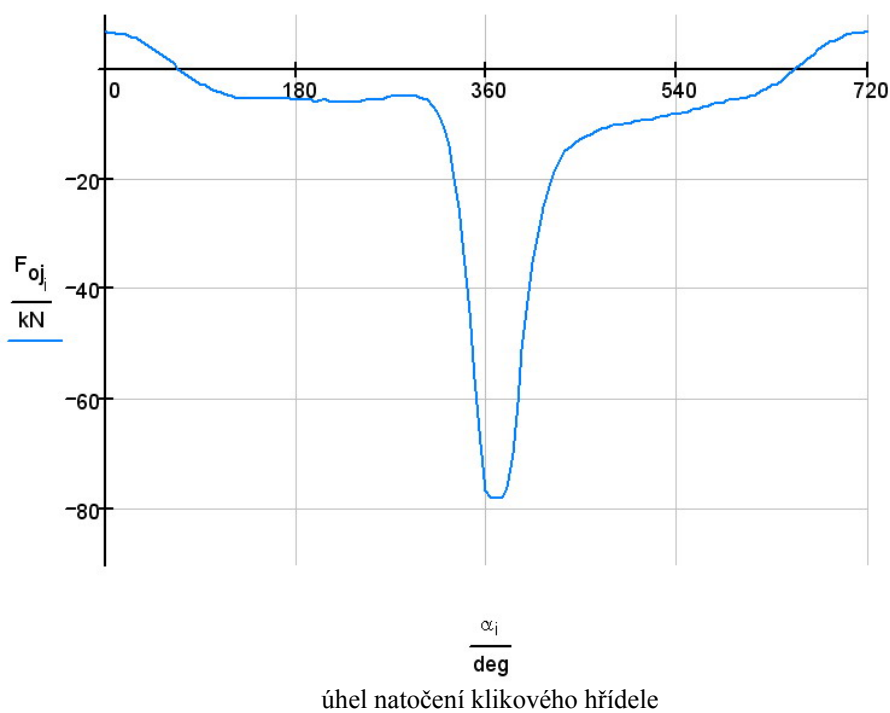
Orientace sil vyobrazených v Obr. 5.4 je samozřejmě opačná než v reálném motoru (síly od tlaků plynů musejí mířit směrem k dolní úvratí). Tato orientace je však zvolena, jak již bylo výše uvedeno, pouze z důvodu přenosu dat do programu Ansys, ve kterém je naorientován příslušný souřadný systém (viz Obr. 5.1). Z Grafu 5.8 je zřejmé, že celkové síly působící na horní oko v ose válce jsou menší než síly od tlaků plynů, což je správné. Celkové síly v ose válce, podobně jako u zrychlení, není vhodné pro práci v programu Ansys používat, neboť by se pro jednotlivé zátěžné kroky musela ojnice natáčet. Z tohoto důvodu je vhodné celkovou sílu v ose válce rozložit na složku ve směru osy dříku ojnice (tato síla se bude zadávat v programu Ansys) a normálovou sílu působící ve vodorovném směru na píst.

celková síla působící na horní oko ve směru dříku ojnice:

$$F_{oj}(\alpha_i) = \frac{F_{cp}(\alpha_i)}{\cos(\beta_i)} \quad (5.16)$$



Obr. 5.5 Schéma rozložení celkové síly



Graf 5.9 Průběh výsledné síly působící v ose dříku

Je patrné, že maximální velikost síly působící ve směru osy dříku ojnice je menší než 80 [kN]. Jednotlivé síly jsou v Příloze 1 jedenáctkrát zmenšeny, neboť se tyto síly rozdělí do 11 uzlů, jak bude dále vysvětleno.

### 5.3 Výběr druhů elementů a materiálových vlastností

Pro kompletní vytvoření sítě byly zvoleny 3 druhy elementů:

1. Solid187

- tento prvek je reprezentantem 3-D prvků kvadratického typu
- jedná se o 10 uzlový čtyřstěn (viz Obr. 5.6), který má uzel v každém vrcholu

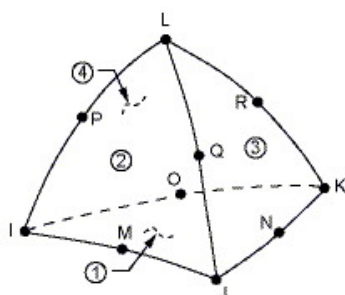
- a uprostřed každé spojnice mezi jednotlivými vrcholy
- každý uzel má 3 stupně volnosti
- je velmi vhodný pro vytvoření sítě v místech vysokých gradientů napětí, proto je v této práci využit pro vytvoření volné sítě (FREE MESH) objemu ojnice

2. Mesh 200 – option: Quad 8 - node

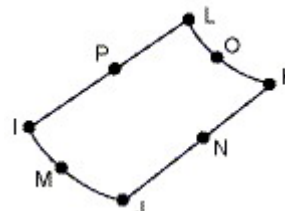
- jedná se o čtyřboký prvek, který se skládá z osmi uzlů (viz Obr. 5.7)
- jedná se o tzv. “pouze síťový “ prvek, který neovlivňuje řešení
- tento prvek je vybrán pouze pro pomoc při vytváření prutové náhrady pístitního a ojnicního čepu v horním a dolním oku ojnice, neboť umožňuje pravidelné rozdělení plochy

3. Link 10

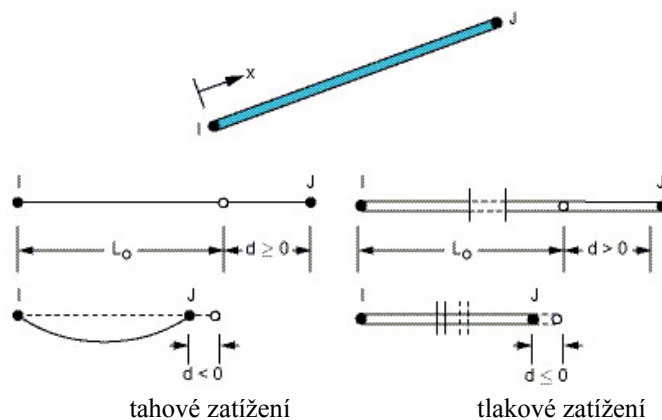
- jedná se o 3D prutový prvek, který má jedinečné vlastnosti matice tuhosti, které umožňují pouze jednoosé zatížení (buď tlak, nebo tah) (viz Obr. 5.8)
- tento prvek se skládá ze dvou uzlů, které jsou umístěny na obou koncích
- v každém uzlu má 3 stupně volnosti
- prvek je použit jako prutová náhrada pístitního a ojnicního čepu, z tohoto důvodu je ve vlastnostech prvku povoleno pouze tlakové zatížení, v reálných konstantách musí být dále navolen průřez prvku, který přímo určuje tuhost prvku, touto problematikou se bude zabývat následující kapitola



Obr. 5.6 Prvek Solid 187



Obr. 5.7 Prvek Mesh 200 (Quad 8 – node)



Obr. 5.8 Prvek Link 10

### Materiálové vlastnosti

Pro další práci je třeba nastavit lineární, elastické, isotropní vlastnosti materiálu.

modul pružnosti v tahu (tlaku):	$E$	$=$	$2,1 \cdot 10^5$	[MPa]
součinitel příčného přetvoření:	$\mu$	$=$	0,3	
hustota materiálu:	$\rho$	$=$	$7820 \cdot 10^{-12}$	[tun/mm <sup>3</sup> ]

Z důvodu předpětí šroubů je třeba navolit ještě jeden materiálový model, který má stejné vlastnosti jako předchozí, ale navíc má nadefinovanou tepelnou délkovou roztažnost v ose y (osa šroubů) a referenční teplotu. Zvolení velikosti referenční teploty je vysvětleno v kapitole 5.5 .

součinitel tepelné délkové roztažnosti:	$\alpha_y$	$=$	$1 \cdot 10^{-5}$	[K <sup>-1</sup> ]
referenční teplota:	$T_r$	$=$	800	[K]

### 5.4 Vytvoření prutové náhrady pístitního a ojnicního čepu

Nejprve je nutné vnitřní plochy horního a dolního rovnoměrně rozdělit pomocí prvku Mesh 200.

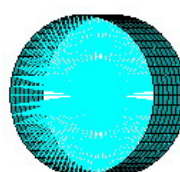
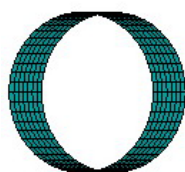
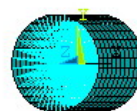
#### Horní oko:

V ose oka rozděleno na 10 dílů a po obvodu rozděleno na 30 dílů (viz Obr. 5.9).

#### Dolní oko:

V ose oka rozděleno na 7 dílů a po obvodu rozděleno na 50 dílů (viz Obr. 5.9).

V následujícím kroku je vytvořeno natáhnutí prvků Link 10 z osy horního a dolního oka do uzlů připojených k prvku Mesh 200 v horním a dolním oku (viz Obr. 5.10). Natahování prvků Link 10 bylo provedeno pomocí makra, které vytvořil pan Ing. David Svída.



Obr. 5.9 Vytvoření sítě ok

Obr. 5.10 Natažení prvků Link 10

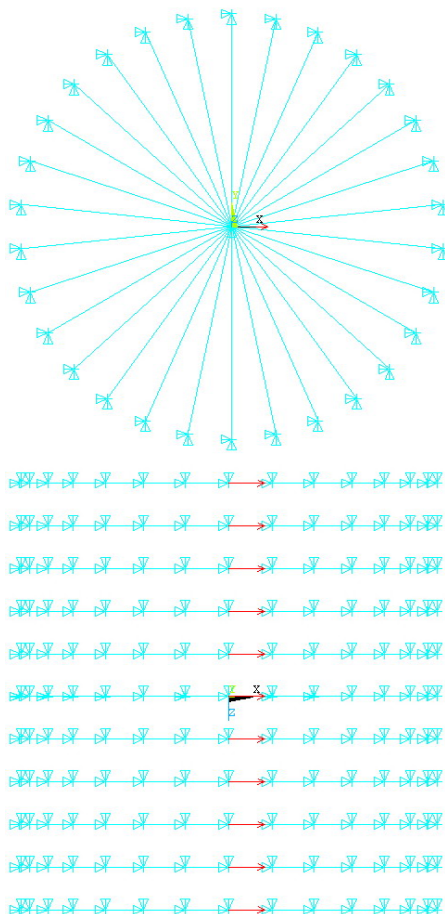
V dalším kroku je nutné zadat reálné konstanty prvku Link 10, které spočívají v zadání velikosti průřezu prvku. Pro zjištění velikosti potřebného průřezu je v této práci využit princip vymezení olejové vrstvy. Z kapitoly 5.2.3 vyplývá, že síla působící na horní oko nemůže přesáhnout velikost 80 [kN]. Z důvodu bezpečnosti uvažují sílu působení 85 [kN]. Touto silou je zatlačeno v programu Ansys do středu prutové náhrady a sleduje se velikost posuvu. Průřez prvku se upravuje tak dlouho dokud není velikost posuvu menší než velikost olejové vrstvy. Při tomto výpočtu je důležité okrajovým uzlům, které jsou součástí vnitřní plochy ok, zablokovat posuv ve všech směrech a uzlům tvořícím osu ok povolit pouze posuv ve směru působení síly.

### Horní oko:

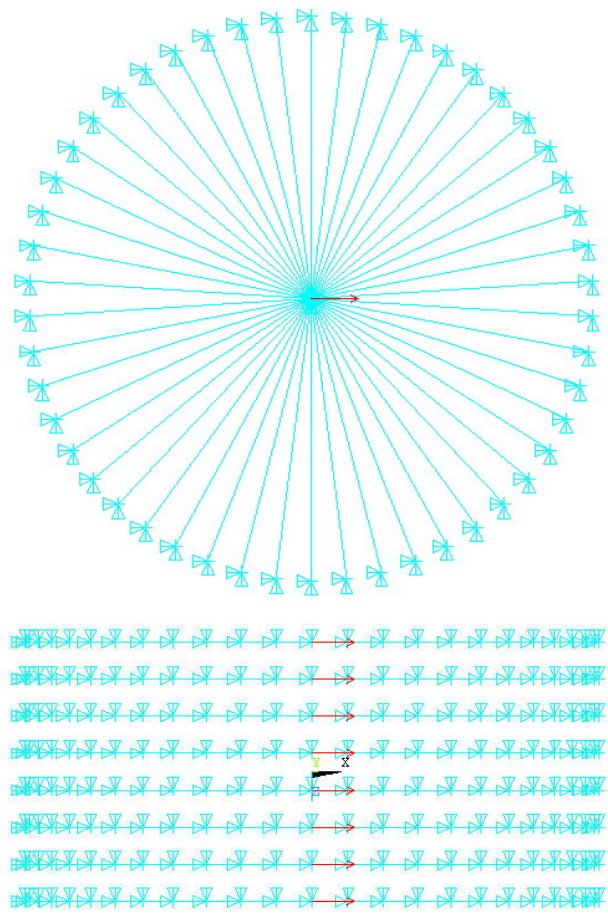
V horním oku je tloušťka olejové vrstvy kolem 0,05 [mm]. Působící síla 85 [kN] je rozdělena mezi 11 uzlů. Při tomto výpočtu vychází potřebný průřez oka 1,95 [mm<sup>2</sup>]. Schéma výpočtu v programu Ansys je na Obr. 5.11.

### Dolní oko:

V dolním oku je tloušťka olejové vrstvy kolem 0,08 [mm]. Působící síla 85 [kN] je rozdělena mezi 8 uzlů. Při tomto výpočtu vychází potřebný průřez oka 1,68 [mm<sup>2</sup>]. Schéma výpočtu v programu Ansys je na Obr. 5.12.



Obr. 5.11 Horní oko



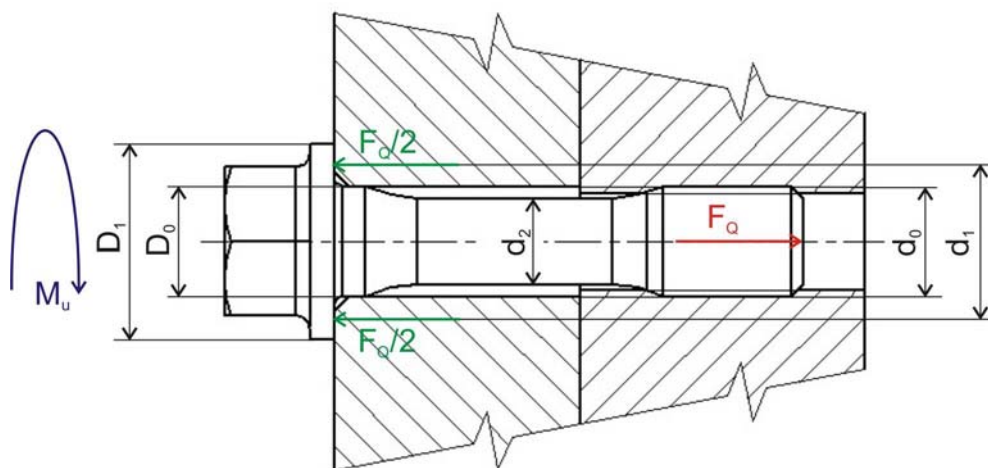
Obr. 5.12 Dolní oko

**Zadávané reálné konstanty do programu Ansys:**

průřez prutu horního oka:	$S_{ph} = 1,95$ [mm <sup>2</sup> ]
průřez prutu dolního oka:	$S_{pd} = 1,68$ [mm <sup>2</sup> ]

**5.5 Vytvoření předpětí pomocí zadané teploty části dříku šroubu**

Při tvorbě předpětí je využita metoda podchlazení určité části dříku šroubů, což způsobí smrštění dříku a tím je vytvořeno potřebné předpětí. Po vytvoření předpětí se zjistí velikost průměrného tahového napětí v uzlech dříku ve směru osy dříku šroubů (osa  $y$ ) a porovná se s hodnotou tahového napětí vypočítanou z utahovacího momentu. Pro další postup je tedy nutné vypočítat tahové napětí v dříku šroubu z utahovacího momentu.

**5.5.1 Výpočet tahového napětí dříku šroubu****Obr. 5.13 Schéma šroubového spojení****Zadané a zvolené hodnoty:**

vnější průměr závitu:	$d_0 = 14$ [mm]
průměr střední části dříku šroubu:	$d_2 = 11,5$ [mm]
průměr otvoru pro šroub:	$D_0 = 14,2$ [mm]
vnější průměr hlavy šroubu:	$D_1 = 25$ [mm]
utahovací moment:	$M_u = 120$ [Nm]
rozteč závitu:	$p_z = 1,5$ [mm]
součinitel tření pod hlavou šroubu:	$f_h = 0,2$
součinitel tření závitu šroubu:	$\mu_z = 0,15$

**Výpočty:**

průměr působení třecí síly hlavy šroubu:

$$d_1 = \frac{D_0 + D_1}{2} \quad d_1 = 19,6 \text{ [mm]} \quad (5.17)$$



úhel stoupání závitu:

$$\varphi_z = \arctg \frac{P_z}{\pi \cdot D_0} \quad \varphi_z = 1,953 \text{ [}^\circ\text{]} \quad (5.18)$$

osová síla:

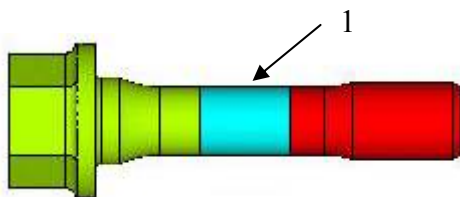
$$F_Q = \frac{M_u}{\operatorname{tg} \varphi \cdot \frac{D_0}{2} + \mu_z \cdot \frac{D_0}{2} + f_h \cdot \frac{d_1}{2}} \quad F_Q = 36938 \text{ [N]} \quad (5.19)$$

vypočítaná velikost tahového napětí ve střední části dřívku šroubu:

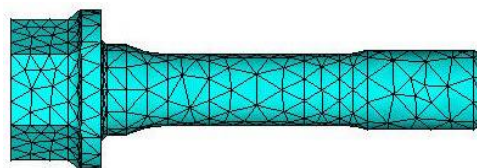
$$\sigma_{yv} = \frac{F_Q \cdot 4}{\pi \cdot d_2^2} \quad \sigma_{yv} = 355,5 \text{ [MPa]} \quad (5.20)$$

### 5.5.2 Vytvoření předpětí pomocí zadané teploty části dřívku šroubu

Tento úkol je řešen v programu Ansys tak, že se nejprve šroub rozdělí na 3 objemy (viz Obr. 5.14). Je totiž důležité, aby byl vytvořený samostatný objem (z důvodu vytvoření sítě prvky rozdílných materiálových vlastností) ve střední zúžené části dřívku šroubu, který bude následně podchlazený. Dále je nutné spojit objem závitové části šroubu se závitovou částí ojnice. V další části se vytvoří síť. Pro síť je použit prvek Solid 187 a je využito volného způsobu vytvoření sítě o velikosti elementů 4 mm (viz Obr. 5.15). Při tvorbě sítě je využito právě výše popsaného rozdělení dřívku šroubu, neboť je nutné střední část dřívku vysít'ovat prvky, které mají rozdílné materiálové vlastnosti od ostatních prvků šroubu a samotné ojnice. Pro střední část dřívku šroubu je využito materiálových vlastností č. 2 (viz kapitola 5.3). Referenční teplota 800 °C byla zjištěna po několika výpočtových krocích, u této teploty byly tahové napětí v uzlech střední části dřívku šroubu téměř shodná s vypočítanou hodnotou (viz kapitola 5.5.1). Aby mohl být výpočtový model spočítán, tak je ještě nutné vytvořit kontakty mezi víkem a ojnici a mezi hlavami šroubů a víkem. Kompletní výpočtový model pro vytvoření předpětí šroubů je na Obr. 5.16. Na Obr. 5.17 jsou již zobrazena redukovaná napětí v obou šroubech spolu s naznačením deformace šroubů. Je patrné, že nejvyšší redukované napětí je v zaoblení pod hlavou šroubu (kolem 620 [MPa]), toto rozložení napětí však neodpovídá realitě, protože zde není uvažováno s vruby od vytvořených závitů, pro vytvoření předpětí však může být tato nepřesnost zanedbána. Pro ověření velikosti tahových napětí ve střední části dřívku byly vybrány uzly na hranici objemů (viz Obr. 5.18) mezi střední a závitovou částí dřívku (to je další důvod proč byl dřík rozdělen na 3 objemy, neboť se při tvorbě sítě vytvoří uzly v jedné rovině po hranicích těchto objemů) a pomocí seznamu výsledků (viz Tab. 5.1) bylo ověřeno, že průměrná velikost tahových napětí v ose šroubů (tedy osa y) těchto uzlů je velikosti  $\phi_{\sigma_{yu}} = 354,602 \text{ [MPa]}$ .

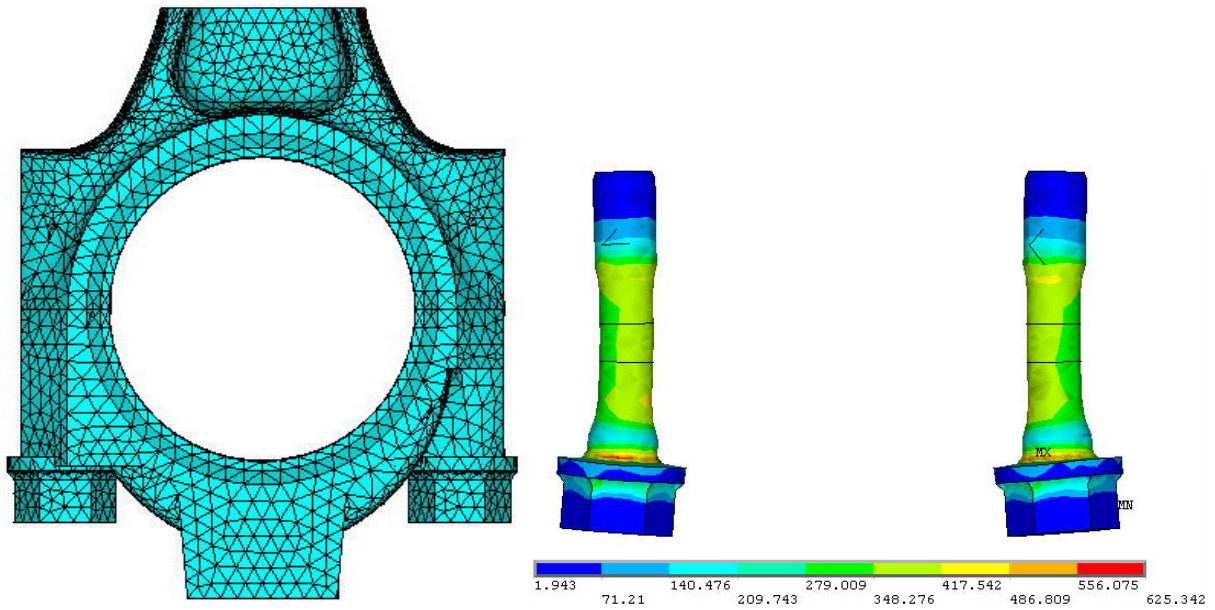


**Obr. 5.14** Rozdělený objem šroubu  
1 – podchlazená část dřívku



**Obr. 5.15** Vysít'ovaný šroub



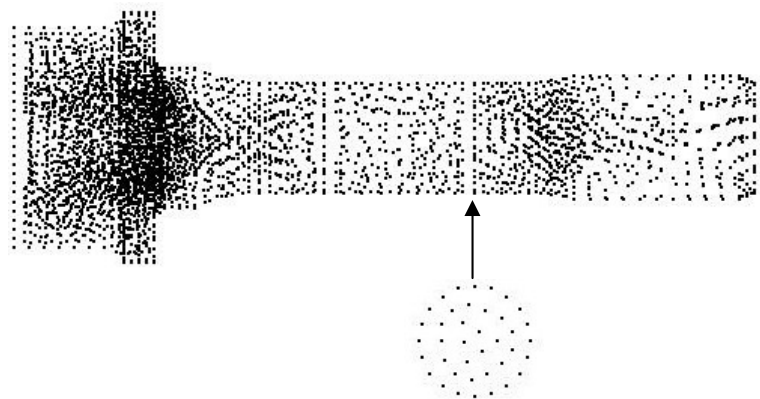


Obr. 5.16 Vysíťovaný model pro výpočet předpětí šroubů

Obr. 5.17 Výsledné redukované napětí šroubů

číslo uzlu	$\sigma_{yu}$
26137	329.56
26138	380.78
26140	334.52
26142	346.57
26144	361.87
26146	375.74
26149	334.5
26151	344.67
26153	362.47
26155	375.34
$\phi\sigma_{yu} = 354.602$	

Tab. 5.1 Výsledná tahová napětí



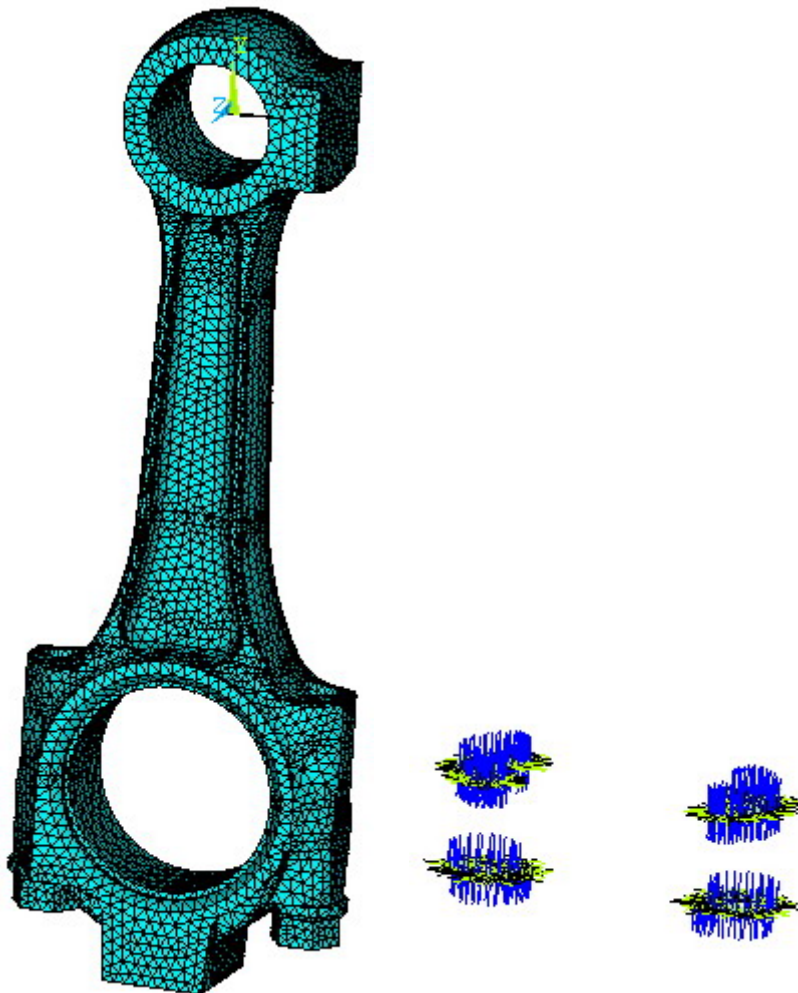
Obr. 5.18 Výběr uzlů pro zjištění tahových napětí

## 5.6 Dokončení výpočtového modelu

V této chvíli je téměř celá příprava výpočtového modelu kompletní. V podstatě již chybí pouze vytvoření sítě objemu ojnice, vytvoření kontaktů a zadání zatížení s okrajovými podmínkami.

### 5.6.1 Vytvoření sítě objemu ojnice a kontaktů

Podobně jako u vytváření předpětí šroubů je i u zbytku ojnice použit prvek Solid 187 pro vytvoření objemové sítě. Na Obr. 5.19 je již vidět kompletní ojnice s vytvořenou sítí. V této fázi je ještě nutné dotvoření kontaktů. V podstatě jsou kontakty umístěny mezi hlavy šroubů a víko ojnice a mezi styk ojnice s víkem (viz Obr. 5.19).



Obr. 5.19 Kompletní síť ojnice s kontakty

### 5.6.2 Zadání zatížení a okrajových podmínek

V této části se využívá prutová náhrada vytvořená v kapitole 5.4. Jednak se ve středech této náhrady zamezily příslušné posuvy a také se do středu horního oka umístily působící síly.

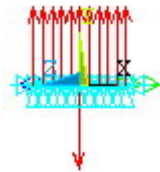
Uzlům tvořícím střed prutové náhrady ve spodním oku se zamezily posuvy ve všech směrech a uzlům tvořícím střed prutové náhrady v horním oku se zamezily posuvy v ose  $x$  a  $z$ . V ose  $y$  zůstaly posuvy povoleny, neboť v tomto směru působí zatížení a ojnice se i v tomto směru deformuje.

Zatížení pro jednotlivé stavy jsou zadávány v krocích po  $5^\circ$  otočení klikového hřídele. První krok je v  $5^\circ$  otočení klikového hřídele za horní úvratí při sacím zdvihu pístu motoru a poslední krok je v  $720^\circ$  otočení klikového hřídele (tedy horní úvrat' mezi výfukovým a sacím zdvihem pístu). Zadávání jednotlivých kroků není samozřejmě prováděno ručně, ale je pro tuto činnost použito makro, které automatizovaně přiřazuje příslušné hodnoty zatížení

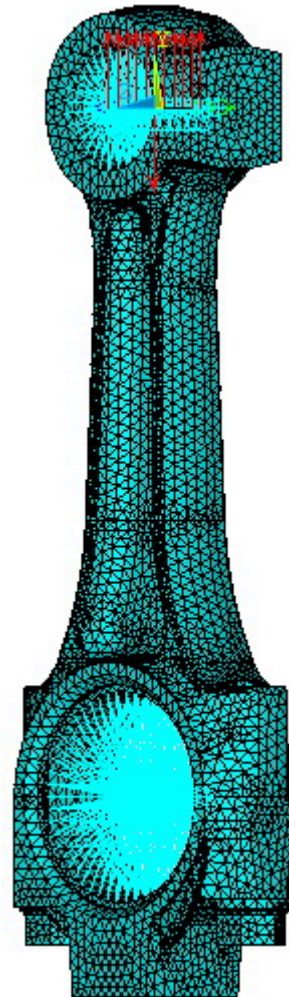
jednotlivým kroků. Pro činnost makra je nutné vytvořit následující soubory s hodnotami zatížení:

- zrychlení pístu působící na ojnici ve směru osy  $x$ :  $a_x(\alpha_i)$
- zrychlení pístu působící na ojnici ve směru osy  $y$ :  $a_y(\alpha_i)$
- celková síla působící na horní oko působící ve směru ojnice:  $F_{oj}(\alpha_i)$
- úhlové zrychlení kyvu dřívku ojnice kolem osy  $z$ :  $\varepsilon_A(\alpha_i)$
- úhlová rychlost kyvu dřívku ojnice kolem osy  $z$ :  $\varpi_A(\alpha_i)$

Jelikož střed prutové náhrady horního oka tvoří 11 uzlů, tak musí být síla  $F_{oj}$  při zadávání do souboru s hodnotami zatížení zmenšena jedenáctkrát. Na Obr. 5.20 jsou schématicky zobrazeny působící síly (směr vzhůru), zrychlení (směr dolů) a zablokované posuvy uzlů ve středech prutových náhrad v prvním zátěžovém kroku. Na Obr. 5.21 je již vidět kompletní výpočtový model těsně před spuštěním výpočtů.



Obr. 5.20 Schéma zatížení

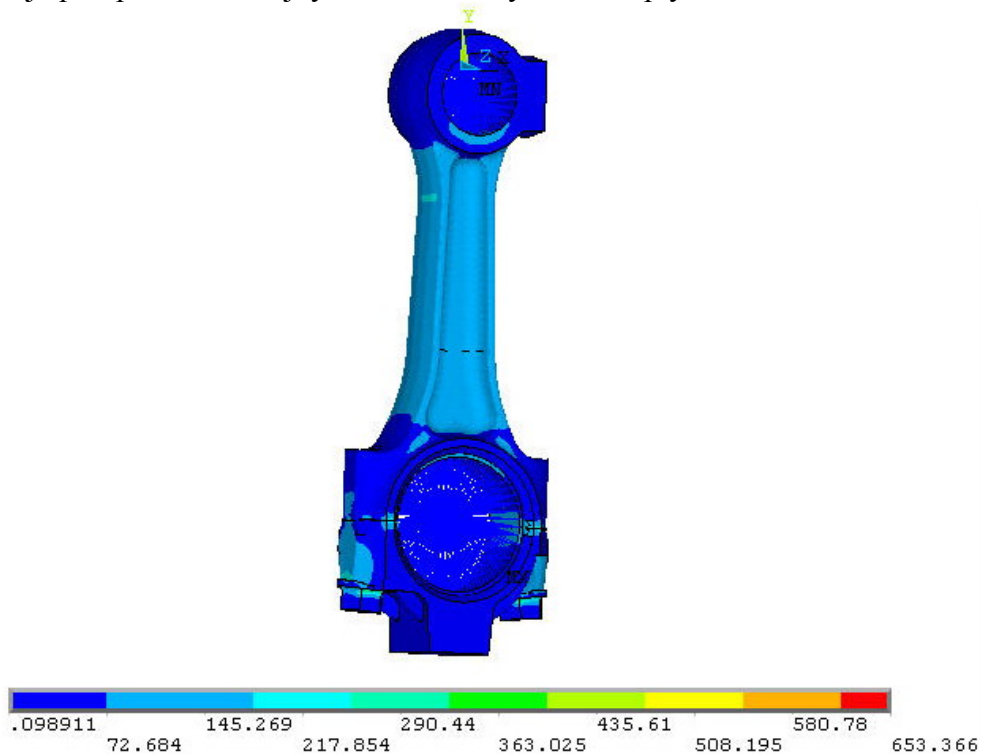


Obr. 5.21 Kompletní výpočtový model

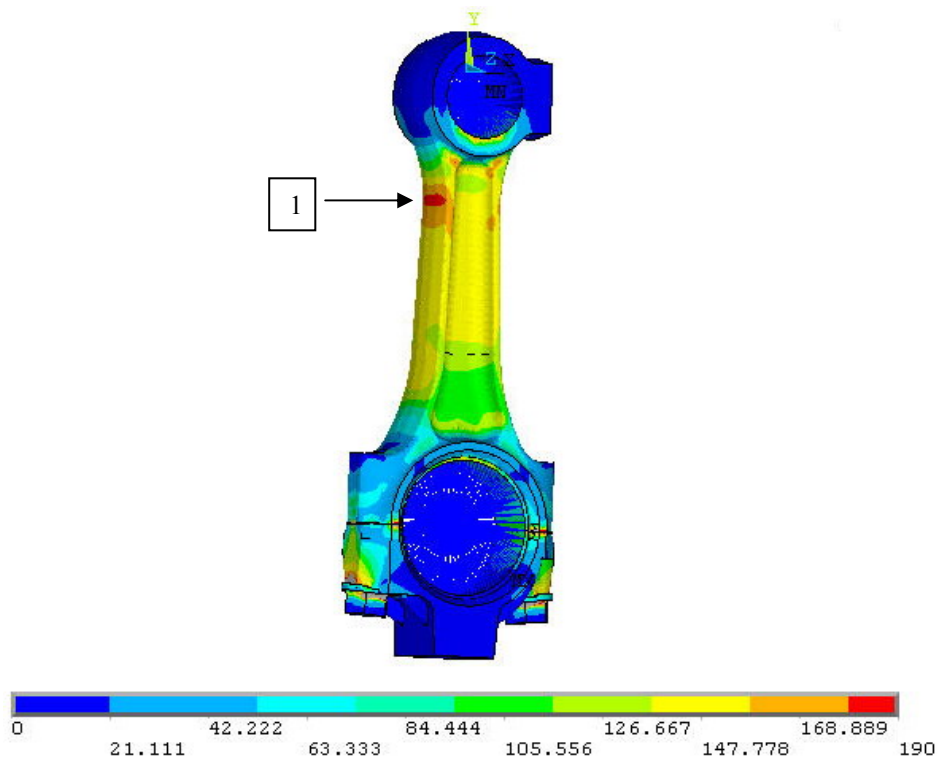
## 5.7 Výsledky pevnostní analýzy

Při zobrazování výsledků napjatosti je využito možnosti zobrazení redukovaných napětí (Von Misses) v jednotlivých uzlech modelu. Pro zobrazení výsledků napjatosti je zvoleno

natočení klikového hřídele ve  $365^\circ$ , což je  $5^\circ$  otočení za horní úvratí expanzního zdvihu. Při této pozici je předpokládána nejvyšší velikost síly od tlaků plynů.



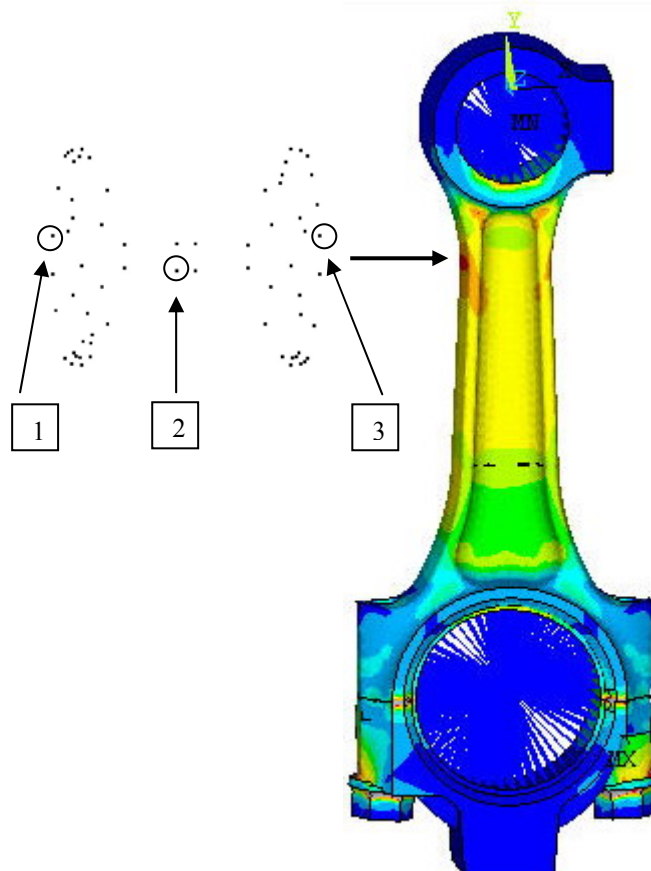
Obr. 5.22 Redukované napětí ( $365^\circ$  otočení KH)



Obr. 5.23 Redukované napětí ( $365^\circ$  otočení KH)

Na Obr. 5.22 je zobrazen základní rozsah výsledků nabídnutý programem Ansys. Toto vykreslení však není příliš přehledné, neboť maximální velikost redukovaného napětí je až kolem 650 [MPa] a toto napětí je pod hlavou šroubu, tím pádem je špatný přehled o velikosti rozložení napětí po dříku ojnice. Z tohoto důvodu je na Obr. 5.23 zobrazen stejný výsledný zátěžný stav s přepnutým rozsahem velikosti redukovaných napětí. Z tohoto rozsahu je patrné, že maximální velikost redukovaného napětí v dříku ojnice (kolem 190 [MPa]) je na levé straně, kousek pod horním okem ojnice (viz pozice 1, Obr. 5.23). Ve zbytku dříku se pohybuje maximální velikost redukovaného napětí kolem 150 [MPa].

Pro ještě lepší přehlednost zobrazení výsledků je dále využito výpočtového kroku po 5° natočení klikového hřídele. To umožňuje vykreslení průběhů napětí ve vybraných uzlech ojnice v celém průběhu otáčení klikového hřídele. Pro zobrazení výsledků byly vybrány uzly na krajích a uprostřed řezu v místě nejvyššího redukovaného napětí dříku (viz Obr. 5.24).



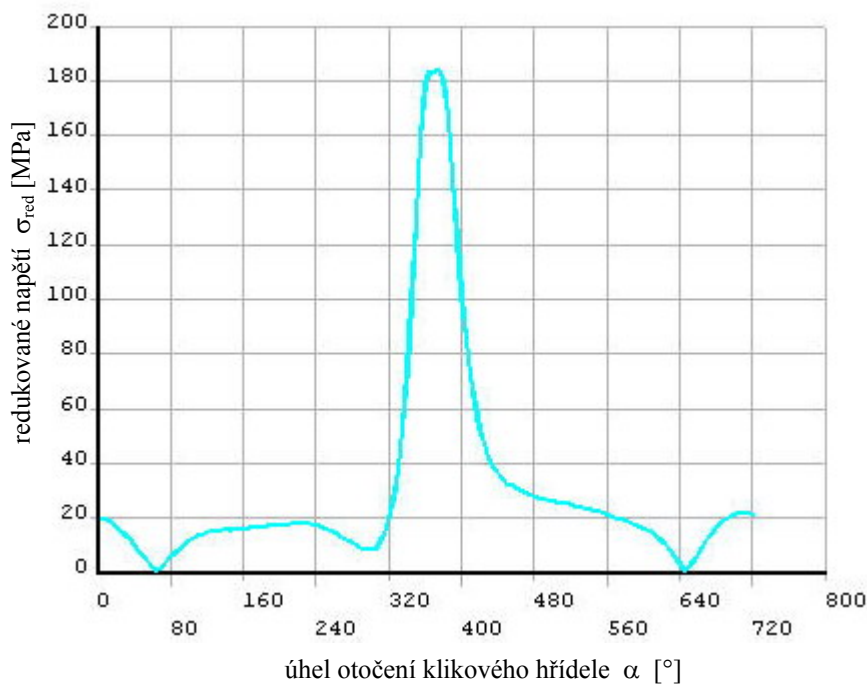
**Obr. 5.24** Výběr uzlů pro zobrazení grafů napětí

Graf 5.10 zobrazuje napětí v uzlu na levém okraji dříku ojnice (viz pozice 1, Obr. 5.24). Je zřejmé, že maximální velikost redukovaného napětí v tomto grafu je stejná s maximem na Obr. 5.23. Z grafu dále vyplývá, že maximální velikost napětí je v 375° otočení klikového hřídele, což odpovídá maximální velikosti síly od tlaků plynů po vznícení paliva. Od 360° po 380° otočení klikového hřídele se však napětí příliš nemění. V grafu 5.11 je patrný pokles maximálního redukovaného napětí v uzlu ve střední části dříku (viz pozice 2, Obr. 5.24) k hodnotě kolem 150 [MPa], což také odpovídá rozložení redukovaného napětí (viz Obr. 5.23). Z grafu 5.12 vyplývá, že uzel na pravé straně dříku (viz pozice 3, Obr. 5.24) má proti uzlu ve střední části mírně zvýšenou hodnotu maximálního redukovaného napětí a to na hodnotu těsně pod 160 [MPa]. Toto rozložení napětí odpovídá realitě, neboť při pohybu pístu z horní úvrati po vznícení paliva a pohybu dolního oka ve směru hodinových ručiček

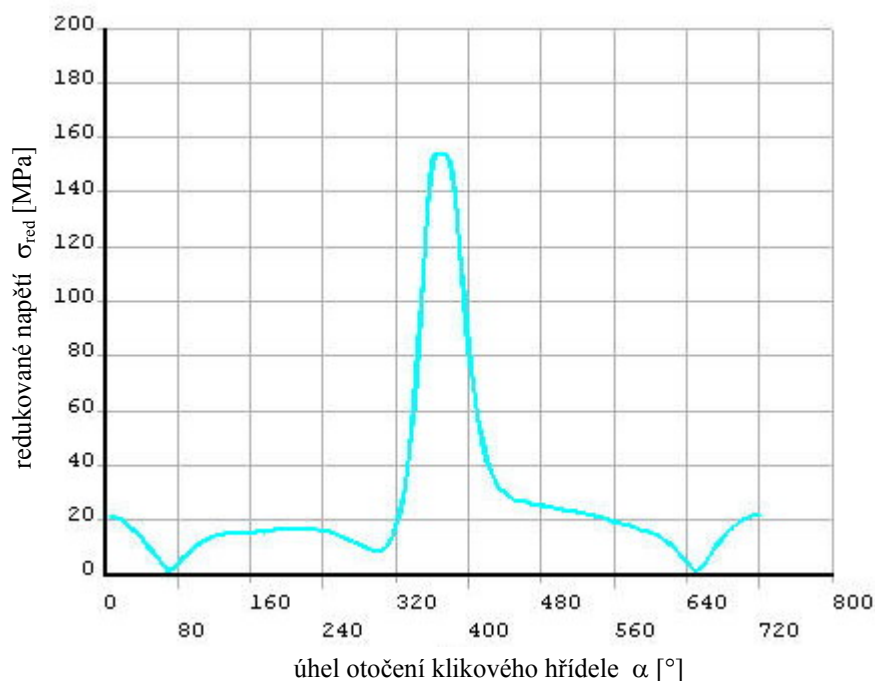


vznikají opravdu maximální napětí na levé straně dřívku ojnice. Mez kluzu materiálu ojnice je minimálně 450 [MPa], takže v porovnání s touto hodnotou jsou vyobrazené redukované napětí poměrně nízké. Z proměnlivé velikosti výsledných redukovaných napětí se potvrdilo únavové namáhání ojnice.

Pro doplnění je přiřazen graf 5.13, který zobrazuje proměnlivou velikost redukovaného napětí v uzlu umístěného těsně pod hlavou šroubu.

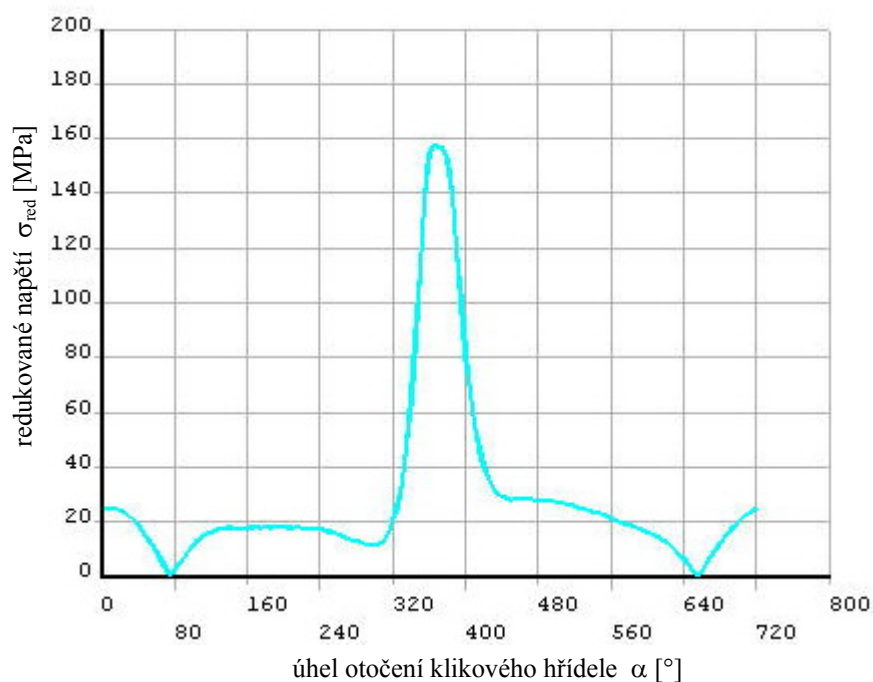


**Graf 5.10 Průběh redukovaných napětí v uzlu 1**

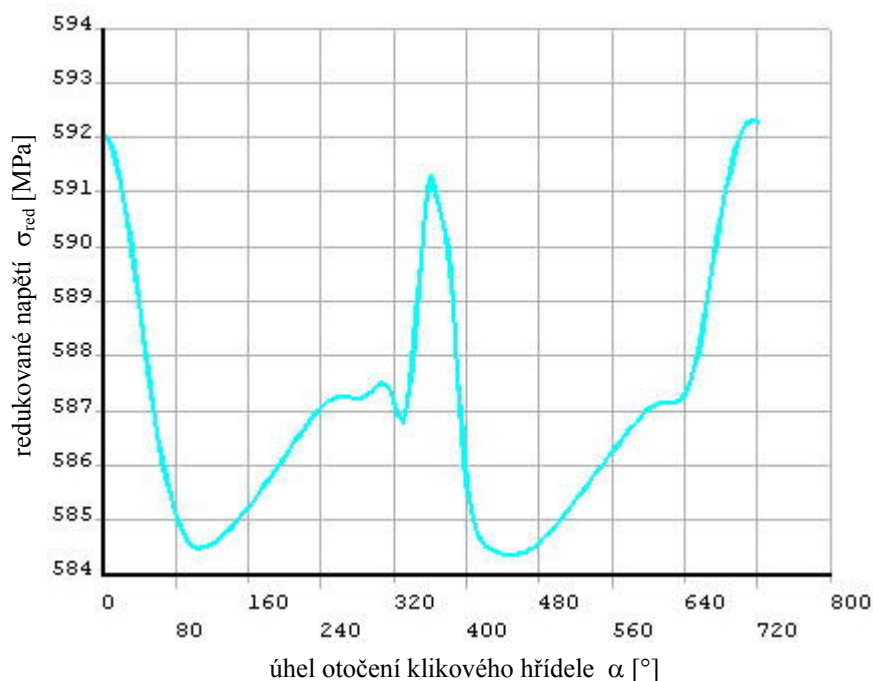


**Graf 5.11 Průběh redukovaných napětí v uzlu 2**





**Graf 5.12 Průběh redukovaných napětí v uzlu 3**

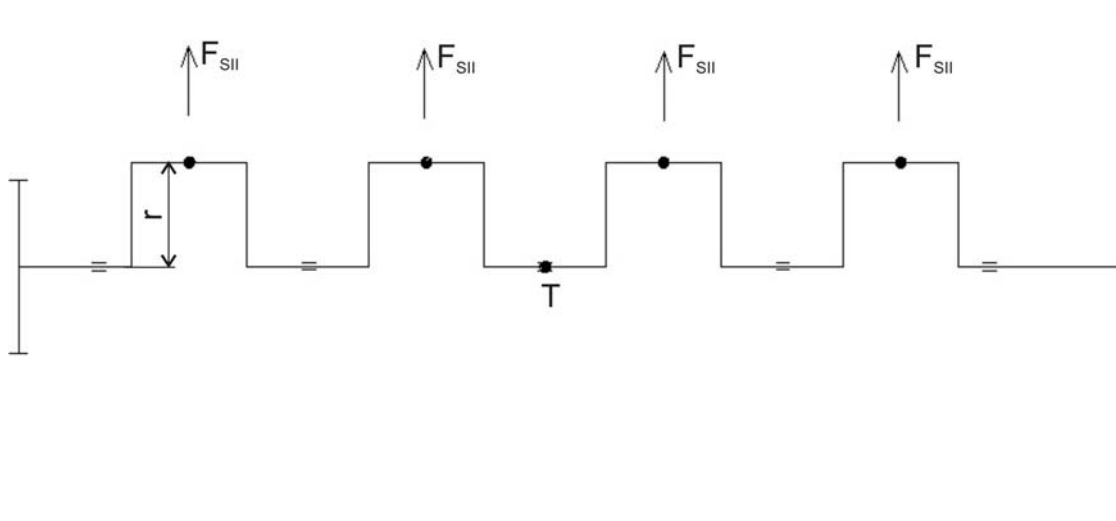


**Graf 5.13 Průběh redukovaných napětí v uzlu pod hlavou šroubu**

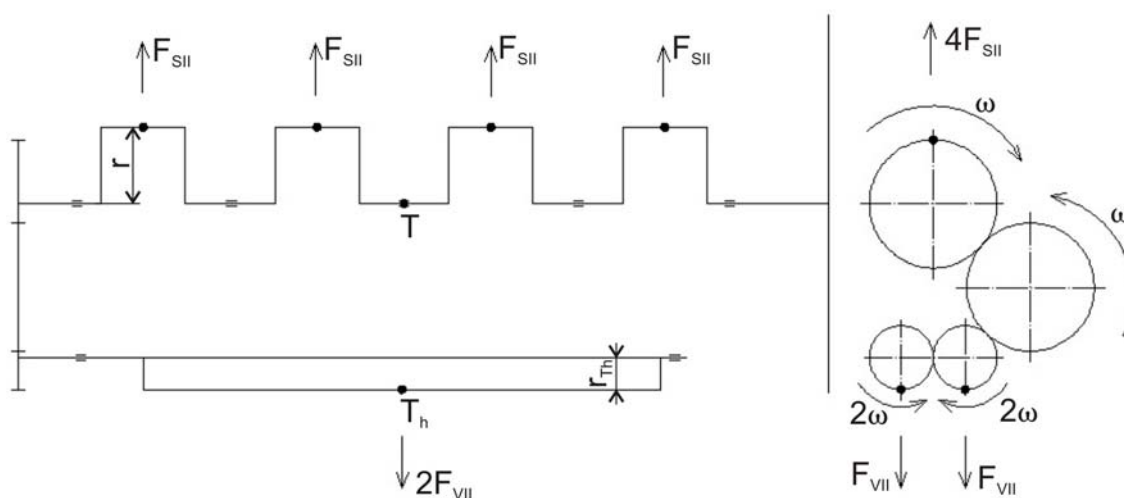
Z grafu 5.13 vyplývá, že velikost koncentrace napětí pod hlavou šroubu je mnohem vyšší než velikost napětí v dříku, ale proměnlivost velikosti redukovaného napětí v závislosti na natočení klikového hřídele je mnohem nižší.

## 6 Výpočet nevyváženosti motoru

U současných motorů se vyvažují odstředivé síly, působící v místech ojnicích čepů, které se otáčející úhlovou rychlostí na rameni klikového hřídele. Dále setrvačné síly od posuvných hmotností prvního a druhého řádu a momenty, které tyto síly vytvářejí. Čtyřdobý čtyřválcový motor je poměrně dobře vyvážený již v základním provedení. Výslednice odstředivých sil a setrvačných sil prvního řádu od posuvných hmotností jsou nulové. Navíc se dají jednoduchým přidáním protizávaží na protějších stranách ramen klikového hřídele vynulovat veškeré působící momenty od těchto sil. Klikové hřídele firmy Zetor tyto protizávaží mají, takže motor je celkem dobře vyvážený. Jedinou nenulovou složkou jsou setrvačné síly druhého řádu od posuvných hmotností (viz Obr. 6.1). Touto problematikou se budou zabývat následující výpočty a právě na míře nevyváženosti od těchto sil bude záviset i odlehčení ojnice. Setrvačné síly druhého řádu od posuvných hmotností se dají vyvážit pouze přidáním dvou vyvažovacích hřídelů, které se otáčejí dvojnásobnými otáčkami klikového hřídele a vzájemně mají opačnou orientaci otáčení (viz Obr. 6.2).



Obr. 6.1 Schéma působení setrvačných sil druhého řádu od posuvných hmotností



Obr. 6.2 Schéma vyvážení setrvačných sil druhého řádu od posuvných hmotností

hmotnost pístní skupiny s posuvnými částmi vymodelované ojnice:

$$m_{p-v} = m_{pist} + m_{A-v} \quad (6.1)$$

setrvačné síly druhého řádu od posuvných hmotností:

$$F_{SII} = \lambda \cdot m_{p-v} \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(2\alpha) \quad (6.2)$$

odstředivé síly vyvažovacího hřídele:

$$F_{VII} = m_h \cdot r_{Th} \cdot (2\omega)^2 \cdot \cos(2\alpha) \quad (6.3)$$

Pozn. : Klikový poměr  $\lambda$  a úhlová rychlost  $\omega$  pro jmenovité otáčky motoru byly vypočítány v kapitole 5.2.1 . Hmotnost posuvných částí vymodelované ojnice byla vypočítána v kapitole 5.3 . Ostatní vstupní parametry jsou vypsány v kapitole 3 .

velikost vyváženosti motoru se stávající ojnici:

$$VM_s = \frac{2 \cdot F_{VII}}{4 \cdot F_{SII}} \cdot 100 \quad VM_s = 85,6 \quad [\%] \quad (6.4)$$

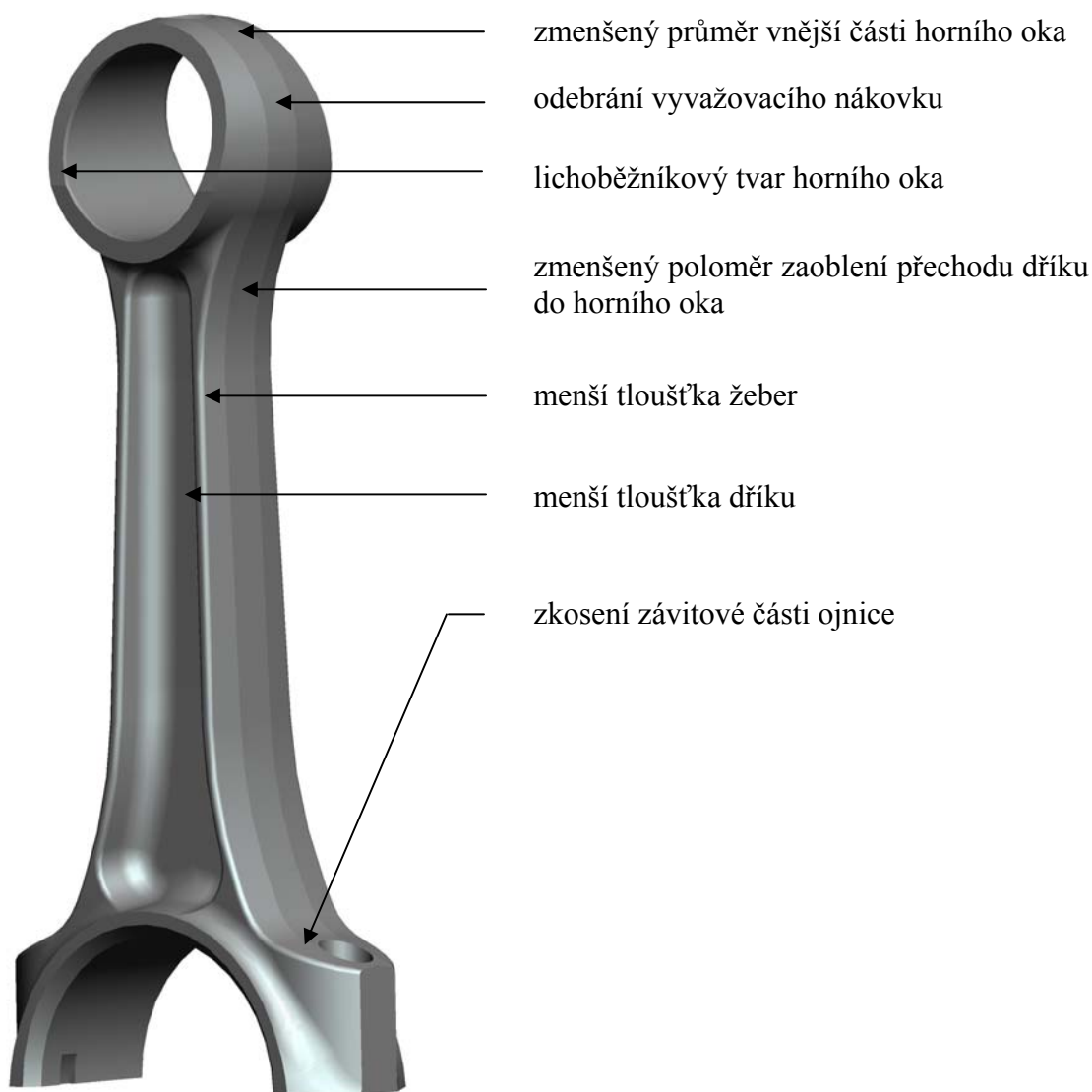
hmotnost posuvných částí ojnice pro 100 % vyvážený motor:

$$m_{A-100} = \frac{2 \cdot m_h \cdot r_{Th}}{\lambda \cdot r} - m_{pist} \quad m_{A-100} = 0,469 \quad [\text{kg}] \quad (6.5)$$

Nutno podotknout, že by se motor mohl vyvážit také mírným zvýšením hmotnosti vyvažovacích hřídelů. Toto řešení však není možné z důvodu zástavbových prostor bloku motoru. Aby byl motor vyvážen ze 100 % , tak by se hmotnost posuvných částí ojnice musela snížit téměř o polovinu, což znamená poměrně velké odebrání materiálu v horní polovině ojnice.

## 7 Tvorba 3D modelu odlehčené ojnice

Základem pro tvorbu odlehčené verze ojnice, byl zhotovený 3D model z kapitoly 4 . Při odebrání materiálu bylo nutné dodržet základní požadavek zadání na zachování vyvažovacího nákovku v oblasti víka ojnice a na zachování všech obráběných ploch. Pro snížení hmotnosti od posuvných částí ojnice má smysl odebrat materiál spíše v horní polovině ojnice, čímž je docíleno posunutí těžiště k dolnímu oku ojnice a tím je způsobeno i samotné snížení hmotnosti od posuvných částí. Z tohoto důvodu bylo původní víko ojnice kompletně zachováno. Samotné odebrání materiálu má smysl pouze s okamžitou pevnostní kontrolou. Pro okamžitou kontrolu byl vybrán stav při nejvyšších spalovacích tlacích kolem 370° natočení klikového hřídele. Bylo zhotoveno 6 různých odlehčených variant, z nichž byla vybrána varianta na Obr. 7.1 . Toto řešení bylo vybráno z toho důvodu, že velmi dobře obstálo v pevnostní analýze a zavádí nový (lichoběžníkový) tvar horního oka, jehož užití má u naftových motorů, z důvodu průběhů působících sil, logické opodstatnění. Nutno však podotknout, že výhody lichoběžníkového tvaru horního oka ojnice plně využije píst, který má pro tento tvar přizpůsobeny nálitky pro pístní čep.



Obr. 7.1 Upravená ojnice

Na Obr. 7.1 jsou vyobrazeny základní provedené úpravy na modelu ojnice. Navíc byly upraveny ještě některé poloměry zaoblení, ale všechny úpravy nemá smysl vyjmenovávat. Zkosení závitové části ojnice (viz pozice 6, Obr. 7.1) nemá sice na snížení hmotnosti posuvných částí žádný vliv, ale z Obr. 5.23 vyplývá, že se v tomto místě nevyskytuje žádná vyšší napjatost a závit šroubu končí asi 5 [mm] pod vyústěním otvoru závitu ojnice, z toho důvodu byla využita možnost odebrat přebytečný materiál.



*Obr. 7.2 Porovnání kompletně sestavených ojnic*

Na Obr. 7.2 je ukázáno porovnání stávající a upravené ojnice. Je patrné, že jsou obě ojnice téměř stejné v oblasti dolního oka. Změny nastávají až od dřívku směrem k horní části ojnice.

Aby bylo možné zjistit rozložení hmotností v modelu upravené ojnice, je potřebné znovu využít hmotnostní analýzu, kterou umožňuje program Pro/E a zjištěné hodnoty dosadit do momentové rovnováhy.

#### **Údaje zjištěné z hmotnostní analýzy:**

hmotnost nové ojnice:	$m_{oj-n} = 2,201$ [kg]
vzdálenost těžiště od středu dolního oka:	$L_{AT} = 51,542$ [mm]

#### **Momentová rovnováha (ke středu dolního oka):**

Momentová rovnováha již byla popsána v kapitole 4.3 a na Obr. 4.16, proto tento postup již nebude znovu vysvětlován. Hmotnost nové ojnice  $m_{oj-n}$  a vzdálenost těžiště od středu dolního oka  $L_{AT}$  se dosadí do rovnice (4.4) a (4.5) a vyjdou následující hodnoty:

hmotnost posuvných částí nové ojnice:	$m_{A-n} = 0,528$ [kg]
---------------------------------------	------------------------

hmotnost rotačních částí nové ojnice:	$m_{B-n} = 1,673$ [kg]
---------------------------------------	------------------------

### **7.1 Kontrola vyváženosti motoru při použití nové ojnice**

Nejprve se musí hmotnost posuvných částí nové ojnice dosadit do rovnice (6.1) a tím vypočítat celkovou hmotnost posuvných částí motoru s použitím nové ojnice:

$$m_{p-n} = 2,596 \text{ [kg]}$$

Vypočítaná celková hmotnost posuvných částí motoru se dosadí do rovnice (6.2) pro zjištění setrvačných sil druhého řádu od posuvných hmotností a dále už nic nebrání zjištění celkové vyváženosti motoru (dle rovnice 6.4) při použití nové ojnice:

$$VM_n = 97,7 \text{ [%]}$$

Upravený model ojnice má asi o 0,37 [kg] nižší hmotnost posuvných částí a vyváženost motoru dosáhla téměř 98 [%].

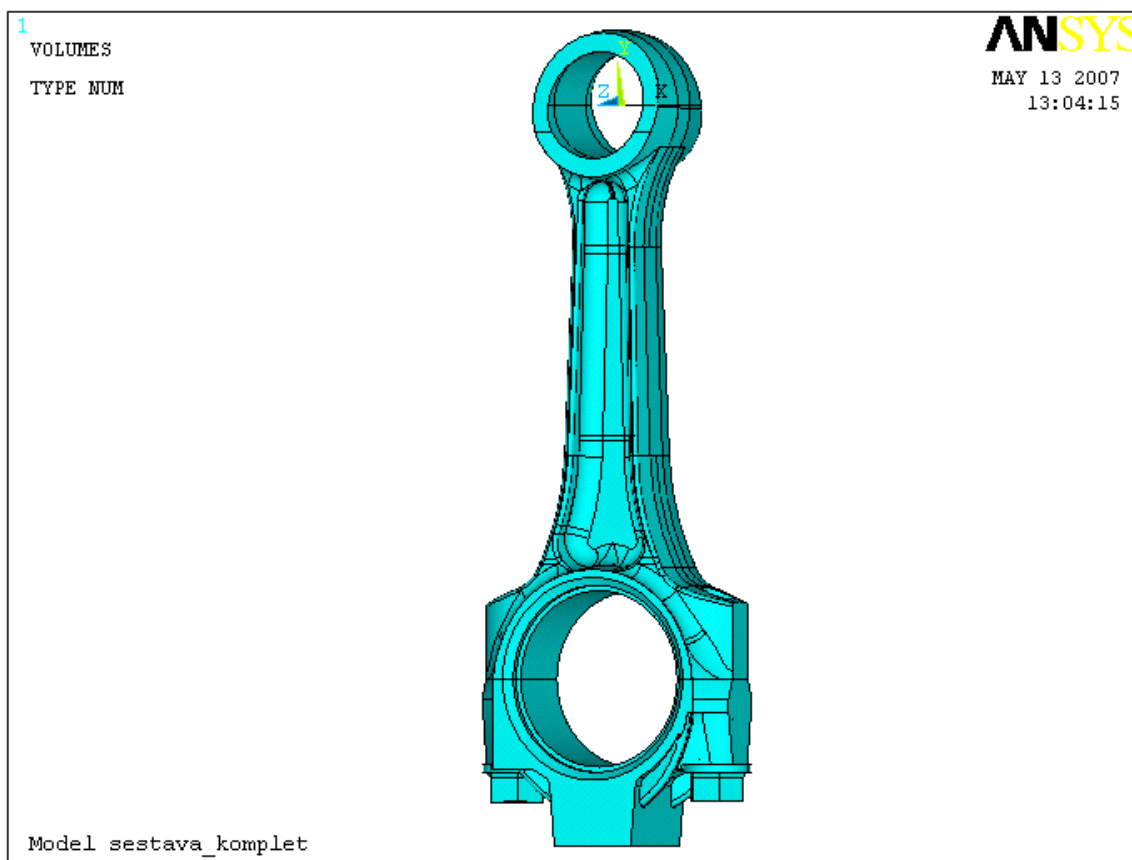


## 8 Pevnostní analýza 3D modelu nové ojnice

Pevnostní analýza nového modelu ojnice je téměř identická s pevnostní analýzou stávajícího modelu ojnice uvedenou v kapitole 5. Rozdíly v řešení budou v této kapitole řešeny nově a identické postupy budou vynechány s uvedením odkazu na kapitolu 5.

### 8.1 Převod 3D modelu do programu Ansys

Postup převodu 3D modelu z programu Pro/E do programu Ansys je naprosto shodný s kapitolou 5.1. Na Obr. 8.1 je vyobrazena převedená geometrie nového modelu v programovém prostředí Ansys s přiřazeným souřadným systémem.



Obr. 8.1 Zobrazená geometrie nového modelu v programu Ansys

### 8.2 Výpočet velikosti zatížení

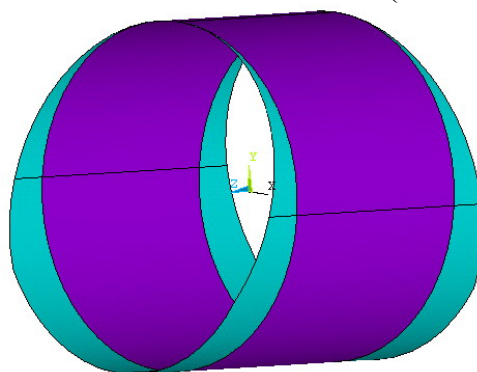
Veškeré zadávané veličiny zatížení jsou shodné s kapitolou 5.2 a hodnoty jsou vypsány v Příloze 1.

### 8.3 Výběr druhů elementů a materiálových vlastností

Všechny použité elementy a materiálové vlastnosti jsou shodné s kapitolou 5.3.

## 8.4 Vytvoření prutové náhrady pístitního a ojničního čepu

Postup je velmi podobný jako v kapitole 5.4 . Nejprve se opět musí vnitřní plochy horního a dolního oka rovnoměrně rozdělit pomocí prvku Mesh 200. Rozdíl je v podstatě pouze u horního oka, neboť u lichoběžníkového tvaru oka není možné natáhnout prvky Link 10 až k okraji oka, neboť spodní část oka je širší než horní. Prutová náhrada může být vytvořena pouze po horní okraj oka (kratší strana lichoběžníku). Z tohoto důvodu musí být plocha horního oka po obvodu rozdělena na šířku horní části oka (viz fialová barva, Obr. 8.2).



*Obr. 8.2 Rozdělení plochy horního oka*

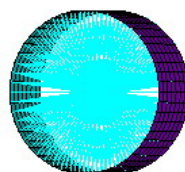
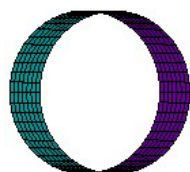
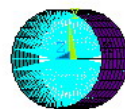
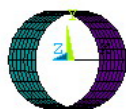
### Horní oko:

Fialová oblast (viz Obr. 8.2) je v ose oka rozdělena na 8 dílů a po obvodu rozdělena na 30 dílů (viz Obr. 8.3).

### Dolní oko:

V ose oka rozděleno na 7 dílů a po obvodu rozděleno na 50 dílů (viz Obr. 8.3).

Natáhnutí prvku Link 10 v horním a dolním oku je naprosto shodné s kapitolou 5.4 .



*Obr. 8.3 Vytvoření sítě ok*

*Obr. 8.4 Natažení prvků Link 10*

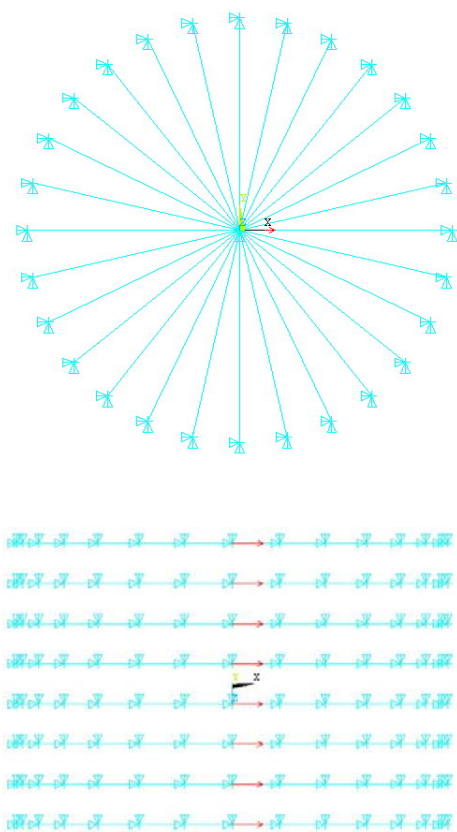
Zjištění reálných konstant pro Link 10 je v podstatě identické jako v kapitole 5.4 , rozdíl je opět pouze u horního oka kde je menší počet řad natažených prvků Link 10.

### Horní oko:

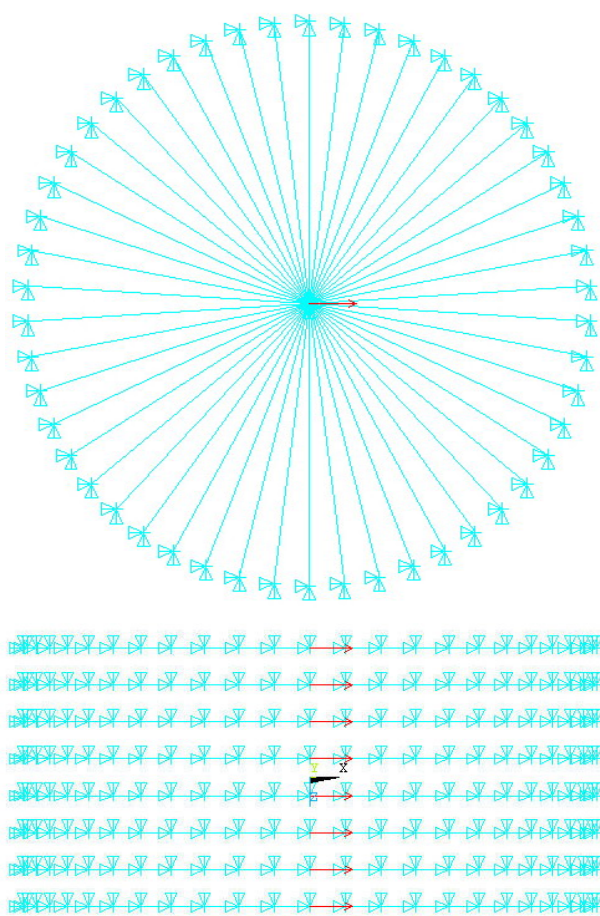
V horním oku je tloušťka olejové vrstvy kolem 0,05 [mm]. Působící síla 85 [kN] je rozdělena mezi 8 uzlů. Při tomto výpočtu vychází potřebný průřez oka 2,9 [mm<sup>2</sup>]. Schéma výpočtu v programu Ansys je na Obr. 8.5 .

### Dolní oko:

V dolním oku je tloušťka olejové vrstvy kolem 0,08 [mm]. Působící síla 85 [kN] je rozdělena mezi 8 uzlů. Při tomto výpočtu vychází potřebný průřez oka 1,68 [mm<sup>2</sup>]. Schéma výpočtu v programu Ansys je na Obr. 8.6 .



Obr. 8.5 Horní oko



Obr. 8.6 Dolní oko

### Zadávané reálné konstanty do programu Ansys:

průřez prutu horního oka:  
průřez prutu dolního oka:

$$S_{ph} = 2,9 \quad [\text{mm}^2]$$

$$S_{pd} = 1,68 \quad [\text{mm}^2]$$

## 8.5 Vytvoření předpětí šroubů

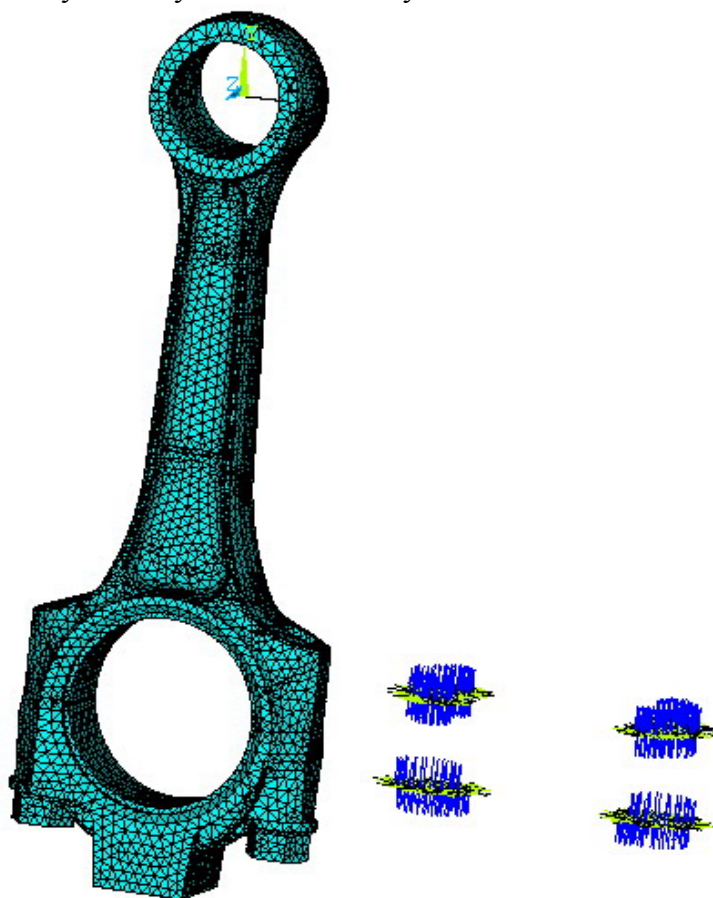
Postup vytvoření předpětí šroubů v programu Ansys je u nového modelu ojnice naprosto shodné s původním modelem (viz kapitola 5.5) .

## 8.6 Dokončení výpočtového modelu

Teď je již příprava výpočtového modelu nové ojnice téměř kompletní. Chybí pouze vytvoření sítě objemu ojnice, vytvoření kontaktů a zadání zatížení s okrajovými podmínkami.

### 8.6.1 Vytvoření sítě objemu ojnice a kontaktů

Pro vytvoření objemové sítě, stejně jako v kapitole 5.6.1 , je použit prvek Solid 187 o velikosti 4 [mm] . Vytvoření kontaktů je naprosto shodné jako v kapitole 5.6.1 . Na Obr 8.7 je již vidět kompletní vysíťovaný model s kontakty.



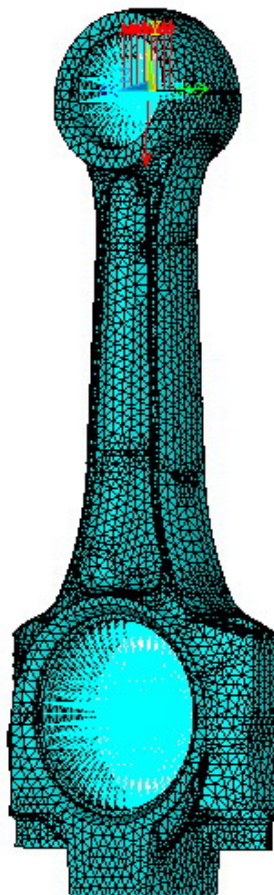
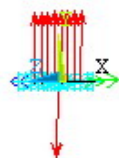
*Obr. 8.7 Kompletní síť ojnice s kontakty*

### 8.6.2 Zadání zatížení a okrajových podmínek

Zamezení posuvů ve středech ok je naprosto shodné jako v kapitole 5.6.2 . Kromě celkové síly působící na horní oko ve směru ojnice jsou i všechny ostatní soubory s hodnotami zatížení pro funkci makra stejné jako v kapitole 5.6.2 . Síla je jiná pouze z toho důvodu, že je rozdělena mezi 8 uzlů a ne 11 jako v kapitole 5.6.2 .

Hodnoty zatížení zadávané do programu Ansys jsou umístěny v Příloze 1. Na Obr. 8.8 je vyobrazeno schéma zatížení pro první zátěžný krok ( 5° natočení klikového hřídele za horní

úvratí sacího zdvihu pístu) a na Obr. 8.9 je zobrazen kompletní výpočtový model těsně před spuštěním výpočtu v tomtéž zátěžném kroku. Červené šipky směrem vzhůru znázorňují působící sílu a červená šipka působící směrem dolů znázorňuje zrychlení pístu. Dále jsou na následujících obrázcích vidět zablokované posuvy v uzlech středů ok.



*Obr. 8.8 Schéma zatížení*

*Obr. 8.9 Kompletní výpočtový model*

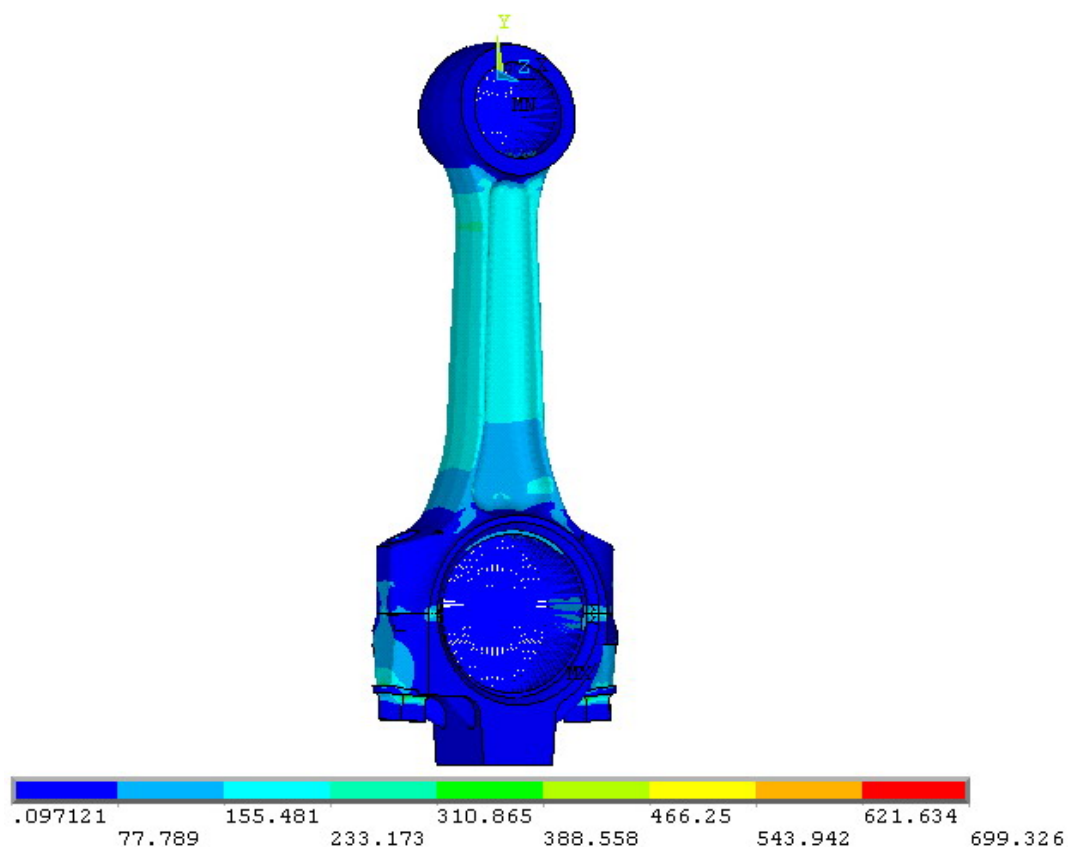
## 8.7 Výsledky pevnostní analýzy

Podobně jako v kapitole 5.7 je i zde pro zobrazování výsledků napjatosti využito možnosti zobrazení redukovaných napětí (Von Misses) v jednotlivých uzlech modelu. Pro zobrazení výsledků napjatosti je pro porovnání také zvoleno natočení klikového hřídele ve  $365^\circ$ , což je  $5^\circ$  otočení za horní úvratí expanzního zdvihu.

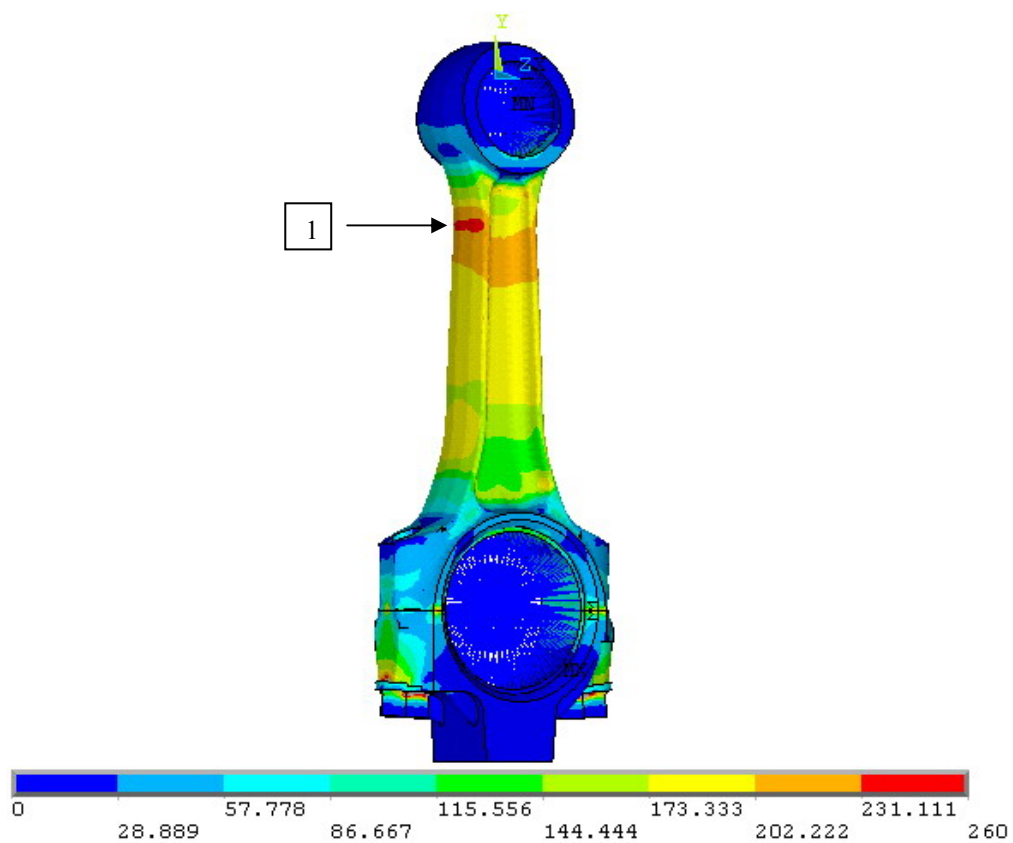
Na Obr. 8.10 je zobrazen základní rozsah výsledků nabídnutý programem Ansys. Je zřejmé, že maximální velikost napětí, téměř 700 [MPa], je opět pod hlavou šroubu. Je zajímavé, že provedenými úpravami v oblasti dřívku ojnice narostlo redukované napětí pod hlavou šroubu. Tento výsledek nejspíš způsobila nižší tuhost dřívku a tím i větší deformace při ohybovém namáhání dřívku. Byla zhotovena i verze odlehčené ojnice, která zvýšila vyváženost motoru téměř na 99 [%]. Tento výsledek byl dosažen díky většímu snížení tloušťky dřívku. Toto oslabení dřívku však způsobilo zvýšení redukovaného napětí pod hlavou šroubu až k 750 [MPa]. Také z tohoto důvodu byla vybrána tato verze odlehčení, která ojniční šrouby tak moc nenamáhá.

Na Obr. 8.11 je již vidět přepnutý rozsah napětí a místo (viz pozice 1), které bude sloužit pro výběr uzlů, ve kterých bude zobrazen průběh redukovaných napětí.





*Obr. 8.10 Redukované napětí (365° natočení KH)*

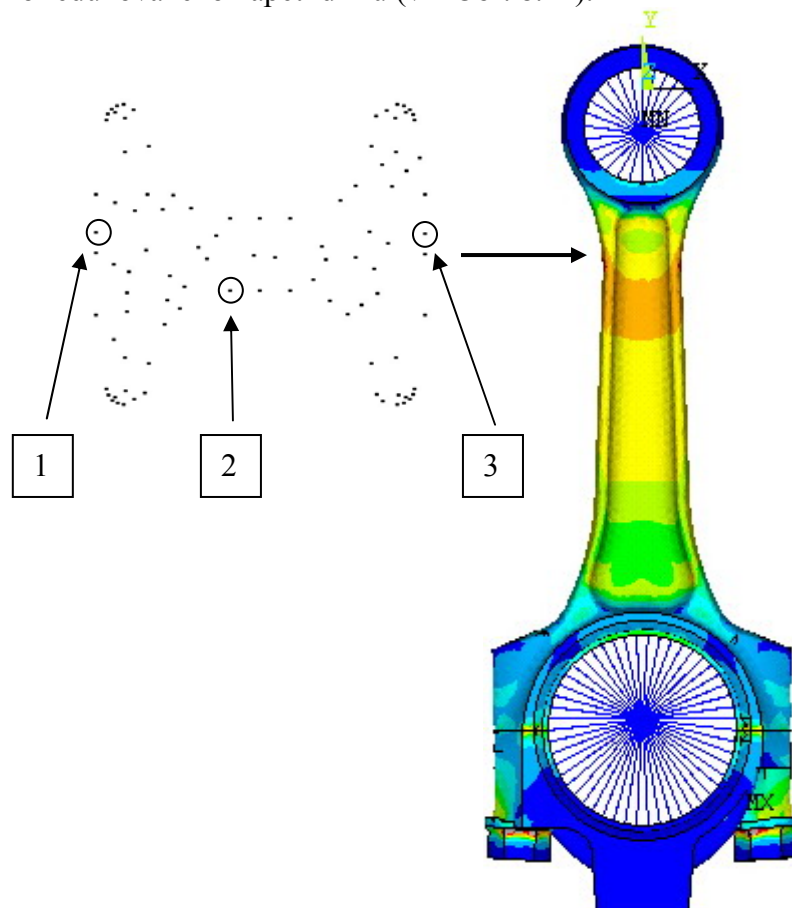


*Obr. 8.11 Redukované napětí (365° natočení KH)*



Z Obr. 8.11 vyplývá, že dřík je z hlediska napětí mnohem lépe využit. Maximální velikost redukovaného napětí je opět na krajích dříku kousek pod horním okem ojnice a dosahuje hodnoty 260 [MPa]. Ve většině zbytku dříku se pohybuje redukované napětí kolem 175 [MPa].

Pro grafy průběhů redukovaných napětí jsou opět vybrány uzly na krajích a uprostřed řezu v místě nejvyššího redukovaného napětí dříku (viz Obr. 8.12).

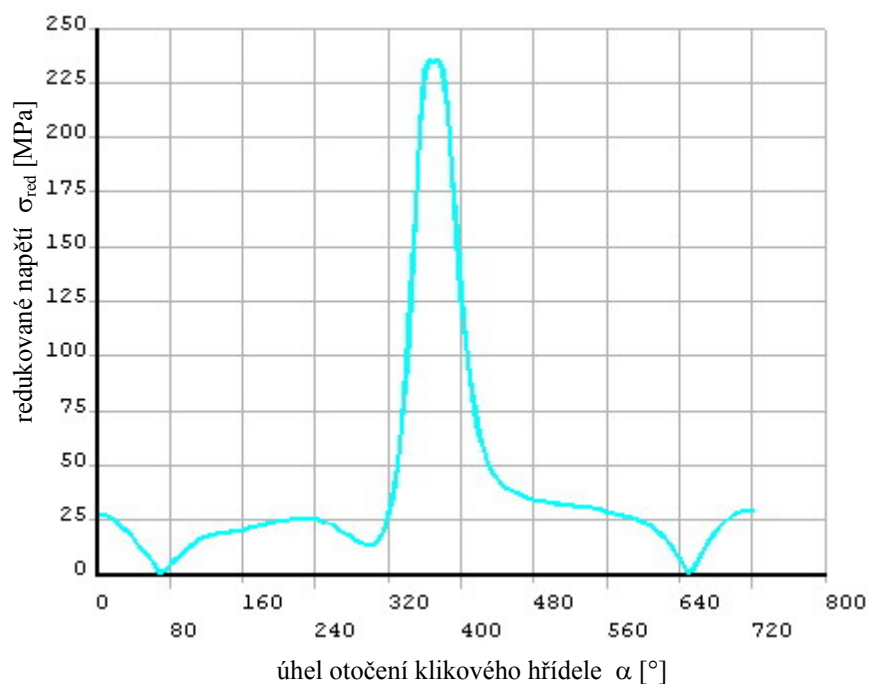


**Obr. 8.12** Výběr uzlů pro zobrazení grafů napětí

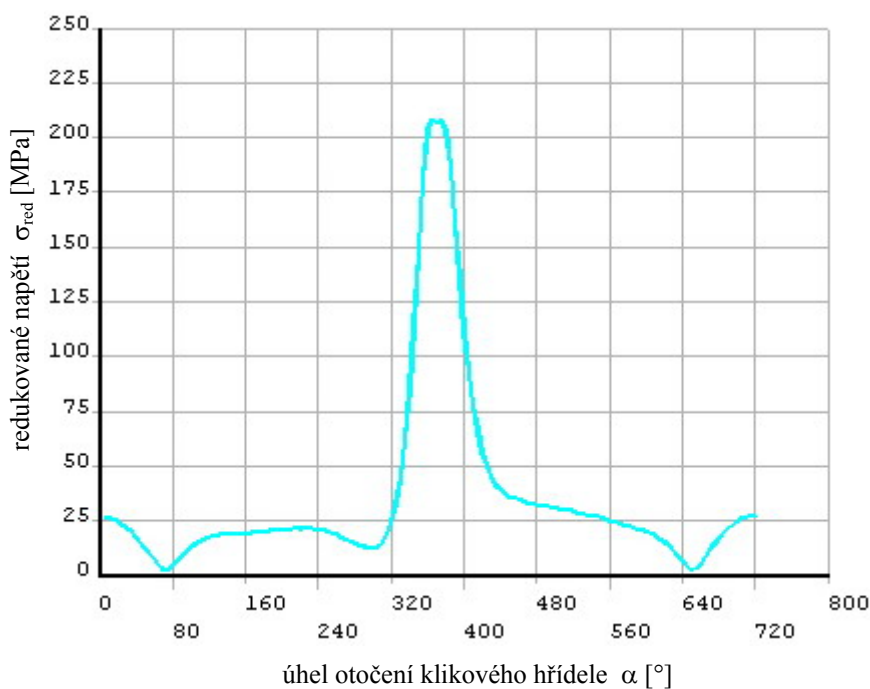
Všechny vyobrazené grafy mají vyšší maximální hodnoty redukovaných napětí než u průběhů redukovaných napětí původní ojnice, což je logické. Tvary průběhů jsou však totožné s průběhy grafů původní ojnice. Graf 8.1 zobrazuje napětí v uzlu na levém okraji dříku ojnice (viz pozice 1, Obr. 8.12). Maximální velikost redukovaného napětí v tomto grafu je kolem 235 [MPa]. V grafu 8.2 je patrný pokles maximálního redukovaného napětí v uzlu ve střední části dříku (viz pozice 2, Obr. 8.12) k hodnotě kolem 205 [MPa], což také odpovídá rozložení redukovaného napětí (viz Obr. 8.11). Z grafu 8.3 vyplývá, že uzel na pravé straně dříku (viz pozice 3, Obr. 8.12) má téměř stejnou hodnotu maximálního redukovaného napětí jako uzel ve střední části dříku.

Pro doplnění je přiřazen graf 8.4, který zobrazuje proměnlivou velikost redukovaného napětí v uzlu umístěného těsně pod hlavou šroubu. Z grafu vyplývá, že se odlišuje, jak velikost maximálního redukovaného napětí, tak relativně hodně i samotný průběh napětí v porovnání s průběhem v grafu 5.13. Tento rozdíl je nejspíše dán tím, že koncentrace napětí ve vrubu je velmi citlivá veličina a toto napětí pravděpodobně ovlivňuje i snížená tuhost dříku upravené ojnice, která umožňuje větší deformace. I jen nepatrně vyšší přenesená deformace

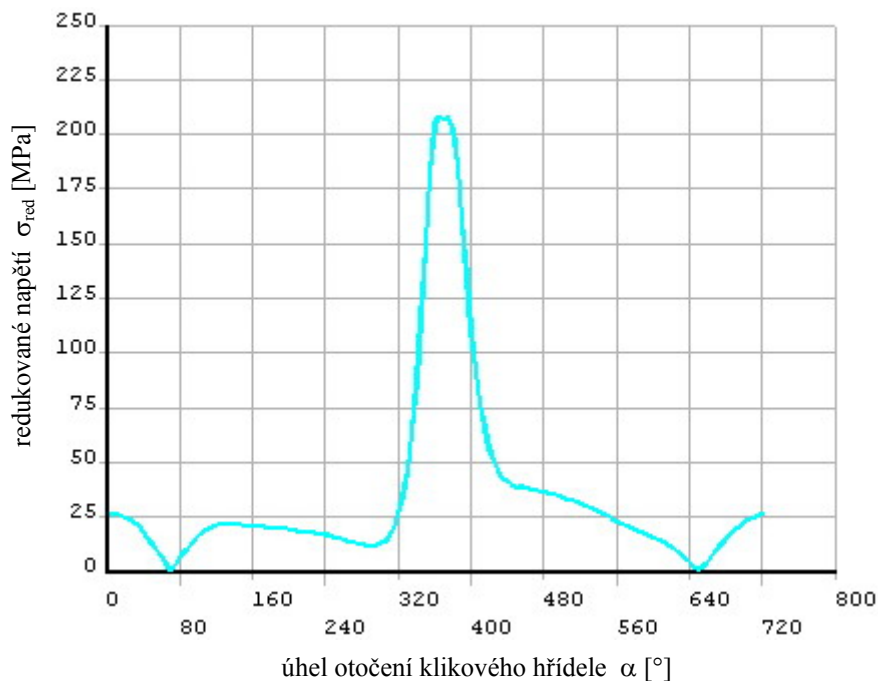
do oblasti hlavy ojnice velmi ovlivňuje hodnotu koncentrace napětí v oblasti vrubu pod hlavou šroubu.



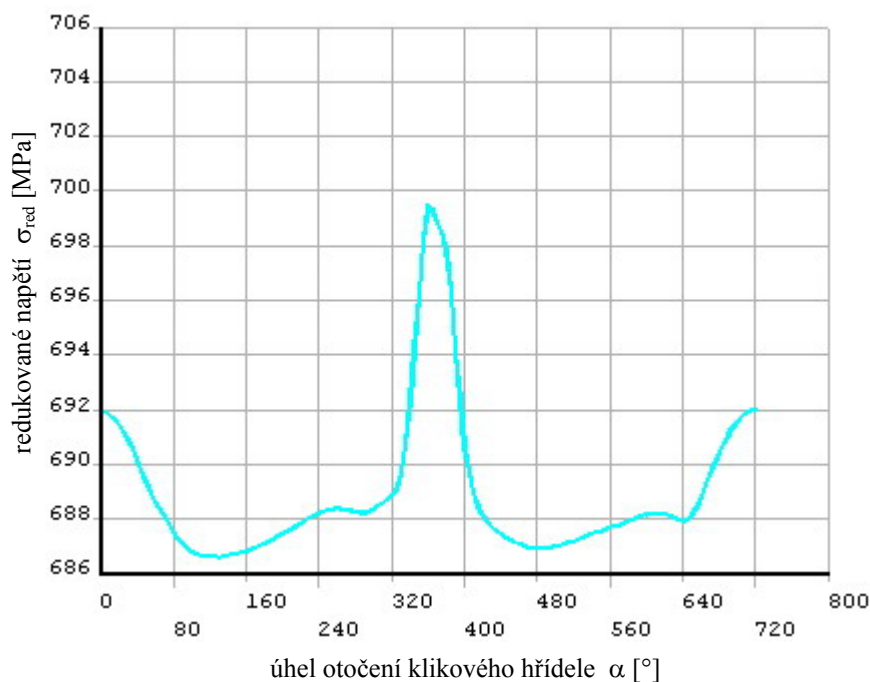
**Graf 8.1 Průběh redukovaných napětí v uzlu 1**



**Graf 8.2 Průběh redukovaných napětí v uzlu 2**



**Graf 8.3 Průběh redukovaných napětí v uzlu 3**



**Graf 8.4 Průběh redukovaných napětí v uzlu pod hlavou šroubu**

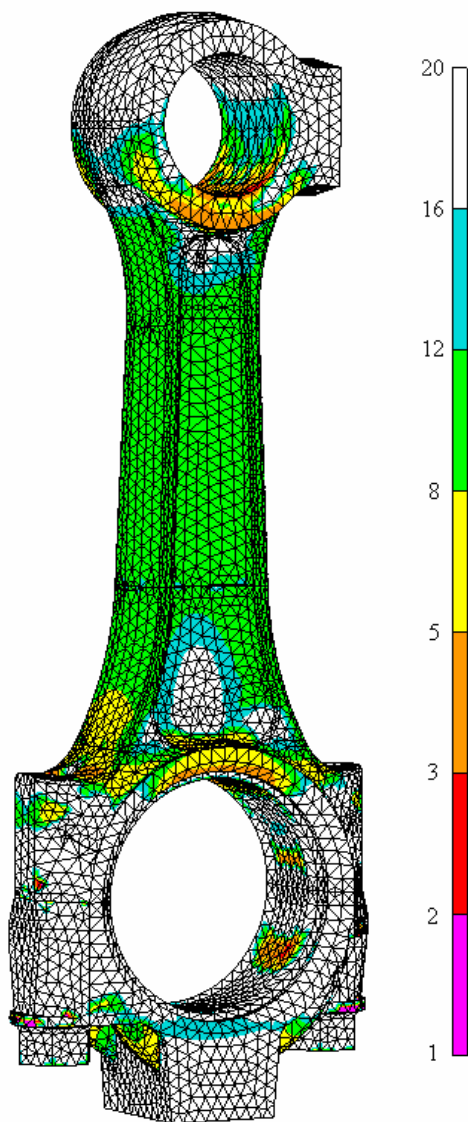
Z pevnostní analýzy vyplývá, že by nová ojnice měla z hlediska pevnosti vydržet. Napětí v ojnici a šroubech je vyšší do 60 [MPa] vzhledem k původní ojnici. Z Obr. 8.11 je patrné, že díky ojnice je mnohem lépe pevnostně využitý.

## 9 Únavová kontrola stávající a upravené ojnice

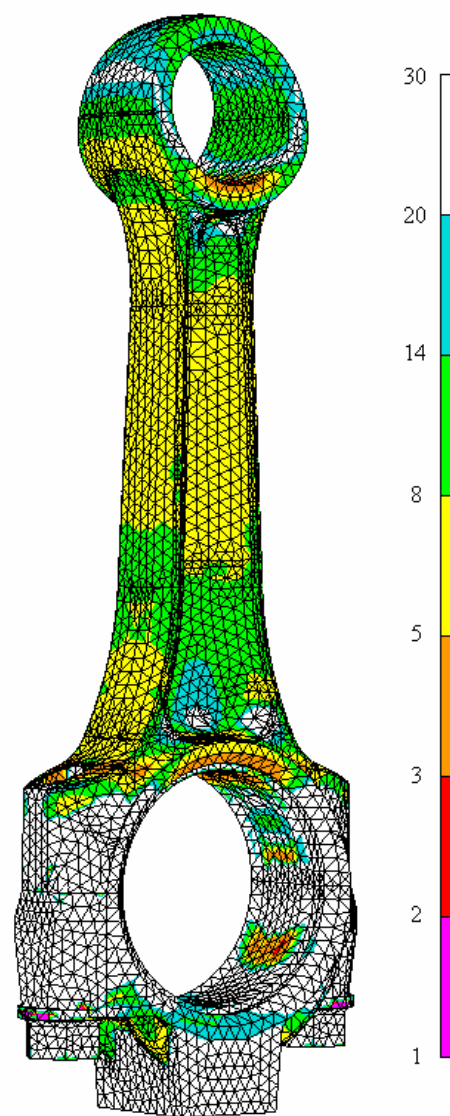
Jelikož se zatížení ojnice mění v čase, tak je zřejmé, že se jedná o únavové namáhání. To je zřejmé i z průběhů redukovaných napětí v grafech pevnostní analýzy. Naproti tomu ve šroubech k tak velkým změnám napětí nedochází, to je dáno tím, že tato ojnice je z nízkootáčkového motoru, tudíž na víko ojnice nepůsobí tak velké setrvačné síly a zatížení šroubů se v čase příliš nemění. Šrouby jsou namáhány hlavně samotným předpětím.

Z těchto důvodů bylo využito možnosti zkontrolovat ojnici a samostatné šrouby na únavovou bezpečnost. Kontrola byla provedena softwarem FemFat verze 4.6b. Pro tento program slouží jako vstupy: geometrie tvořená uzly importovaná z programu Ansys a soubor s výslednými hodnotami napětí v jednotlivých uzlech geometrie při všech zátěžových krocích (v mém případě po 5° otočení klikového hřídele) rovněž získaná z programu Ansys.

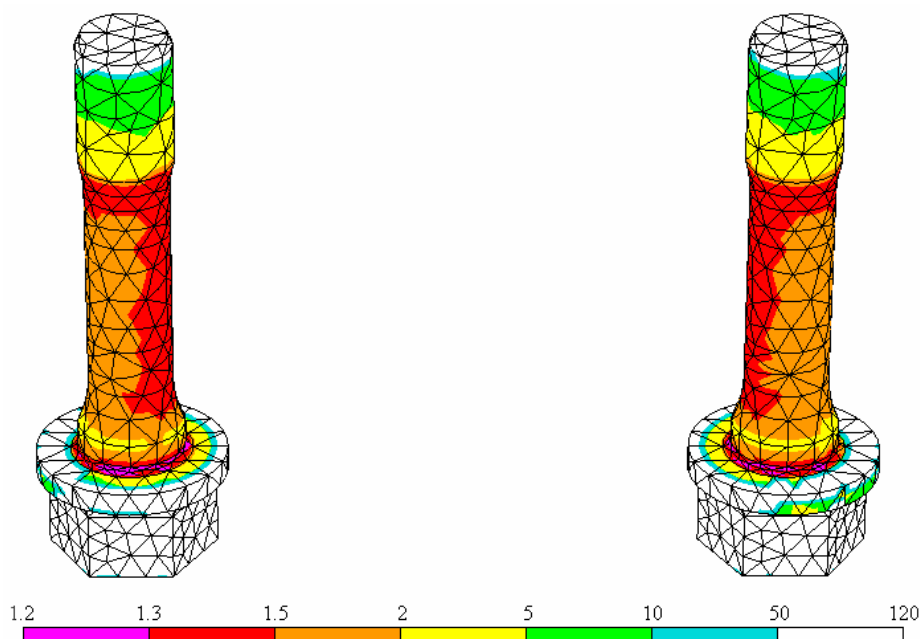
Dále se musí nadefinovat vlastnosti materiálu a drsnost jednotlivých ploch tvořených uzly. Na následujících obrázcích je již vidět rozložení únavových bezpečností po povrchu stávající a nové ojnice a také po povrchu ojničních šroubů.



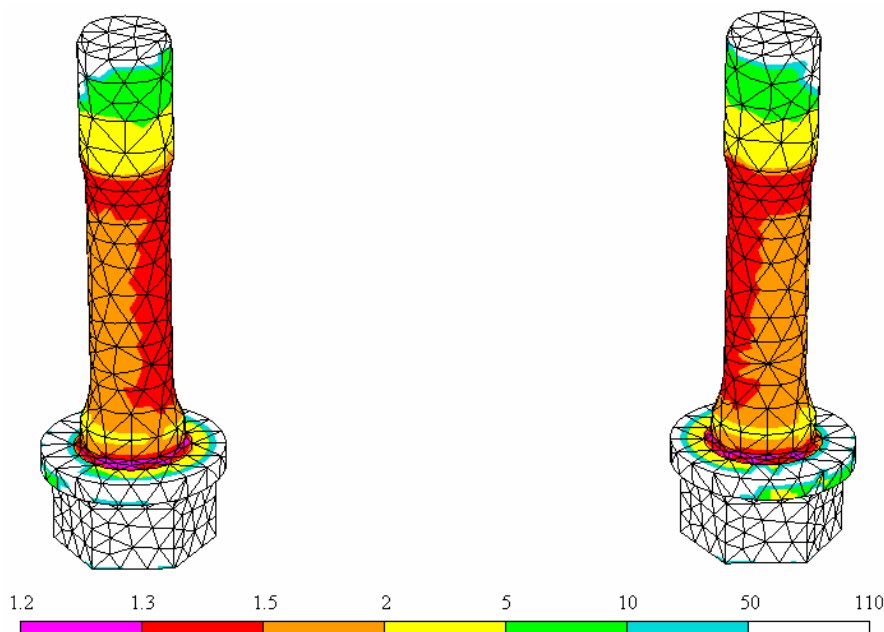
Obr. 9.1 Únavová bezpečnost stávající ojnice



Obr. 9.2 Únavová bezpečnost nové ojnice



**Obr. 9.3 Únavová bezpečnost ojničních šroubů neupravené ojnice**



**Obr. 9.4 Únavová bezpečnost ojničních šroubů upravené ojnice**

Z porovnání únavových bezpečností ojnic (viz Obr. 9.1 a 9.2) vyplývá, že dřík a horní oko upravené ojnice jsou z hlediska bezpečnosti mnohem lépe využity. Velká část dříku upravené ojnice má bezpečnost kolem 6 (u stávající kolem 10). U vrchní části horního oka je bezpečnost upravené ojnice kolem 10 (u stávající kolem 20). Oblast v těsné blízkosti horního a dolního oka se však nedá příliš hodnotit, neboť zde prutová náhrada přináší velké nepřesnosti. Ojniční šrouby mají přibližně stejný průběh rozložení únavové bezpečnosti a dle očekávání je nejnižší bezpečnost (kolem 1.2) ve vrubu těsně pod hlavou šroubu.

Z kontroly na únavovou bezpečnost vyplývá, že i nejnižší hodnoty bezpečnosti stávající i upravená ojnice jsou dostatečné.

## 10 Shrnutí přínosů nové ojnice

Nová odlehčená ojnice byla vytvořena dle požadavku na zachování obráběných rozměrů, což zaručuje bezproblémovou montáž do stávajícího motoru.

	stávající model	nový model
celková hmotnost ojnice [kg]:	2,649	2,201
hmotnost ve středu horního oka [kg]:	0,899	0,528
hmotnost ve středu dolního oka [kg]:	1,750	1,673

**Tab. 10.1 Porovnání hmotností stávající a nové ojnice**

Z Tab. 10.1 vyplývá, že celková hmotnost ojnice byla snížena téměř o 0,45 [kg] a hmotnost posuvných částí, o kterou hlavně šlo, byla snížena asi o 0,37 [kg]. Z tohoto výsledku vyplývá, že materiál byl odebrán na správných místech, neboť hmotnost rotačních částí byla snížena pouze o necelých 0,1 [kg]. Dosaženým odlehčením se zvýšila vyváženost posuvných částí motoru na necelých 98 [%].

Důležité je, že odlehčení nebylo vytvořeno na úkor pevnosti nové ojnice, neboť z pevnostní analýzy bylo zjištěno, že dřík nové ojnice je lépe využit z hlediska výsledných redukovaných napětí. Napětí v dříku bylo zvýšeno průměrně o 60 [MPa] a maximální redukované napětí se pohybuje kolem 260 [MPa]. Jelikož minimální velikost meze kluzu materiálu této ojnice je 450 [MPa], tak se maximální velikost redukovaného napětí pohybuje ve velmi bezpečných hodnotách. Neboť je ojnice namáhána únavově, tak nestačí pouze pevnostní kontrola, ale bylo nutné ojnici zkontrolovat též na únavovou bezpečnost.

Z únavové analýzy sice byl zjištěný pokles hodnot bezpečnosti hlavně v oblasti dříku a horního oka ojnice, avšak nové hodnoty bezpečnosti jsou i přesto poměrně vysoké a na životnost ojnice nemá odebraný materiál vliv. Na hodnoty bezpečnosti v oblasti dolního oka ojnice nemají, dle očekávání, provedené úpravy vliv.

Přínosem je také moderní, lichoběžníkový tvar horního oka, který však při použití stávajícího pístu plní pouze funkci nižších hmotností posuvných hmot ojnice. Aby byl tento tvar horního oka ojnice plně využit, tak by bylo dobré provést drobnou úpravu pístu, která by spočívala ve vytvoření stejného tvaru, jaké má oko ojnice, v nálitcích pro pístní čep. To by způsobilo, že by při expanzním zdvihu píst dosedl na horní oko ojnice, síly od tlaků plynů by se rovnoměrně přenášely na oko ojnice a pístní čep by byl méně zatížen. Tím pádem by mohl být pístní čep menší a snížila by se další hmotnost posuvných částí motoru.



## 11 Závěr

Veškeré úkoly zadání byly splněny. Navíc byla stávající i nová ojnice zkontrolována na únavovou bezpečnost.

Provedenými úpravami byla vyváženost motoru zvýšena téměř na 98 [%]. Byla zkoušena i varianta odlehčení, která zvýšila vyváženost motoru až na 99 [%], u této varianty však vznikly mnohem vyšší koncentrace napětí v oblasti zaoblení pod hlavou ojničního šroubu. Z tohoto důvodu zvítězila prezentovaná varianta odlehčení, která zajišťuje odolnost jak pevnostní, tak proti únavovému zatěžování.

Důvodem proč jsem také nechtěl odebírat materiál až na samou hranici únavové a pevnostní bezpečnosti je fakt, že použitá prutová náhrada neodráží příliš realitu olejové vrstvy mezi pístním čepem a horním okem ojnice a mezi ojničním čepem a dolním okem ojnice. To je patrné zejména z únavové kontroly ojnice, při které vycházely velmi nízké bezpečnosti právě v těsné blízkosti ok. Určitým zpřesněním by bylo použití prutové náhrady s proměnnou tuhostí prutů, kde by byly nejtuzší pruty uprostřed ok a směrem ke krajům by se tuhost prutů parabolicky snižovala. Podobný průběh tuhosti má totiž i olejová vrstva. Dalším poměrně velkým zanedbáním reality jsou ojniční šrouby, u kterých jsou úplně přehlíženy vruby od závitů. U řešených modelů vychází nejvyšší koncentrace napětí i nejnižší únavová bezpečnost v zaoblení těsně pod hlavou šroubu. V reálných závitových spojích se však šroub nejčastěji utrhne v oblasti prvního zašroubovaného závitu, kde působí vysoké tahové napětí právě v kombinaci s výrazným vrubem.

Bylo zajímavé porovnávat jednotlivé varianty odlehčení ojnice mezi sebou z hlediska pevnostní analýzy. Ověřil jsem si, že na celkovou tuhost ojnice má největší vliv tvar a tloušťka dříku. Stačilo pouze drobné ztenčení dříku a výsledné deformace a napětí vycházely značně vyšší. Z tohoto zjištění jsem pochopil výhody dříku ojnice tvaru H, který má z důvodu dvou žeber nasměrovaných do kývavého pohybu ojnice mnohem vyšší tuhost oproti dříku ve tvaru I.

Dalším přínosem bylo ověření faktu, že na nebezpečnost únavového namáhání má velký vliv jak velikost středního napětí, tak amplituda napětí. Z průběhů grafů redukovaného napětí v uzlech dříku ojnice je zřejmé, že velikost amplitudy napětí je poměrně vysoká, za to střední napětí je relativně malé. To také potvrdila únavová kontrola v programu FemFat, při které vycházely bezpečnosti v dříku poměrně vysoké. Naproti tomu v zaoblení pod hlavou šroubu je obrovské střední napětí, ale amplituda je zanedbatelná. To také potvrdila únavová analýza v programu FemFat, při které vyšly nejnižší bezpečnosti pod hlavou šroubu kolem hodnoty 1,2.

Úprava ojnice sice nepřinesla 100 [%] vyvážení motoru, ale vyváženost motoru výrazně vzrostla. Pro 100 [%] vyvážení bych doporučoval provést drobné úpravy na pístu, neboť chybí snížení hmotnosti posuvných částí motoru pouze o 59 [g] a motor bude mít naprosto vyvážený chod. Dále by bylo dobré přizpůsobit tvar nálitků pro pístní čep v pístu lichoběžníkovému tvaru ojnice, což by umožnilo výrazné odlehčení namáhání pístního čepu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] ANSYS Theory Reference. Release 10, ANSYS Inc., 2005
- [2] GSCHIEDLE, Rolf, Příručka pro automechanika, Sobotáles, 2002. ISBN 80-85920-83-2
- [3] Kolektiv VÚNM a ČKD. Naftové motory čtyřdobé, 1díl. Státní nakladatelství technické literatury, n.p., Druhé vydání, Praha, 1962. L123-B3-IV-41/2490
- [4] KRATOCHVIL, C., ONDRAČEK, E. Mechanika těles - Počítače a MKP. Vysoké učení technické v Brně, 1987
- [5] NOVOTNÝ, P., PÍŠTĚK, V., Fatigue analysis [online].  
Dostupné z: <[http://www.ite.fme.vutbr.cz/opory/computational\\_models/ftg/ftg.pdf](http://www.ite.fme.vutbr.cz/opory/computational_models/ftg/ftg.pdf)>
- [6] PÍŠTĚK, V. Aplikovaná mechanika. Nakladatelství VUT v Brně, 1983
- [7] PÍŠTĚK, V., ŠTETINA, J. Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů. Nakladatelství VUT v Brně, 1991
- [8] RAUSCHER, J., Spalovací motory [online]. 2005, [cit. 2007-10-01].  
Dostupné z: <<http://www.ite.fme.vutbr.cz/opory/Spalovaci.motory.2005.pdf>>
- [9] RAUSCHER, J., Vozidlové motory [online]. Dostupné z:  
< [http://www.ite.fme.vutbr.cz/opory/vozidlove\\_motory/prednasky\\_ojnice.html](http://www.ite.fme.vutbr.cz/opory/vozidlove_motory/prednasky_ojnice.html)>
- [10] Přehled sortimentu [online]. Dostupné z: < [http://www.praktis.sk/sk/product\\_belaz\\_pa-4.html](http://www.praktis.sk/sk/product_belaz_pa-4.html)>
- [11] Motory Zetor [online]. Dostupné z: <<http://www.zetorengines.cz/main.php?nLang=1>>
- [12] Zetor Forterra [online]. Dostupné z: <<http://www.zetor.com/cz/index.php?obsah=traktory&dir=produkty>>

## Seznam použitých symbolů a zkratk

a	[m/sec <sup>2</sup> ]	zrychlení pístu
a <sub>x</sub>	[m/sec <sup>2</sup> ]	zrychlení pístu působící na ojnici ve vodorovné složce
a <sub>y</sub>	[m/sec <sup>2</sup> ]	zrychlení pístu působící na ojnici ve svislé složce
d <sub>0</sub>	[mm]	vnější průměr závitu ojnicního šroubu
d <sub>2</sub>	[mm]	průměr střední části dřívku ojnicního šroubu
i	[-]	počet válců
f <sub>h</sub>	[-]	součinitel tření pod hlavou šroubu
g	[m/sec <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
m <sub>A-n</sub>	[kg]	hmotnost posuvných částí modelu nové ojnice
m <sub>A-u</sub>	[kg]	udávaná hmotnost posuvných částí ojnice ve výkresové dokumentaci
m <sub>A-v</sub>	[kg]	hmotnost posuvných částí modelu stávající ojnice
m <sub>A-z</sub>	[kg]	změřená hmotnost posuvných částí stávající ojnice
m <sub>A-z-3</sub>	[kg]	změřená hmotnost posuvných částí stávající ojnice při 3 bodové redukci
m <sub>A-100</sub>	[kg]	hmotnost posuvných částí ojnice pro 100% vyvážený motor
m <sub>B-n</sub>	[kg]	hmotnost rotačních částí modelu nové ojnice
m <sub>B-u</sub>	[kg]	udávaná hmotnost rotačních částí ojnice ve výkresové dokumentaci
m <sub>B-v</sub>	[kg]	hmotnost rotačních částí modelu stávající ojnice
m <sub>B-z</sub>	[kg]	změřená hmotnost rotačních částí stávající ojnice
m <sub>B-z-3</sub>	[kg]	změřená hmotnost rotačních částí stávající ojnice při 3 bodové redukci
m <sub>h</sub>	[kg]	hmotnost vyvažovacího hřídele
m <sub>oj-n</sub>	[kg]	hmotnost modelu nové ojnice
m <sub>oj-u</sub>	[kg]	udávaná hmotnost ojnice ve výkresové dokumentaci
m <sub>oj-v</sub>	[kg]	hmotnost modelu stávající ojnice
m <sub>oj-z</sub>	[kg]	zvážená hmotnost stávající ojnice
m <sub>pist</sub>	[kg]	hmotnost pístní skupiny
m <sub>p-n</sub>	[kg]	hmotnost pístní skupiny s posuvnými částmi vymodelované nové ojnice
m <sub>p-v</sub>	[kg]	hmotnost pístní skupiny s posuvnými částmi vymodelované stávající ojnice
m <sub>T-z</sub>	[kg]	změřená hmotnost v těžišti stávající ojnice
n	[1/min]	jmenovité otáčky motoru
n <sub>A</sub>	[-]	počet kmitů při odkývání za horní oko
n <sub>B</sub>	[-]	počet kmitů při odkývání za dolní oko
n <sub>h</sub>	[-]	počet vyvažovacích hřídelí
n <sub>mA</sub>	[-]	počet měření při odkývání za horní oko
n <sub>mB</sub>	[-]	počet měření při odkývání za dolní oko
n <sub>p</sub>	[1/min]	maximální přeběhové otáčky motoru
n <sub>v</sub>	[1/min]	volnoběžné otáčky motoru
p <sub>atm</sub>	[Pa]	atmosférický tlak
p <sub>i</sub>	[Pa]	indikované tlaky při oběhu motoru
p <sub>z</sub>	[mm]	rozteč závitu ojnicního šroubu
r	[mm]	rameno klikového hřídele
r <sub>Th</sub>	[mm]	poloměr těžiště vyvažovacího hřídele
s	[cm]	okamžitá poloha pístu ve válci
t <sub>A</sub>	[sec]	doba kmitů při odkývání za horní oko
t <sub>B</sub>	[sec]	doba kmitů při odkývání za dolní oko
D	[mm]	vrtání válce
D <sub>D</sub>	[mm]	průměr dolního oka ojnice

$D_{DP}$	[mm]	průměr dolního oka ojnice s umístěnými pánevemi
$D_H$	[mm]	průměr horního oka ojnice
$D_{HP}$	[mm]	průměr horního oka ojnice s vsazeným pouzdem
$D_0$	[mm]	průměr díry pro ojnicí šroub ve víku ojnice
$D_1$	[mm]	vnější průměr hlavy ojnicího šroubu
$E$	[MPa]	modul pružnosti v tahu (tlaku)
$F_{cp}$	[N]	celkové síly působící na horní oko ojnice ve směru osy válce
$F_{oj}$	[N]	celkové síly působící na horní oko ojnice ve směru osy dřívku ojnice
$F_p$	[N]	síla od tlaků plynů působící na píst
$F_{sp}$	[N]	síla od setrvačných hmot pístní skupiny působící na horní oko ojnice
$F_{SII}$	[N]	setrvačné síly druhého řádu od posuvných hmotností motoru
$F_A$	[N]	síla působící ve středu horního oka ojnice při momentové rovnováze
$F_B$	[N]	síla působící ve středu dolního oka ojnice při momentové rovnováze
$F_Q$	[N]	síla vzniklá po dotažení ojnicího šroubu působící v ose šroubu
$F_T$	[N]	síla působící v těžišti ojnice při momentové rovnováze
$F_{VII}$	[N]	odstředivé síly vyvažovacího hřídele
$H_{HD}$	[mm]	šířka horního a dolního oka
$J$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti
$J_A$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti v místě uložení břítu stojanu horního oka
$J_B$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti v místě uložení břítu stojanu dolního oka
$J_T$	[kg·m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti k ose jdoucí těžištěm
$L$	[mm]	vzdálenost míst uložení břítu stojanu horního a dolního oka
$L_{oj}$	[mm]	vzdálenost středů horního a dolního oka ojnice
$L_A$	[mm]	vzdálenost těžiště ojnice od místa uložení horního oka na břítu stojanu
$L_{AT}$	[mm]	vzdálenost těžiště ojnice od středu horního oka
$L_B$	[mm]	vzdálenost těžiště ojnice od místa uložení dolního oka na břítu stojanu
$L_{BT}$	[mm]	vzdálenost těžiště ojnice od středu dolního oka
$M_k$	[Nm]	kroucí moment motoru
$M_{kp}$	[%]	převýšení kroucího momentu
$M_u$	[Nm]	utahovací moment ojnicího šroubů
$P_e$	[kW]	efektivní výkon motoru
$S_p$	[cm <sup>2</sup> ]	plocha pístu
$S_{ph}$	[mm <sup>2</sup> ]	průřez prutu horního oka
$S_{pd}$	[mm <sup>2</sup> ]	průřez prutu dolního oka
$T$	[sec]	perioda harmonického pohybu
$T_A$	[sec]	průměrná doba jednoho kmitu při odkývání za horní oko
$T_B$	[sec]	průměrná doba jednoho kmitu při odkývání za dolní oko
$T_r$	[K]	referenční teplota
$V$	[cm <sup>3</sup> ]	okamžitý objem válce při pohybu pístu
$V_k$	[cm <sup>3</sup> ]	kompresní objem válce motoru
$VM_n$	[%]	velikost vyváženosti motoru při použití nové ojnice
$VM_s$	[%]	velikost vyváženosti motoru při použití stávající ojnice
$V_z$	[cm <sup>3</sup> ]	zdvihový objem válců motoru
$Z$	[mm]	zdvih pístu
$\alpha$	[°]	úhel natočení klikového hřídele
$\alpha_y$	[1/K]	součinitel tepelné délkové roztažnosti

$\beta$	[°]	úhel odklonu osy dříku ojnice od osy válce motoru
$\varepsilon$	[-]	kompresní poměr
$\varepsilon_A$	[-]	úhlové zrychlení kyvu dříku kolem osy pístního čepu
$\phi\sigma_{yu}$	[MPa]	průměrná velikost tahových napětí v uzlech střední části dříku šroubu
$\phi_z$	[°]	úhel stoupání závitu ojnicního šroubu
$\lambda$	[-]	klikový poměr
$\mu$	[-]	součinitel příčného přetvoření
$\mu_z$	[-]	součinitel tření závitu šroubu
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota materiálu
$\tau$	[-]	taktnost motoru
$\sigma_{yv}$	[MPa]	tahové napětí v ose šroubu působící ve střední části dříku ojnicního šroubu
$\omega$	[Hz]	uhlová rychlost pro jmenovité otáčky motoru
$\omega_A$	[Hz]	uhlová rychlost kyvu dříku kolem osy pístního čepu

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1 Hodnoty zatížení zadávané do programu Ansys



**Příloha č. 1 Hodnoty zatížení zadávané do programu Ansys**

úhel natočení KH $\alpha_i$ [°]	zrychlení v ose x $\alpha_x(\alpha_i)$ [mm/s <sup>2</sup> ]	zrychlení v ose y $\alpha_y(\alpha_i)$ [mm/s <sup>2</sup> ]	síla v ose y pro neupravený model $F_{oj}(\alpha_i)$ [N]	síla v ose y pro upravený model $F_{oj}(\alpha_i)$ [N]	úhlové zrychlení kolem osy z $\varepsilon_A(\alpha_i)$ [rad/s <sup>2</sup> ]	úhlová rychlost kolem osy z $\omega_A(\alpha_i)$ [rad/s <sup>2</sup> ]
5	-98450.21	-4046498.3	632.735	870.011	-1191.473	64.067
10	-192450.9	-3966672.3	638.184	877.504	-2380.152	63.391
15	-277772.1	-3835692.4	615.486	846.294	-3562.924	62.265
20	-350611	-3656568.8	593.861	816.559	-4736.053	60.693
25	-407775.3	-3433350.6	564.208	775.786	-5894.896	58.679
30	-446832.5	-3170972	527.213	724.918	-7033.662	56.23
35	-466217.9	-2875071.3	483.575	664.916	-8145.219	53.354
40	-465294.1	-2551790.4	424.442	583.608	-9220.983	50.063
45	-444361.7	-2207568.1	360.502	495.691	-10250.902	46.374
50	-404619.3	-1848935.8	292.825	402.635	-11223.561	42.305
55	-348077.7	-1482326.6	222.838	306.403	-12126.413	37.88
60	-277434.5	-1113904.7	170.654	234.649	-12946.152	33.129
65	-195915.9	-749421.21	98.791	135.838	-13669.228	28.085
70	-107096.9	-394100.44	8.546	11.751	-14282.461	22.787
75	-14711.56	-52555.849	-60.93	-83.779	-14773.733	17.28
80	77537.315	271264.24	-126.701	-174.214	-15132.692	11.611
85	166155.89	574105.52	-188.428	-259.088	-15351.403	5.833
90	248015.85	853415.2	-245.333	-337.333	-15424.875	0
95	320481.09	1107333.4	-295.338	-406.09	-15351.403	-5.833
100	381498.64	1334672.7	-342.433	-470.845	-15132.692	-11.611
105	429650.16	1534889.8	-391.957	-538.941	-14773.733	-17.28
110	464163.5	1708051.4	-425.363	-584.874	-14282.461	-22.787
115	484885.79	1854794.6	-442.857	-608.929	-13669.228	-28.085
120	492222.55	1976282.5	-464.65	-638.894	-12946.152	-33.129
125	487049.16	2074151.6	-491.104	-675.268	-12126.413	-37.88
130	470602.49	2150450.8	-493.163	-678.099	-11223.561	-42.305
135	444361.72	2207568.1	-501.087	-688.994	-10250.902	-46.374
140	409927.62	2248146.5	-505.694	-695.33	-9220.983	-50.063
145	368909	2274987.2	-497.964	-684.7	-8145.219	-53.354
150	322824.58	2290942.8	-498.08	-684.86	-7033.662	-56.23
155	273026.39	2298803.7	-496.935	-683.286	-5894.896	-58.679
160	220649.41	2301182	-504.77	-694.059	-4736.053	-60.693
165	166589.63	2300398.8	-512.419	-704.576	-3562.924	-62.265
170	111510.45	2298380.9	-520.334	-715.459	-2380.152	-63.391
175	55874.994	2296572.7	-519.157	-713.841	-1191.473	-64.067
180	0	2.30E+06	-528.348	-726.478	0	-64.293

úhel natočení KH $\alpha_i$ [°]	zrychlení v ose x $\alpha_x(\alpha_i)$ [mm/s <sup>2</sup> ]	zrychlení v ose y $\alpha_y(\alpha_i)$ [mm/s <sup>2</sup> ]	síla v ose y pro neupravený model $F_{oj}(\alpha_i)$ [N]	síla v ose y pro upravený model $F_{oj}(\alpha_i)$ [N]	úhlové zrychlení kolem osy z $\varepsilon_A(\alpha_i)$ [rad/s <sup>2</sup> ]	úhlová rychlost kolem osy z $\omega_A(\alpha_i)$ [rad/s <sup>2</sup> ]
185	-55874.99	2296572.7	-528.764	-727.05	1191.473	-64.067
190	-111510.4	2298380.9	-549.179	-755.121	2380.152	-63.391
195	-166589.6	2300398.8	-550.974	-757.589	3562.924	-62.265
200	-220649.4	2301182	-553.056	-760.452	4736.053	-60.693
205	-273026.4	2298803.7	-545.338	-749.84	5894.896	-58.679
210	-322824.6	2290942.8	-546.62	-751.602	7033.662	-56.23
215	-368909	2274987.2	-556.386	-765.031	8145.219	-53.354
220	-409927.6	2248146.5	-554.552	-762.509	9220.983	-50.063
225	-444361.7	2207568.1	-559.912	-769.88	10250.902	-46.374
230	-470602.5	2150450.8	-562.027	-772.788	11223.561	-42.305
235	-487049.2	2074151.6	-550.334	-756.709	12126.413	-37.88
240	-492222.6	1976282.5	-553.772	-761.437	12946.152	-33.129
245	-484885.8	1854794.6	-542.17	-745.484	13669.228	-28.085
250	-464163.5	1708051.4	-534.875	-735.453	14282.461	-22.787
255	-429650.2	1534889.8	-521.645	-717.261	14773.733	-17.28
260	-381498.6	1334672.7	-512.364	-704.501	15132.692	-11.611
265	-320481.1	1107333.4	-486.897	-669.484	15351.403	-5.833
270	-248015.8	853415.2	-470.486	-646.918	15424.875	0
275	-166155.9	574105.52	-458.498	-630.435	15351.403	5.833
280	-77537.32	271264.24	-456.526	-627.723	15132.692	11.611
285	14711.563	-52555.849	-443.433	-609.72	14773.733	17.28
290	107096.92	-394100.44	-440.169	-605.233	14282.461	22.787
295	195915.87	-749421.21	-444.152	-610.709	13669.228	28.085
300	277434.53	-1113904.7	-466.436	-641.35	12946.152	33.129
305	348077.7	-1482326.6	-507.904	-698.367	12126.413	37.88
310	404619.25	-1848935.8	-598.774	-823.314	11223.561	42.305
315	444361.72	-2207568.1	-732.712	-1007.479	10250.902	46.374
320	465294.13	-2551790.4	-953.005	-1310.382	9220.983	50.063
325	466217.87	-2875071.3	-1224.963	-1684.324	8145.219	53.354
330	446832.5	-3170972	-1656.146	-2277.201	7033.662	56.23
335	407775.27	-3433350.6	-2229.916	-3066.134	5894.896	58.679
340	350611.01	-3656568.8	-3016.349	-4147.479	4736.053	60.693
345	277772.09	-3835692.4	-3961.027	-5446.413	3562.924	62.265
350	192450.87	-3966672.3	-5079.495	-6984.306	2380.152	63.391
355	98450.213	-4046498.3	-6159.936	-8469.912	1191.473	64.067
360	0	-4.07E+06	-6915.827	-9509.262	0	64.293
365	-98450.21	-4046498.3	-7047.092	-9689.751	-1191.473	64.067
370	-192450.9	-3966672.3	-7029.014	-9664.894	-2380.152	63.391

úhel natočení KH $\alpha_i$ [°]	zrychlení v ose x $\alpha_x(\alpha_i)$ [mm/s <sup>2</sup> ]	zrychlení v ose y $\alpha_y(\alpha_i)$ [mm/s <sup>2</sup> ]	síla v ose y pro neupravený model $F_{oj}(\alpha_i)$ [N]	síla v ose y pro upravený model $F_{oj}(\alpha_i)$ [N]	úhlové zrychlení kolem osy z $\varepsilon_A(\alpha_i)$ [rad/s <sup>2</sup> ]	úhlová rychlost kolem osy z $\omega_A(\alpha_i)$ [rad/s <sup>2</sup> ]
375	-277772.1	-3835692.4	-7034.346	-9672.225	-3562.924	62.265
380	-350611	-3656568.8	-6877.398	-9456.422	-4736.053	60.693
385	-407775.3	-3433350.6	-6313.195	-8680.643	-5894.896	58.679
390	-446832.5	-3170972	-5479.705	-7534.594	-7033.662	56.23
395	-466217.9	-2875071.3	-4617.382	-6348.9	-8145.219	53.354
400	-465294.1	-2551790.4	-3804.784	-5231.577	-9220.983	50.063
405	-444361.7	-2207568.1	-3182.782	-4376.325	-10250.902	46.374
410	-404619.3	-1848935.8	-2667.831	-3668.267	-11223.561	42.305
415	-348077.7	-1482326.6	-2244.845	-3086.663	-12126.413	37.88
420	-277434.5	-1113904.7	-1918.973	-2638.588	-12946.152	33.129
425	-195915.9	-749421.21	-1695.716	-2331.61	-13669.228	28.085
430	-107096.9	-394100.44	-1505.596	-2070.195	-14282.461	22.787
435	-14711.56	-52555.849	-1361.311	-1871.803	-14773.733	17.28
440	77537.315	271264.24	-1278.796	-1758.344	-15132.692	11.611
445	166155.89	574105.52	-1198.414	-1647.82	-15351.403	5.833
450	248015.85	853415.2	-1135.96	-1561.945	-15424.875	0
455	320481.09	1107333.4	-1117.494	-1536.554	-15351.403	-5.833
460	381498.64	1334672.7	-1082.022	-1487.78	-15132.692	-11.611
465	429650.16	1534889.8	-1047.205	-1439.907	-14773.733	-17.28
470	464163.5	1708051.4	-1012.893	-1392.729	-14282.461	-22.787
475	484885.79	1854794.6	-982.484	-1350.915	-13669.228	-28.085
480	492222.55	1976282.5	-966.392	-1328.788	-12946.152	-33.129
485	487049.16	2074151.6	-945.17	-1299.609	-12126.413	-37.88
490	470602.49	2150450.8	-935.844	-1286.785	-11223.561	-42.305
495	444361.72	2207568.1	-912.738	-1255.015	-10250.902	-46.374
500	409927.62	2248146.5	-896.381	-1232.524	-9220.983	-50.063
505	368909	2274987.2	-877.605	-1206.707	-8145.219	-53.354
510	322824.58	2290942.8	-866.83	-1191.891	-7033.662	-56.23
515	273026.39	2298803.7	-854.973	-1175.588	-5894.896	-58.679
520	220649.41	2301182	-832.997	-1145.371	-4736.053	-60.693
525	166589.63	2300398.8	-811.109	-1115.274	-3562.924	-62.265
530	111510.45	2298380.9	-799.324	-1099.071	-2380.152	-63.391
535	55874.994	2296572.7	-778.611	-1070.59	-1191.473	-64.067
540	0	2.30E+06	-768.518	-1056.712	0	-64.293
545	-55874.99	2296572.7	-749.791	-1030.963	1191.473	-64.067
550	-111510.4	2298380.9	-731.941	-1006.419	2380.152	-63.391
555	-166589.6	2300398.8	-695.484	-956.291	3562.924	-62.265
560	-220649.4	2301182	-673.731	-926.38	4736.053	-60.693

úhel natočení KH $\alpha_i$ [°]	zrychlení v ose x $\alpha_x(\alpha_i)$ [mm/s <sup>2</sup> ]	zrychlení v ose y $\alpha_y(\alpha_i)$ [mm/s <sup>2</sup> ]	síla v ose y pro neupravený model $F_{oj}(\alpha_i)$ [N]	síla v ose y pro upravený model $F_{oj}(\alpha_i)$ [N]	úhlové zrychlení kolem osy z $\varepsilon_A(\alpha_i)$ [rad/s <sup>2</sup> ]	úhlová rychlost kolem osy z $\omega_A(\alpha_i)$ [rad/s <sup>2</sup> ]
565	-273026.4	2298803.7	-651.721	-896.116	5894.896	-58.679
570	-322824.6	2290942.8	-626.632	-861.619	7033.662	-56.23
575	-368909	2274987.2	-609.896	-838.607	8145.219	-53.354
580	-409927.6	2248146.5	-593.6	-816.2	9220.983	-50.063
585	-444361.7	2207568.1	-569.709	-783.349	10250.902	-46.374
590	-470602.5	2150450.8	-548.92	-754.765	11223.561	-42.305
595	-487049.2	2074151.6	-530.604	-729.581	12126.413	-37.88
600	-492222.6	1976282.5	-514.184	-707.003	12946.152	-33.129
605	-484885.8	1854794.6	-492.538	-677.24	13669.228	-28.085
610	-464163.5	1708051.4	-465.211	-639.666	14282.461	-22.787
615	-429650.2	1534889.8	-431.889	-593.848	14773.733	-17.28
620	-381498.6	1334672.7	-392.423	-539.582	15132.692	-11.611
625	-320481.1	1107333.4	-346.847	-476.914	15351.403	-5.833
630	-248015.8	853415.2	-295.387	-406.157	15424.875	0
635	-166155.9	574105.52	-238.466	-327.89	15351.403	5.833
640	-77537.32	271264.24	-176.691	-242.95	15132.692	11.611
645	14711.563	-52555.849	-100.87	-138.696	14773.733	17.28
650	107096.92	-394100.44	-31.896	-43.857	14282.461	22.787
655	195915.87	-749421.21	39.176	53.867	13669.228	28.085
660	277434.53	-1113904.7	111.215	152.921	12946.152	33.129
665	348077.7	-1482326.6	192.905	265.245	12126.413	37.88
670	404619.25	-1848935.8	263.284	362.016	11223.561	42.305
675	444361.72	-2207568.1	340.862	468.685	10250.902	46.374
680	465294.13	-2551790.4	414.672	570.174	9220.983	50.063
685	466217.87	-2875071.3	468.954	644.811	8145.219	53.354
690	446832.5	-3170972	507.776	698.192	7033.662	56.23
695	407775.27	-3433350.6	554.537	762.488	5894.896	58.679
700	350611.01	-3656568.8	593.861	816.559	4736.053	60.693
705	277772.09	-3835692.4	625.115	859.533	3562.924	62.265
710	192450.87	-3966672.3	638.184	877.504	2380.152	63.391
715	98450.213	-4046498.3	651.948	896.429	1191.473	64.067
720	0	-4.07E+06	656.56	902.77	0	64.293