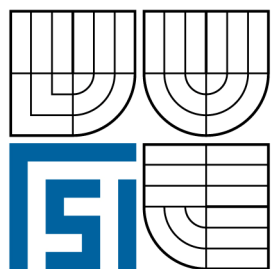


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH JEDNOVÁLCOVÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

DESIGN OF SINGLE CYLINDER 4-STROKE SI ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR ČÍŽ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID SVÍDA

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem konstrukce experimentálního jednoválcového zážehového motoru určeného pro výzkumné účely. Cílem práce je návrh konstrukce klikové skříňe. Práce obsahuje rešerši konstrukci zážehových motorů. Na základě rešerše byly stanoveny základní rozměry experimentálního motoru a 3-D konstrukční návrh. Byla provedena výpočtová analýza navržené klikové skříňe v programech ADAMS (MBS) a ANSYS (MKP). Návrh je zaměřen na univerzálnost a jednoduchost konstrukce.

Klíčová slova

jednoválcový zážehový motor, kliková skříň, konstrukce, MBS, MKP ,program

Annotation

Thesis deals with design of the experimental single-cylinder spark ignition engines for research purposes. The main purpose of this work is the design crankcase. Summary of possible constructions of spark ignition engines is included. Basic dimensions and 3-D design of the experimental engine resulted from the summary. The numerical analysis of proposed crankcase in ADAMS (MBS) and ANSYS (FEM) software environment is also part of the work. Generally, the proposed solution of the experimental engine was focused on the universality and simplicity of the design.

Key words

single-cylinder spark ignition engines, Crankcase, design, MBS, FEM, software

Bibliografická citace

ČÍŽ, P. *Návrh jednoválcového zážehového motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana Ing. Davida Svídy a s použitím uvedené literatury.

V Brně dne :

.....

Poděkování

Za pomoc, cenné připomínky a rady při zpracování diplomové práce tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu **Ing. Davidu Svídovi**.

Zvláště bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a trpělivost během celé doby mého studia.

1 Úvod	8
2 Jednotlivé části spalovacího motoru.....	9
2.1. Kliková skříň, blok válců a blok motoru	9
2.2. Kliková skříň a blok motoru u osobních a nákladních automobilů.....	10
2.2.1. Materiály bloků motorů	14
2.2.1.1. Monolitické bloky	14
2.2.1.2. Kvazi-monolitické bloky	14
2.2.1.3. Heterogenní bloky	14
2.3. Porovnání hliníkových a litinových bloků motoru	15
2.4. Válec.....	16
2.4.1. Vzduchem chlazené válce.	16
2.4.2. Válce kapalinou chlazených motorů.....	17
2.5. Rozdělení vložek válců.....	18
2.5.1. Mokré vložky válců.....	18
2.5.2. Suché vložky válců.....	18
2.5.3. Jednotlivé metody vyrábění pracovních ploch válců ze slitin hliníku.....	19
2.5.3.1. Metoda ALFIN	19
2.5.3.2. Metoda ALUSIL.....	19
2.5.3.3. Metoda NIKASIL	19
2.5.3.4. Metoda LOKASIL	19
2.6. Provedení typů bloku, na kterou dosedá hlava válce.....	20
2.6.1. Uzavřené provedení “closed – deck”	20
2.6.2. Otevřené provedení “open – deck”	20
3. Stanovení hlavních rozměrů motoru a 3-D návrh.	21
3.1. Základní parametry použitého klikového hřídele.....	21
3.2. 3-D Návrh klikové hřídele.....	22
3.3. 3-D Návrh klikové skříně	23
3.4. 3-D Návrh válce a vložky.....	26
3.4.1. Konečná podoba válce.....	28
3.4.2. Konstrukce vložky válce.	29
3.5. Sestava celé klikové skříně.....	30
3.6. Návrh sestavy motoru.....	32
4. MKP model.	34
4.1. Vytvoření MPK modelu klikové hřídele v programu ANSYS.....	36
4.1.1. Definování konečno - prvkových elementů.	36
4.1.2. Nastavení materiálových vlastností.....	37
4.2. Modální analýza.	39
4.2.1. Provedení Modální Analýzi.....	40
5. Tvorba výpočtového modelu v programu ANSYS.	43
5.1. Nastavení základních rozměrů.....	44
5.2. Výpočet dynamických účinků v motoru.....	49
5.2.1. Síla od tlaků plynu při 3000 ot/min	49
5.2.2. Síly působící na klikovou skříň experimentálního motoru v ložisku I.....	50
5.2.3. Síly působící na klikovou skříň experimentálního motoru v ložisku II.	51
6. Kliková skříň.	52
6.1. Vytvoření MPK modelu klikové skříně v programu ANSYS.....	55
6.1.2. Nastavení materiálových vlastností.....	55
6.1.3. Sestavení sítě elementu.....	57
6.1.4. Modální analýza v programu ANSYS.....	58

6.1.5. Vytvoření prutových náhrad.....	60
6.1.6. Nahrazení klikového hřídele v bloku motoru.....	62
6.1.6.1. Výpočet vlastností prutu nahrazujícího klikový hřídel.....	63
6.1.7. Nahrazení pístu v bloku motoru	65
6.1.7.1. Výpočet vlastností prutu nahrazujícího píst.	65
6.2. Uchycení bloku motoru.	68
6.2.1. Podrobné znázornění rozmístění působících sil.	70
6.3. Napětí na bloku motoru.	71
6.4. Podmínka plasticity HMM.....	71
6.4.1. Detailní znázornění napětí v místech upevnění šroubu v bloku motoru.	74
6.4.2. Detailní znázornění napětí v místech ložisek bloku motoru.....	75
6.4.3. Detailní znázornění napětí v místech upevnění vložky válce v bloku motoru.....	75
6.5. Deformace bloku motoru.....	77
7. Alternativní konstrukce.	79
8. Závěr.....	82
9. Použité zdroje:	84

1 Úvod

Cílem mé diplomové práce je návrh jednoválcového experimentálního zážehového motoru. Pro lepší představivost jsem se rozhodl nejprve pro krátké seznámení se základním rozdělením jednotlivých konstrukcí spalovacích motorů. Po důkladném seznámení s danou problematikou provedu návrh experimentálního motoru. Ve svém návrhu musím přihlídnout na co nejjednodušší konstrukci, univerzálnost a především funkčnost.



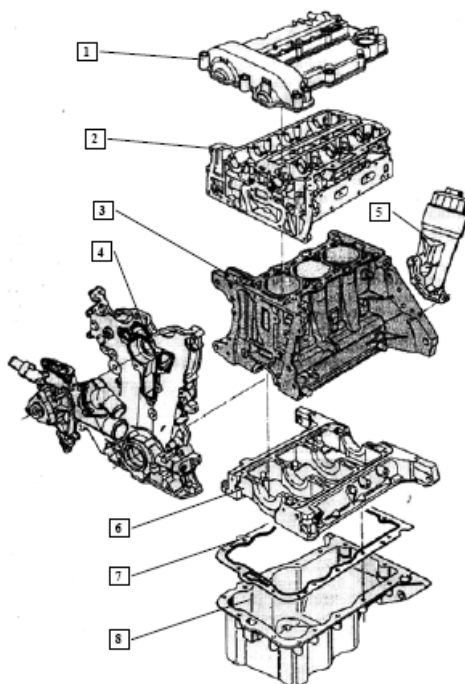
Obr.1 Pohled na konstrukci současného spalovacího motoru. [5.]

2 Jednotlivé části spalovacího motoru.

2.1. Kliková skříň, blok válců a blok motoru

Kliková skříň pístového spalovacího motoru slouží k uložení klikového hřídele. Motorový blok je tvořen dvěma komponenty. Je to kliková skříň a blok válců. V počátcích výroby motoru bylo obtížné dokonale odlít tak složitý výrobek, a proto byla samostatně odlévána kliková skříň motoru a k ní pak byly přišroubovány jednotlivé válce. Později byly válce odlévány ve dvojici a nebo u čtyřválcových motorů jako jeden celek, blok válců. Toto řešení se samotnou klikovou skříní a k ní přišroubovanými válci se doposud používá u motorů chlazených vzduchem, u velkých motorů lodních, ale také u experimentálních motorů, kde je tato dělená konstrukce důležitá vzhledem k prováděným experimentům. V současné době se nejvíce používá společný odlitek klikové skříně a válců, tzv. motorový blok.[1]

Kliková skříň spolu s válci motoru, případně blok motoru s hlavou válců, vytváří základní nosný systém, sloužící k vyrovnávání vnitřních sil a momentů vycházejících z procesu spalování a určených konstrukcí klikového mechanismu. Zachycuje také vnější silové účinky působící za provozu motoru. Nemusí to být jen reakční moment, ale například u monoblokové konstrukce traktoru i síly působící na přední nápravu traktoru, nebo u motorů motocyklových může být součástí nosného rámu. Dalším úkolem bloku motoru je vytvoření potřebných vazeb a propojení systému mazání a chlazení motoru, uložení náhonů rozvodových mechanismů a pomocných agregátů motoru. Základní požadavek na konstrukci klikové skříně a blok motoru vychází z tuhosti uložení klikového mechanismu a co největšího utlumení vnitřního hluku a vibrací motoru.



Obr.2 Blok motoru a hlavní připojené díly.[1]

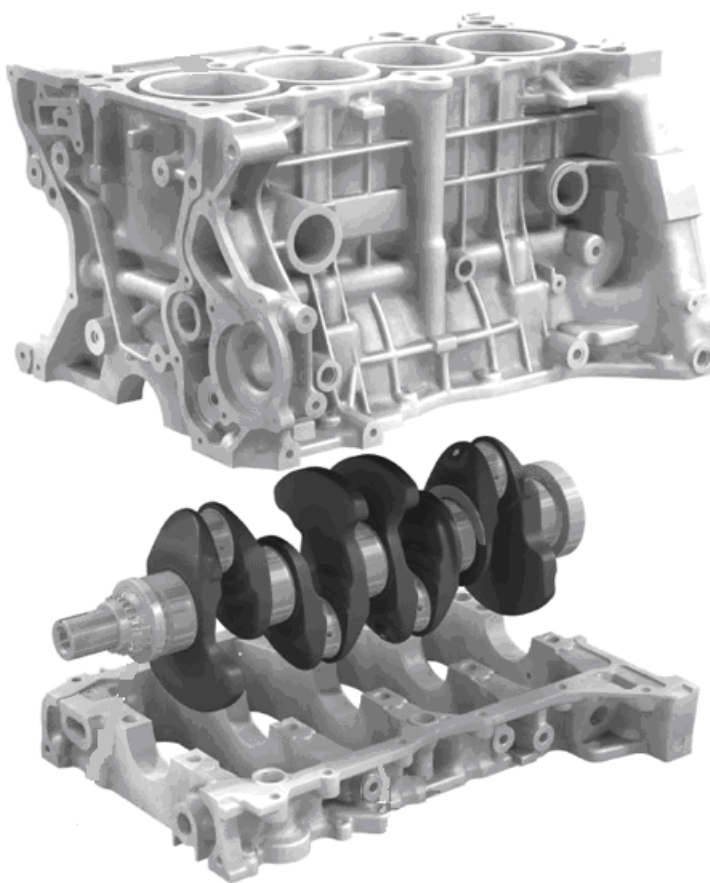
2.2. Kliková skříň a blok motoru u osobních a nákladních automobilů.

Samotná kliková skříň s připojenými válci se v současné době vyskytuje pouze u automobilních motorů chlazených vzduchem (TATRA, DEUTZ).

Blok motoru vozidlových spalovacích motorů chlazených kapalinou je hlavním nosným prvkem, k němuž jsou připevněny ostatní části motoru, obrázek 2. K bloku motoru 3. je nahoře připojena hlava válců 2. na ní horní víko vačkového hřídele a ventilů 1. Z přední strany má motor přední víko 4. (který kryje náhon rozvodů, a ze zadní strany má sdružený chladič a filtr mazacího oleje). Na spodní straně motorového bloku je přišroubován spodní díl klikové skříně s víky hlavních ložisek klikového hřídele 6. a přes těsnění 7. je připojeno spodní víko motoru 8.

Obrázek 2. ukazuje strukturu bloku motorů, které se z důvodu snížení hlučnosti stále více používají u nových konstrukcí jako alternativy ke standardní konstrukci.

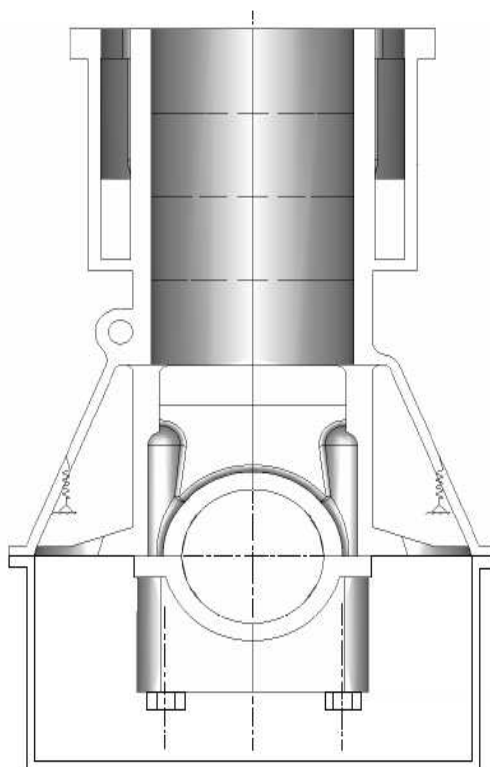
Na obrázku 3. je znázorněna konstrukce novodobého bloku motoru.



Obr.3 Konstrukce novodobého bloku motoru.[5]

Horní polovina uložení klikového hřídele v bloku motoru vytváří ložiskový stojan, do kterého je pomocí ložiskových vík upevněn klikový hřídel. Nezávisle na konstrukčním provedení bloku motoru v oblasti uložení klikového hřídele (víka hlavních ložisek) jsou stojany hlavních ložisek stále integrovány do odlitků bloku motoru nebo do odlitků horní části bloku motoru (obrázek 3). Počet kozlíků hlavního ložiska bloku motoru záleží na druhu motoru a zejména na počtu válců a uspořádání válců. V dnešní době mají bloky motoru kvůli snížení vibrací téměř výhradně úplné uložení klikového hřídele. Například řadový čtyřválcový motor má 5 hlavních ložisek, řadový šestiválec a šestiválcový boxer mají sedm hlavních ložisek a motory do V, například V6 a V8, mají čtyři nebo pět hlavních ložisek.

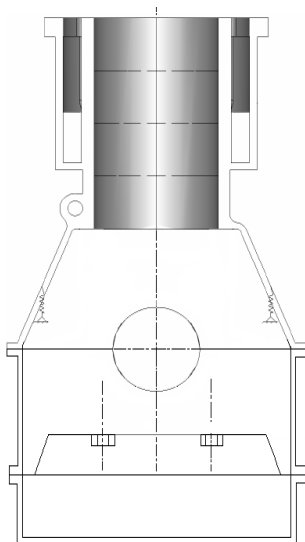
Z hlediska životnosti motoru i jeho provozních vlastností, tj. hluku a vibrací motoru, je velmi důležité dostatečně tuhé uložení klikového hřídele. Řešení, kdy dělicí rovina ložiska prochází současně i přírubou pro upevnění spodního víka motoru, znázorňuje obrázek 4. Toto provedení je výhodné z hlediska snadné výroby odlitku i opracování dosedacích ploch ložiskových vík, ale ložiskový tunel má malou tuhost. Tato konstrukce se používá i dnes. Zvýšení tuhosti je možné prodloužením bočních stěn klikové skříňe pod úroveň ložisek a propojení ložisek s touto stěnou výstužnými žebry.(což je i náš případ při návrhu konstrukce klikové skříňe). Použitím nosného spodního víka motoru se vytváří tuhá uzavřená skříňová konstrukce.[3]



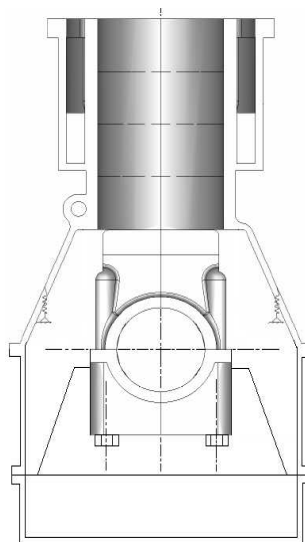
Obr.4 Konstrukce klikové skříňe s dělicí rovinou mezi klikovou skříňe a spodním víkem motoru.

U koncepce s přírubou spodního víka motoru pod středem otáčení klikového hřídele se rozlišují dvě provedení bloku motoru:

- konstrukce s horní a dolní částí klikové skříně (obrázek 5).
- kliková skříň s dolů prodlouženými bočními stěnami (obrázek 6).

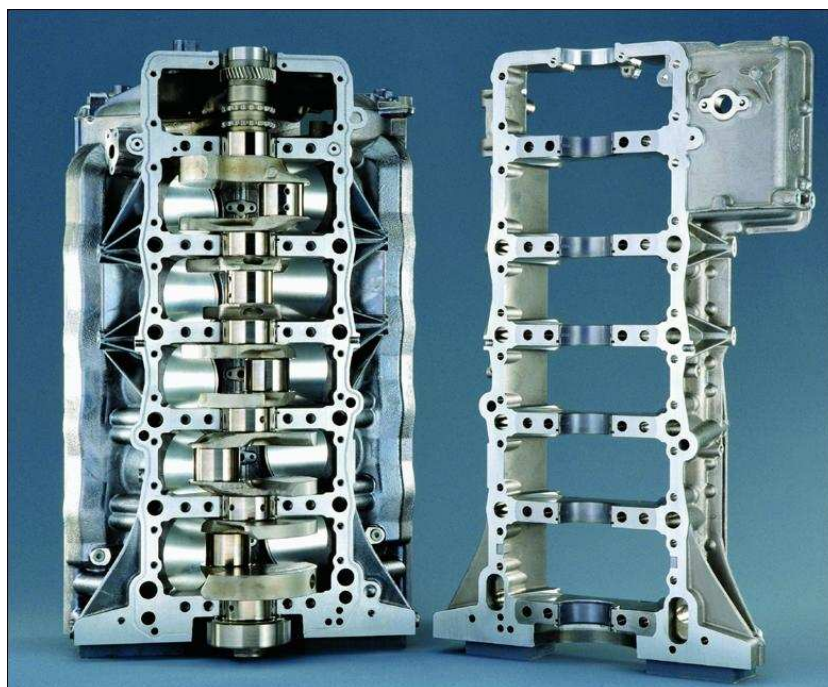


Obr. 5 Příruba spalovacího víka motoru pod středem klikové hřídele – konstrukce s horní a dolní částí klikové skříně.



Obr. 6 Příruba spodního víka motoru pod středem klikové hřídele – kliková skříň s dolů protaženými bočními stěnami.

Jisté problémy s tuhostí uložení klikové hřídele vykazují bloky z hliníkových slitin. Nejjednodušším způsobem zvýšení tuhosti uložení klikové hřídele je použití ložiskových vík odlitých z šedé litiny. Vedle zvýšení tuhosti přináší použití litinových vík i zmenšení ložiskové vůle vyvolené tepelnou roztažností. Ke zvýšení tuhosti se používá dělená kliková skříň (obrázek 3 a 7), kde ve spodní části jsou jako celek odlitá ložisková víka. Nevýhodou tohoto řešení je nutnost těsnit další dělící rovinu bloku motoru.



Obr..7 Blok motoru a ložiskové víko.[7]

Speciální konstrukce víček hlavních ložisek klikového hřídele.



Obr. 8 Blok motoru automobilu Chevrolet Corvette ZR1.[7]

2.2.1. Materiály bloků motorů

Bloky, u nichž jsou současně odlévány i válce, mohou být vyráběny z šedé litiny i hliníkových slitin. U bloku z šedé litiny je možno pracovní plochu válce zhotovit přímo z odlévaného materiálu. Bloky z hliníkových slitin mohou být odlévány podle provedení válce motoru. Základní provedení jsou charakterizována jako monolitické, kvazi-monolitické a heterogenní.

2.2.1.1. Monolitické bloky

Jsou vyráběny nízkotlakým litím z nadeutektické slitiny AlSi. Pro tuto slitinu jsou charakteristické jemně rozptýlené krystalky křemíku v objemu odlitku.

2.2.1.2. Kvazi-monolitické bloky

Jsou vyráběny infiltrací hliníku pod pomalu vzrůstajícím tlakem do keramických částecek nebo vláken tvořících pórovitou kostru vloženou do kokily. Tím se získá pooperační potřebná struktura pracovního povrchu válce a současně dochází i ke zvýšení pevnosti.

2.2.1.3. Heterogenní bloky

Jsou tvořeny odlitím z hliníkové slitiny se zalitými nebo zalisovanými vložkami válců. Vložky mohou být vyrobeny z litiny, oceli nebo z vhodně upravených hliníkových slitin. Vyrábějí se spékáním, kdy nekovové částice a kovový prášek z hliníkové slitiny je za studena slisován do tvaru vloženého válce a v ochranné atmosféře slinován do tvaru vloženého válce.

2.3. Porovnání hliníkových a litinových bloků motoru

Výhodami hliníkových bloků motoru v porovnání s bloky ze šedé litiny je nižší hmotnost, vysoká zatížitelnost daná dobrou tepelnou vodivostí materiálu a tribologický příznivý povrch válce, snižující emisi v důsledku poklesu spotřeby paliva a mazacího oleje.



Obr.9 Hliníkový blok motoru.[7]



Obr.10 Blok motoru s šedé litiny.[7]

2.4. Válec.

Válec pístových spalovacích motorů plní následující úkoly:

- stěny válce ohraničují pracovní (spalovací) prostor.
- zabezpečují vedení pístu a zachycují síly vázané na kinematiku klikového mechanismu.
- tvoří kluznou a těsnicí plochu pro pohyb pístu, přičemž povrch pracovní plochy válce musí zajistit vytvoření a udržení olejového filmu ve všech režimech práce motoru.
- zabezpečuje odvod tepla z pístu a chlazení pracovního prostoru.
- u dvoudobých motorů jsou v nich umístěna rozvodná okna.

Namáhání.

- vysoké spalovací tlaky a teploty.
- vysoká teplotní napětí způsobená rychlými změnami teploty.
- opotřebení styčných ploch válců třením pístu s kroužky a zbytky po spalování.
- neodpařené palivo smývá při studeném startu mazací film ze stěny válce.

Síly od tlaků plynů, dynamické účinky rozvodového mechanismu a změna tepelného toku jsou časově proměnné a vyvolávají tak únavové namáhání materiálu.

Požadavky na vlastnosti materiálu:

- vysoká pevnost a tvarová stálost.
- dobré vedení tepla, malá tepelná roztažnost.
- vysoká odolnost styčné plochy válců proti opotřebení a dobré kluzné vlastnosti.

2.4.1. Vzduchem chlazené válce.

Jsou opatřeny chladicími žebry, které zvětšují plochu pláště, a zlepšují tak chlazení. Jako jednotlivé žebrované válce se spojují s klikovou skříní šrouby, svorníky nebo přímo závitovým spojem. Válce vzduchem chlazených dvoudobých i čtyřdobých motorů jsou tedy samostatné a jsou jednotlivě připevněny ke klikové skříní motoru.[3]



Obr. 11 Vzduchem chlazený motor nákladního automobilu Tatra.[2]

Vzduchem chlazené čtyřdobé motory se používají u některých nákladních automobilů (TATRA, DEUTZ), dříve i u motorů pro osobní automobily.[3] Pro zajištění společného chlazení se používá nucený oběh vzduchu. Ventilátor zabezpečuje vysokou rychlost průtoku vzduchu chladícími žebry i při nízkých rychlostech jízdy. Proto jsou žebra motorů podstatně nižší než u motoru s náporovým chlazením a rozteč mezi žebry může být menší. Válce jsou ke klikové skříni nejčastěji připevněny pomocí dlouhých svorníků, podobně jako u motocyklových motorů (svorníky procházejí výřezy v chladících žebrech válce). Pro snížení celkové délky motoru bývají u víceválcových motorů žebra mezi válci kratší.

2.4.2. Válce kapalinou chlazených motorů.

Jsou většinou spojeny do bloků. V bloku válců s dvojitými stěnami jsou chladicí prostory a kanály. Chladicí kapalina je přiváděna do dolní části bloku čerpadlem, chladí válce a proudí průtokovými kanály do hlavy válců. Většinou jsou bloky válců a horní část klikové skříně společně odlité jako jeden celek. Tato velmi pevná konstrukce se nazývá blok motoru. V počátcích výroby motorů byl tento blok přišroubován ke klikové skříni, později pak byl s klikovou skříní odlit jako jeden celek, blok motoru.

Válce kapalinou chlazeného motoru jsou tedy tvořeny společným odlitkem s klikovou skříní a vytváří blok motoru. Pracovní plocha válce, tj. plocha, která je ve styku s pístními kroužky a pístem, je obrobena přímo v materiálu bloku motoru, nebo je vytvořena pomocí pouzder vkládaných do vývrtu v bloku motoru. Tyto tzv. vložené válce se zhotovují z materiálů, které mají lepší třecí vlastnosti a odolnost proti opotřebení než základní materiál bloku motoru.

Vkládané válce byly dříve používány u všech typů motorů. S rozvojem technologie monolitických a kvazi-monolitických bloků zabezpečujících dostatečně vysokou životnost pracovního povrchu válce se u motorů osobních automobilů od konstrukce s vloženými válci postupně ustoupilo. Výhodou tohoto řešení je nižší hmotnost i rozměry bloku motoru. V případě zadření pístu ve válci motoru je však nutno demontovat motor z vozidla a opravu pracovní plochy válce musí provádět specializované pracoviště.

Tato skutečnost je vedle ceny rozměrného bloku důvodem, proč u motoru nákladních automobilů a jiných velkých motorů jsou nadále používány vložené válce. V případě zadření pístu ve válci je možno po sundání hlavy válců jednoduše nahradit poškozenou pístní skupinu a válec motoru, aniž by bylo nutno motor demontovat z vozidla.

Blok motoru nemusí mít žádnou vložku válce, nebo podle toho, je-li vnější povrch vloženého válce v kontaktu s chladicí kapalinou, se rozlišují vložené válce mokré a suché. Větší a nákladnější bloky válců z litiny jsou stejně jako většina bloků z lehkých slitin opatřeny speciálním vložkami, které jsou zasazeny do bloku. Vložky válců vyrobené z vysoce kvalitní jemnozrnné litiny (odstředivé lití) se vkládají do litinových bloků válců nebo bloků válců ze slitin hliníku. Protože jsou odolnější proti opotřebení než styčné plochy válců z běžné šedé litiny, mají vysokou životnost. Rozlišují se tzv. mokré a suché vložky válců.

2.5. Rozdělení vložek válců

2.5.1. Mokrý vložky válců.

Jsou v přímém styku s chladicí kapalinou, čímž se dosahuje účinného chlazení, vložky mají relativně silné stěny. Lze je vyměňovat jednotlivě, je potřebná pouze jedna velikost pístu. Vložky mají na horním konci nákrůžek. Musí být vůči klikové skříni pečlivě utěsněny těsníci kroužky, jinak by se do klikové skříně dostala chladicí kapalina.

Při opravách motoru s mokkými vložkami válců se používají náhradní vložky připravené k zamontování, jež se po zabudování už nemusí upravovat. Při montáži je třeba dávat pozor na těsnění. Na straně nákrůžku, přiléhajícího k hlavě válců, dochází k těsnění vůči chladicí kapalině pomocí kovového těsnění nebo přímým kontaktem mezi vložkou a hlavou válce. Spodní část vložky s horní dosedací plochou je utěsněna pryžovými kroužky zasazenými v drážkách vložky. U mokkých vložek s nákrůžkem na spodní straně se pro utěsnění chladicího prostoru vůči klikové skříni většinou používají měděné kroužky.

Čelo mokré vložky přechází nad dosedací plochou bloku motoru o určitý přesah. Tento požadavek vyplývá z potřeby upevnit vložku v bloku motoru. Současně je zajištěno i těsnění vloženým mezi hlavou válců a blok motoru.

2.5.2. Suché vložky válců

Nepřicházejí do styku s chladicí kapalinou, což má za následek o něco horší odvádění tepla. Suché vložky válců jsou tenkostěnné a vkládají se do bloků válců buď s posuvným nebo pevným uložením. Pracovní plocha vložek s posuvným uložením se před montáží obrábí načisto. Pracovní plocha vložek s pevným uložením se teprve po nalisování do bloku válců přesně obrábí vyvrtáním a honováním, stejně jako u bloku válců bez vložek. Suchý vložený válec je zhotoven buď z ocelového plechu, nebo jako tenkostěnný litinový odlitek. Tloušťka stěny bývá 2 až 4 mm.

Při opravách motoru, pokud jsou stěny válce na další vyvrtávání příliš slabé, nebo pokud není pro větší průměr k dispozici píst odpovídající velikostí, mohou se místo toho hydraulicky zalisovat suché vložky válců. U bloků z lehkých slitin se vložky musejí podchladiť, nebo naopak se blok zahřeje na asi 150° C. U motorů, které jsou výrobcem vybaveny suchými vložkami válců, jsou opotřebované vložky vyměnitelné. Nejprve musejí být staré vložky vytlačeny z otvoru válce.

Zabudování suchých vložek probíhá stejným způsobem jako u motorů s vrtanými válci. Suché vložky válců mohou být buď s nákrůžkem, nebo bez něj. Všeobecně se doporučují vložky bez nákrůžku. Pokud výrobce upřednostňuje pevné usazení vložky, použije vložku s nákrůžkem. Po zabudování musejí být vložky přesně frézovány a honovány a jejich horní strana je broušena na úroveň těsnicí plochy bloku motoru. To je značně nevýhodné, protože v případě poruchy je nutno motor vymontovat z vozidla, provést jeho demontáž a zajistit specializované pracoviště, které provede honování pracovní plochy opraveného válce. Další nevýhodou tohoto řešení je i zhoršení přestupu tepla do chladicí kapaliny v důsledku stykové plochy vložka – blok motoru. Pracovní plochy válců ze slitin hliníku se vyrábějí podle čtyř metod. (ALUFIN, ALUSIL, NIKASIL a LOKASIL).[3]

2.5.3. Jednotlivé metody vyrábění pracovních ploch válců ze slitin hliníku

2.5.3.1. Metoda ALFIN

Vložky ze šedé litiny se potahují vrstvou sloučeniny železa a hliníku (FeAl_3).- Alfin, a potom se zalévají lehkou slitinou AlSi do forem. Mezivrstvou Alfin se docílí spojení s dobrou tepelnou vodivostí mezi šedou litinou pracovní plochy a lehkou slitinou AlSi, ze které je vyroben válec (žebrovaný, vzduchem chlazený).

2.5.3.2. Metoda ALUSIL

Blok válců se odlévá z hliníkové slitiny s vysokým obsahem křemíku většinou litím do kokil nebo nízkotlakým litím. Po honování pracovní plochy válců se elektrochemicky leptáním a lapováním odstraňuje měkký hliník kolem krystalů křemíku. Vystupující tvrdé křemíkové krystaly vytvářejí styčnou plochu pro píst a pístní kroužky, velmi odolnou proti otěru. Pro snížení opotřebení pístu se většinou používají hliníkové písty s povrchovou vrstvou železa (Ferrocoat).

2.5.3.3. Metoda NIKASIL

Pracovní plocha válců z lehké slitiny se galvanicky potahuje vrstvou niklu s vloženými krystaly karbidu křemíku, velmi odolnou proti otěru.

2.5.3.4. Metoda LOKASIL

Pro otvory válců se používají jádra z křemíku s keramickým pojivem ve tvaru dutých válců. Vysoce porézní jádra se skládají z matrice předeřáté na asi 700°C a předeřáté se vkládají do licí formy. Při speciálním postupu tlakového lití (Squeeze Casting) se při naplnění formy tlak v tavenině zvýší na 70 MPa a hliníková slitina prostoupí póry vložených jader. Jako hliníkovou slitinu lze použít cenově výhodný recyklovaný hliník s nižším podílem Si. Potřebné obohacení křemíkem zajistí materiál jader. Několikastupňovým honováním se křemíkové krystaly reliéfovitě odkryjí, a tím vznikne povrch velmi odolný proti opotřebení. Ve válcích LOKASIL se většinou používají písty "Ferrocoat".

2.6. Provedení typů bloku, na kterou dosedá hlava válce.

Podle provedení plochy bloku motoru, na kterou dosedá hlava válce, se rozlišují dva druhy motorových bloků. Uzavřené provedení “closed – deck” a otevřené provedení “open – deck”

2.6.1. Uzavřené provedení “closed – deck”

Těsnící plocha bloku motoru vůči hlavě válců je z plného materiálu, kolem otvorů válců uzavřená, opatřená pouze otvory a kanály pro tlakový olej a odvod oleje pro chladicí kapalinu a popřípadě pro odvodu skříně. Tuto koncepci mají zásadně bloky motoru ze šedé litiny. Bloky motoru této konstrukce z lehkých slitin AlSi (např. pro alusilové válce) se vyrábějí litím do kokil, popřípadě podtlakovým litím. Jak takovéto provedení ve skutečnosti vypadá, je znázorněno na obrázku 12.



Obr. 12 Uzavřené provedení “closed – deck”[5]

2.6.2. Otevřené provedení “open – deck”

Vodní plášť okolo otvoru válců je směrem k hlavě válců otevřený. Z technického hlediska jej lze odlévat tak, že se bloky válců se styčnými plochami vyrábějí metodou LOKASIL (viz předchozí kapitola) tlakovým litím. Velmi malá tuhost takovýchto bloků válců vyžaduje tuhá a tenká kovová těsnění hlavy válců místo měkkých těsnění používaných u uzavřených bloků. Kovová těsnění hlavy válců umožňují, vzhledem k minimální deformaci, nízké přepětí šroubů hlavy válců. Tím se omezuje deformace válce a deformace vík. Jak takovéto provedení ve skutečnosti vypadá, je znázorněno na obrázku 13.



Obr. 13 Otevřené provedení “open – deck”[5]

3. Stanovení hlavních rozměrů motoru a 3-D návrh.

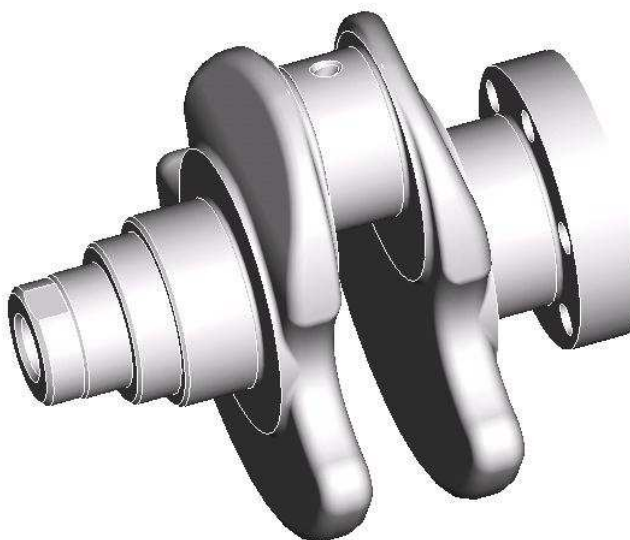
Hlavní součástí která ovlivní celou konstrukci navrhovaného experimentálního motoru je kliková hřídel. Výroba vlastní klikové hřídele je po finanční stránce dosti nákladná. Jelikož se jedná o experimentální motor vlastní konstrukce, rozhodl jsme se použít již vyrobený klikový hřídel. Zvolený klikový hřídel pochází s osobního automobilu Škoda Octavia 1.9 TDi. I když se jedná o klikový hřídel ze čtyřválcového vznětového motoru, tak se jevil jako nejlepší možná varianta. Pro můj účel musím klikový hřídel speciálně upravit (zkrátit pouze na jedno zalomení hřídele). Použitá kliková hřídel je svou konstrukcí dosti mohutná a dimenzovaná. Je to dáno tím, že pochází ze vznětového motoru. Pro moje účely to ale plně vyhovuje. Díky těmto vlastnostem se do budoucna naskytá možnost experimentální motor přepřehovat turbodmychadlem. Nevýhodou této klikové hřídele je její vyšší zdvih 95.5 mm. Na obrázku 14 je znázorněna již upravená kliková hřídel, která má jen jedno zalomení.

3.1. Základní parametry použitého klikového hřídele.

Parametry použitého klikového hřídele jsou znázorněny v tabulce 1.

Zdvih	95.5 mm.
Axiální vzdálenost středu ložisek válce	87.5 mm.
Počet hlavních ložisek	2.
Průměr ojnicního ložiska	47.8 mm.
Délka ojnicního ložiska	21.0 mm.
Průměr hlavního ložiska	53.9 mm.
Délka hlavního ložiska	23.6 mm.

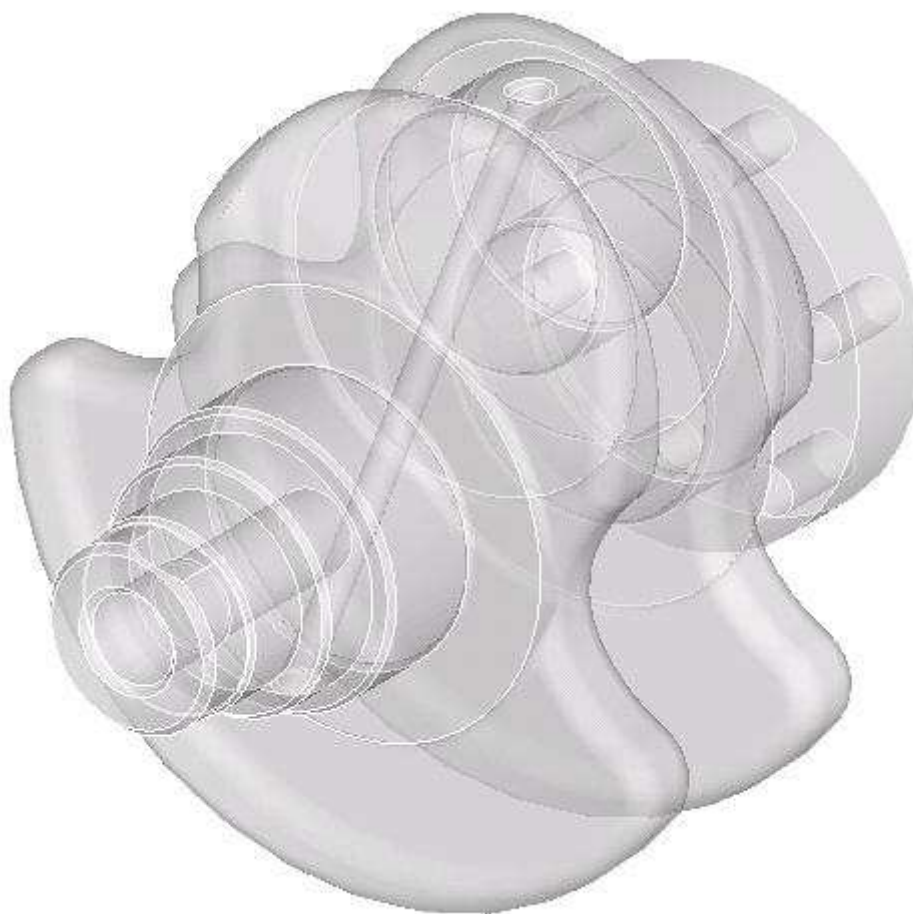
Tab.1 Základní parametry klikového hřídele.



Obr:14 Navržený klikový hřídel experimentálního jednoválcového motoru.

3.2.. 3-D Návrh klikové hřídele.

Při použití klikové hřídele, která je již vyrobená, jsou všechny její rozměry a parametry dány (zdvih, průměr ložisek, tvar, atd..). Po důkladném prohlédnutí a proměření jsem vytvořil 3-D návrh klikové hřídele v programu Pro/Engineer 3.0. viz obrázek 14. Takto navržená kliková hřídel odpovídá skutečné klikové hřídeli. Při nákresu jsem se zaměřil na vizualizaci klikové hřídele už jen s jedním zalomením. Tato kliková hřídel byla zhotovena do nejmenších detailů. Viz obrázek 15.



Obr.15 Detail navržené klikové hřídele.

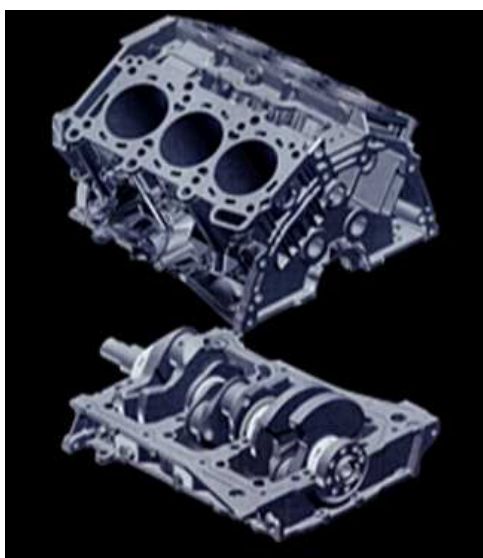
3.3. 3-D Návrh klikové skříně

Při navrhování klikové skříně jsem musel vycházet z rozměrů použité klikové hřídele. Jelikož se jedná o experimentální motor, rozhodl jsem se pro dělenou konstrukci (zvlášť válec a zvlášť kliková skříň). Tato konstrukce nám umožní experimentovat s návrhem válce a jeho rozměry. Při návrhu klikové skříně jsem se rozhodoval mezi dvěma základními typy konstrukce. Viz obrázek 16 a 17.

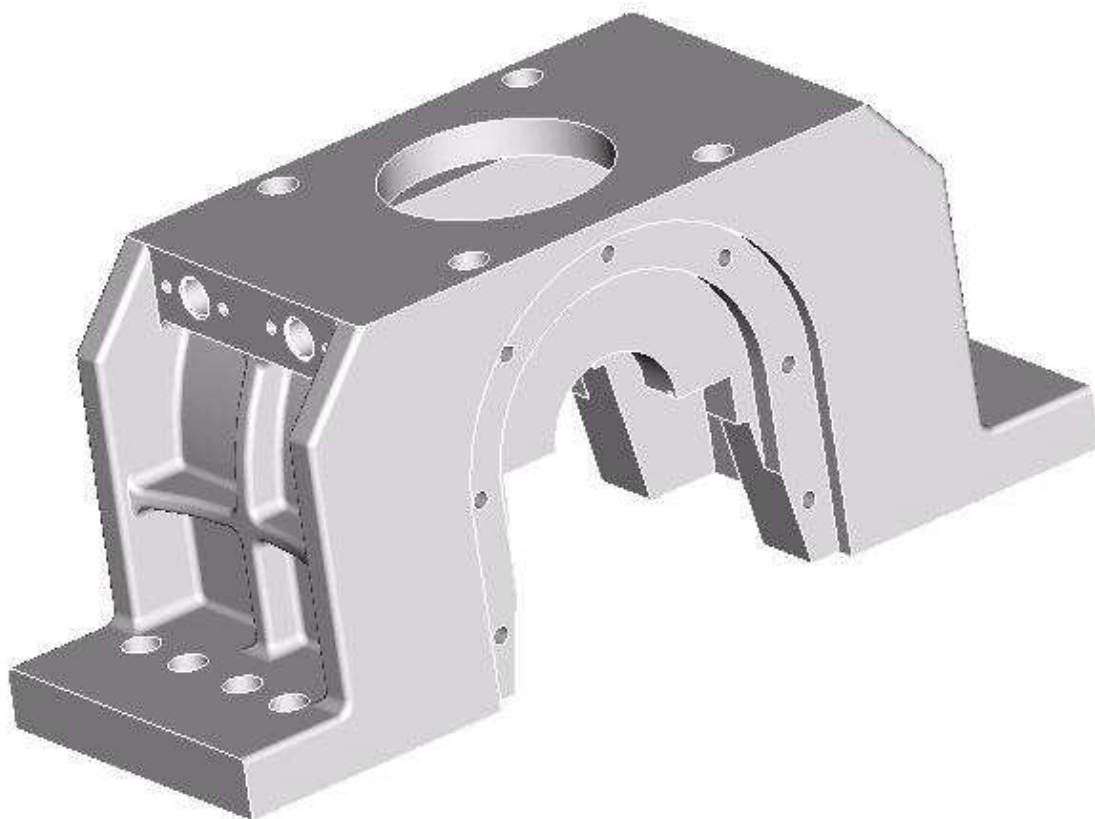


Obr. 16 Příruba spodního víka motoru pod středem klikového hřídele kliková skříň s dolů protaženými bočními stěnami.[7]

V současné době se více používá konstrukce Obrázek číslo 17. Tímto způsobem uložení je docílena větší tuhost klikové skříně. Pro experimentální účely jsem se ale rozhodl pro konstrukci, která je znázorněna na obrázku 16. Tato konstrukce nám umožňuje více volného místa kolem hlavních čepů klikového hřídele. Viz můj návrh Obrázek číslo 18.

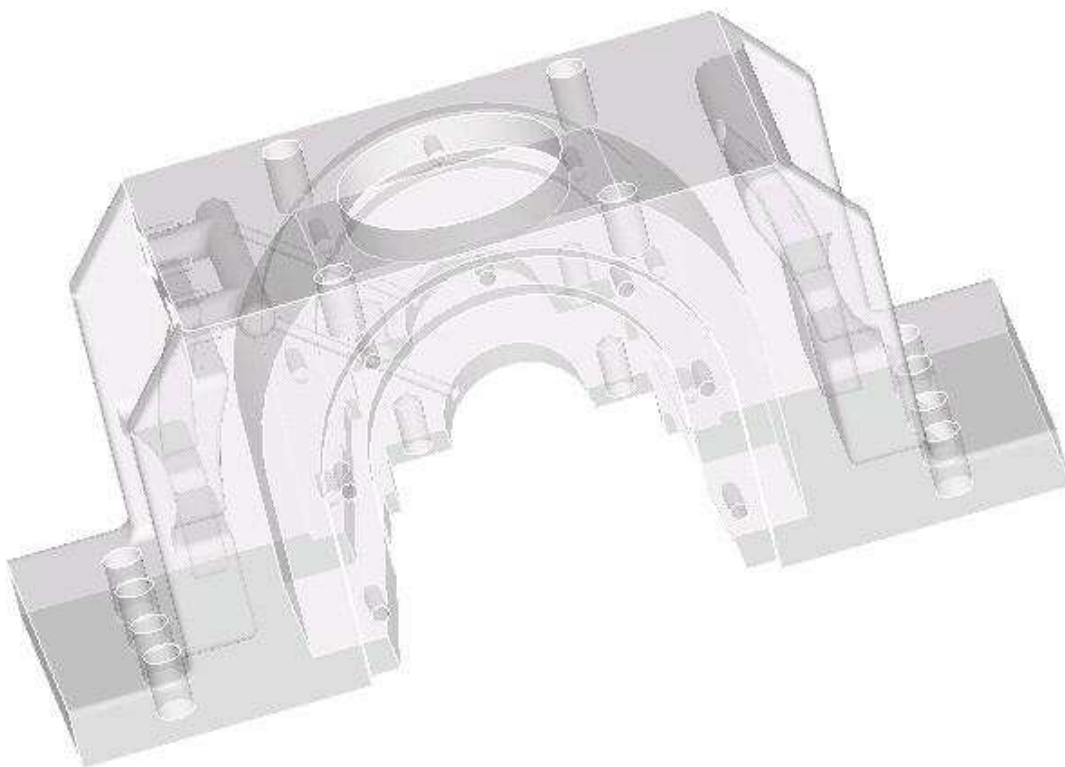


Obr. 17 Příruba spodního víka motoru pod středem klikového hřídele konstrukce s horní a dolní částí klikové hřídele.[6]

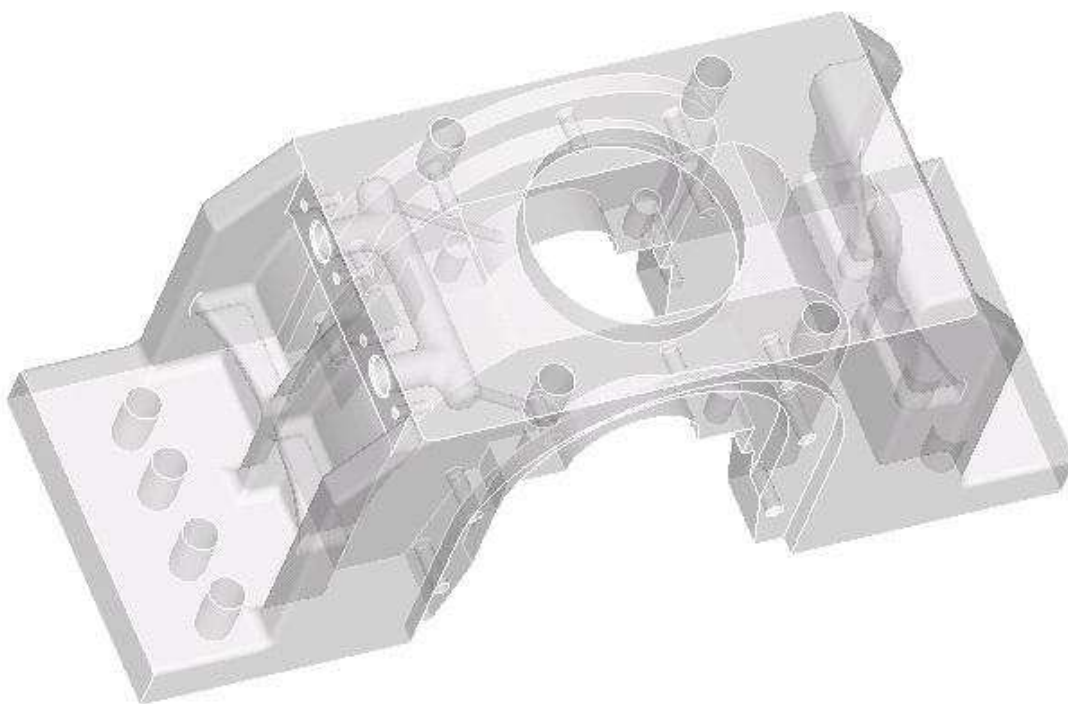


Obr. 18 Návrh klikové skříně.

Celková konstrukce klikové skříně je navržena tak, aby vyhovovala naší upravené klikové hřídeli a zároveň poskytovala co největší tuhost. Při vlastním návrhu jsem vycházel ze základních rozměrů klikového hřídele (průměry ložisek, rozteč ložisek, atd...). Takto navržená kliková skříň byla zpracována do nejmenších detailů. Viz obrázky 19 a 20. Jak už bylo výše řečeno, rozhodl jsem se pro konstrukci, která se už tak často nepoužívá (zvlášť kliková skříň a zvlášť válec). Válec, který na takto navrženou klikovou skříň přišroubujeme pomocí svorníků, můžeme lehce namontovat a demontovat. Výhodou je možnost změny válce (vrtání). Je to dáno tím, že se jedná v mém případě o experimentální motor. Navrženou klikovou skříň jsem převedl do prostředí MKP systému.



Obr.19 Detailní návrh klikové skříně



Obr.20 Detailní návrh klikové skříně

3.4. 3-D Návrh válce a vložky.

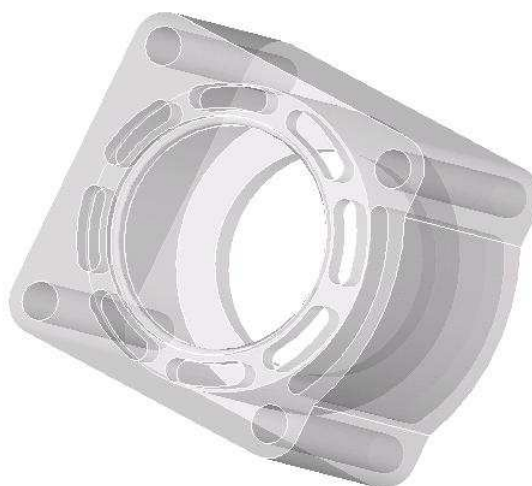
Válec je nedílnou součástí motoru. Navržená konstrukce experimentálního motoru umožňuje změnu válce dle vlastní potřeby nebo dle experimentu, což je hlavní výhodou takto navrženého experimentálního motoru. Při návrhu válce lze vycházet z různých typů konstrukce.

- Válec z jednoho kusu (hliníkový) povrchová úprava vnitřní plochy válce Nikasil. Viz obrázek 21.



Obr. 21 Válec s povrchovou úpravou Nikasil.

- Válec s vloženou mokrou vložkou s horním osazením dole těsněn gumičkami. Znázorněn na obrázku 22.



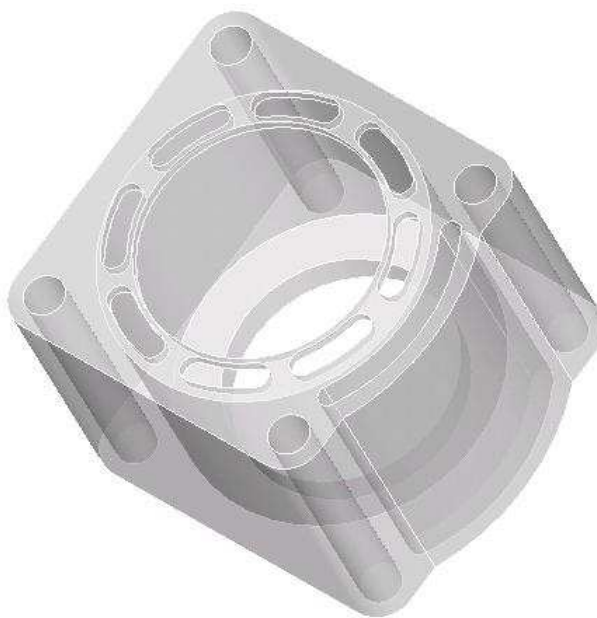
Obr. 22 Válec s vloženou mokrou vložkou s horním osazením.

- Válec s vloženou mokrou vložkou s dolním osazením těsněn v dolní části pomocí měděného těsnění. Znázorněn na obrázku 23.



Obr. 23 Válec s vloženou mokrou vložkou veden pouze v dolní části.

- Válec s vloženou mokrou vložkou s dolním osazením těsněn v dolní části pomocí měděného těsnění a vrchem veden. Znázorněn na obrázku 24.

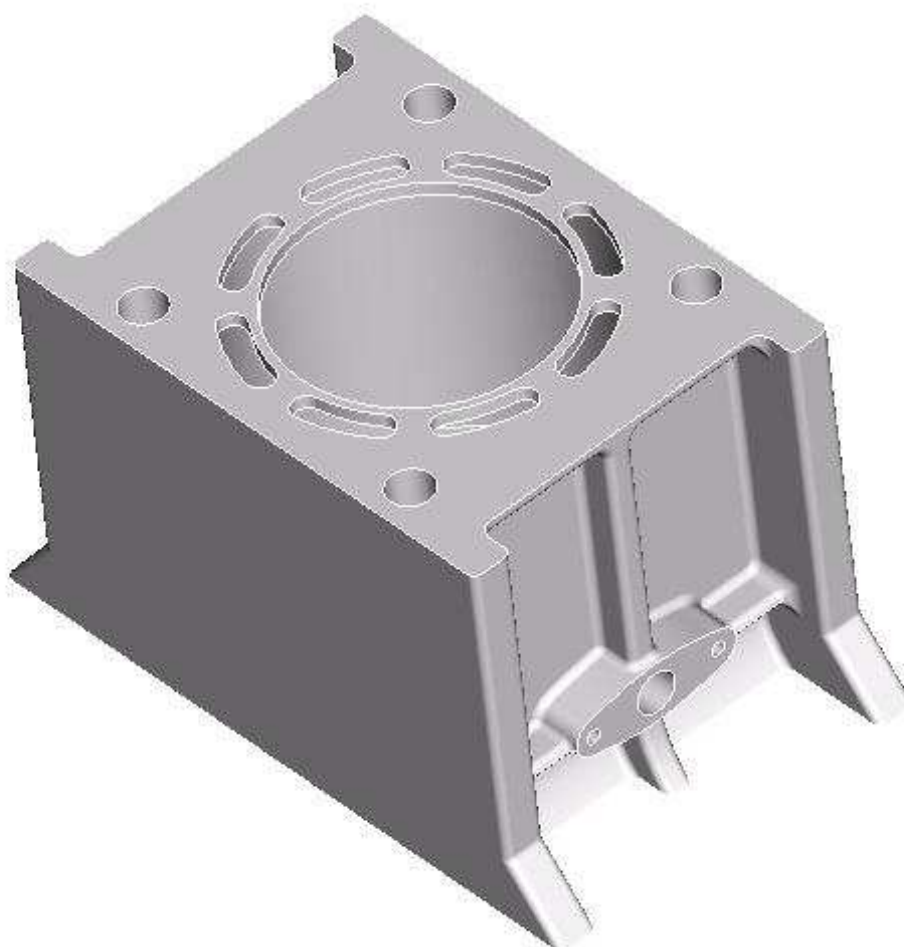


Obr. 24 Válec s vloženou mokrou vložkou veden v dolní i horní části.

3.4.1. Konečná podoba válce.

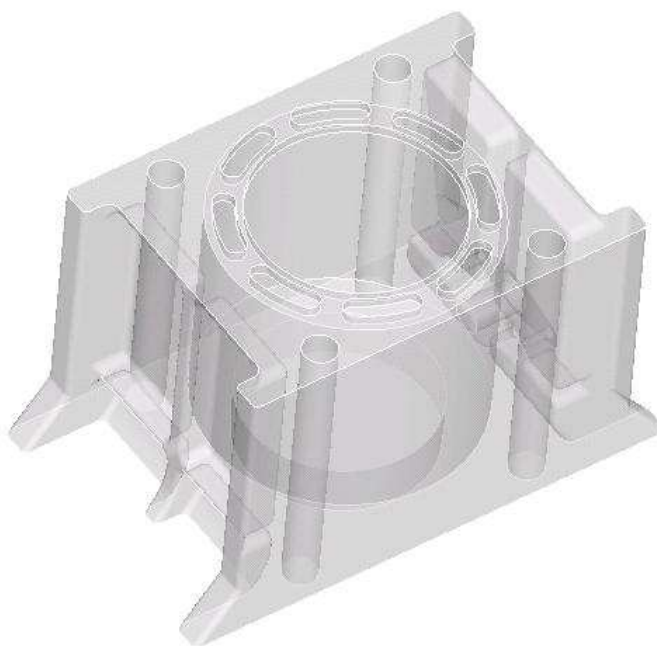
Rozhodl jsem se pro variantu válce s vloženou mokrou vložkou. Vložka je v dolní části osazena a těsněna pomocí měděného těsnění. V horní části je vedena vnitřní stěnou válce. Takto navržená konstrukce nám umožní měnit vložku válce dle potřeby. V praxi to znamená, že můžu měnit objem navrženého experimentálního motoru. Tato změna průměru vložky se dá provést v rozsahu od 81.6mm až 90 mm. (Zdvihový objem válce se mění od 500 cm³ do 607 cm³). Konečná podoba navrženého válce je na obrázku 25.

Obr.
25



Konečná podoba válce.

Navržený válec je připevněn ke klikové skříni pomocí svorníku, který prochází skrz celý válec. Na přední straně je patrný nálietek, přes který je umožněn vstup chladicího média (voda + fridex). Na obrázku 25 je znázorněn jen válec bez mokré vložky. Detailně je válec znázorněn na obrázku 26.



Obr. 26 Detail válce motoru

3.4.2. Konstrukce vložky válce.

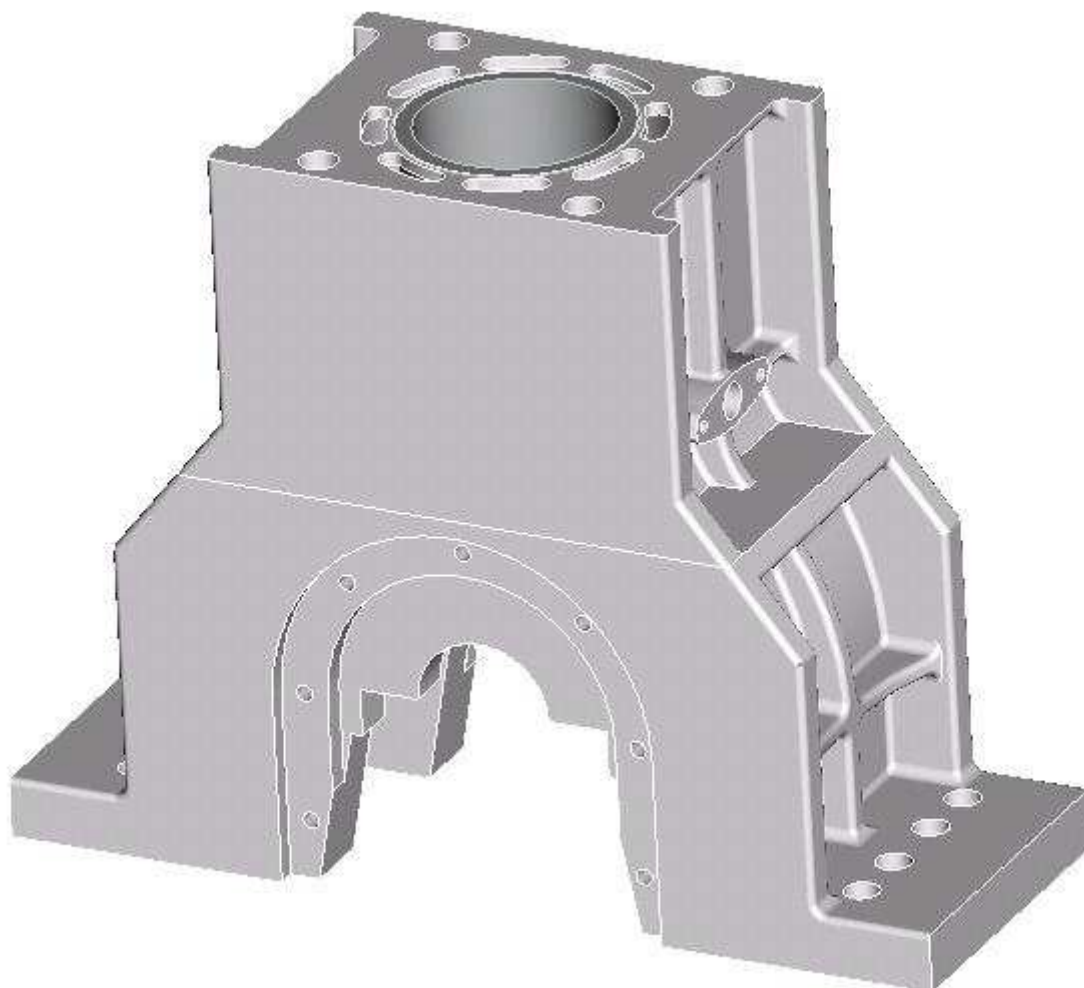
Jak už bylo v předchozím textu zmíněno, jedná se o vloženou mokrou vložkou s dolním osazením, těsněnou v dolní části pomocí měděného těsnění a vrchem vedenou. Návrh vložky obrázek 27.



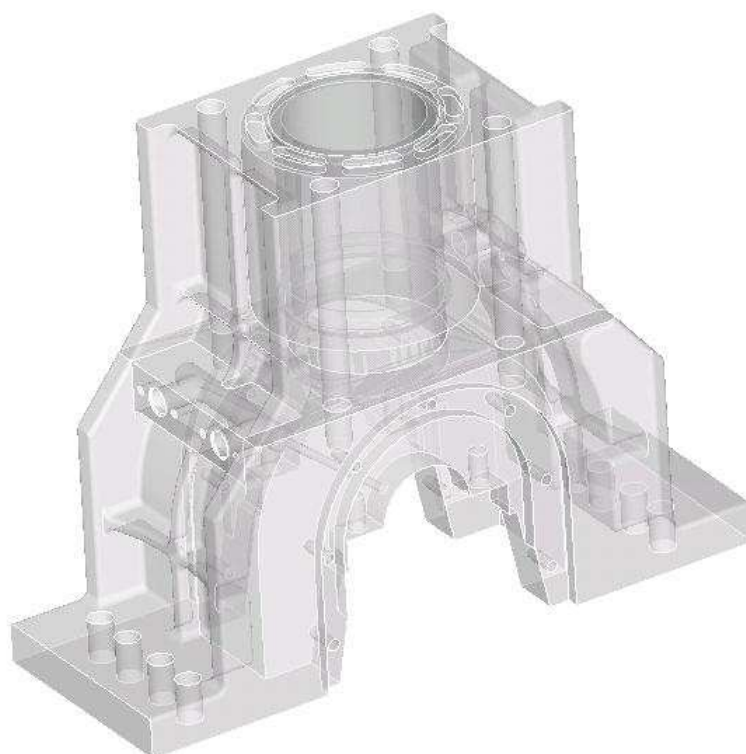
Obr. 27 Vložka válce experimentálního motoru.

3.5. Sestava celé klikové skříně.

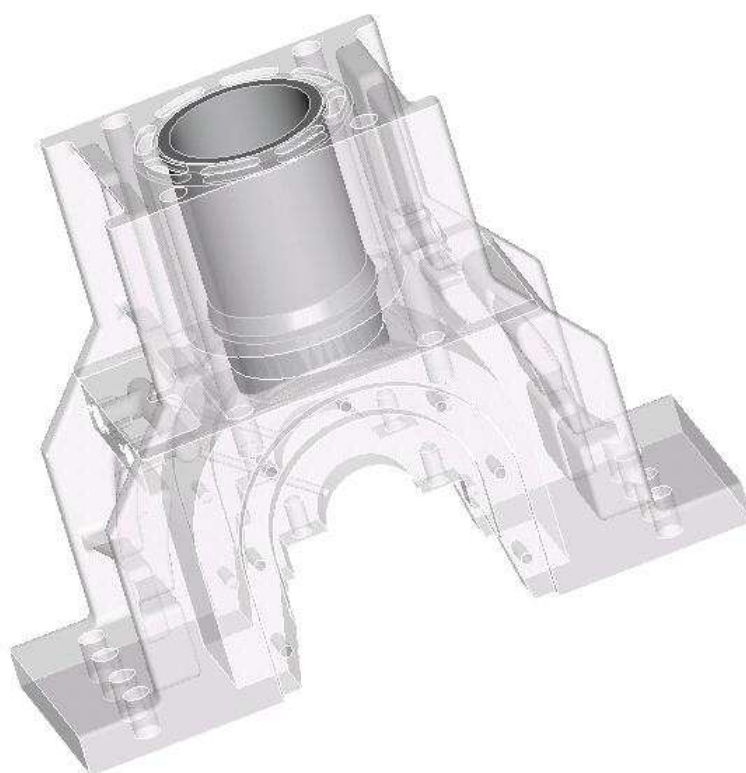
Sestava bloku motoru (kliková skříň, válec a vložka) je znázorněna na obrázku 28, 29 a 30. Celý návrh sestavy bloku motoru se odvíjel od rozměrů použité klikové hřídele. Pro správný tvar klikové skříně bylo nezbytné postupovat následujícím způsobem, aby se předešlo dalším nesrovnalostem. Nejprve jsem nakreslil klikovou hřídel. Podle rozměrů klikové hřídele se odvíjely další součásti a komponenty. Například výška a šířka klikové skříně přímo souvisí s tvarem a délkou ojnice. Dalším parametrem, který musí být zohledněn při konstrukci, je průměr a výška pístu. Píst přímo ovlivní výšku válce a vložky. Kliková skříň a válec musí být navrženy tak, aby se na ně daly upevnit další nezbytné součásti spalovacího motoru (hlava, olejová vana, vyvažovací hřídele, čerpadlo, atd.). Kompletní návrh motoru je zobrazen na obrázcích 31,32 a 33. Jedná se ale pouze o předběžný návrh motoru. Pro přesný návrh by bylo zapotřebí mnohem více času.



Obr.28 Sestava klikové skříně s válcem a vložkou.



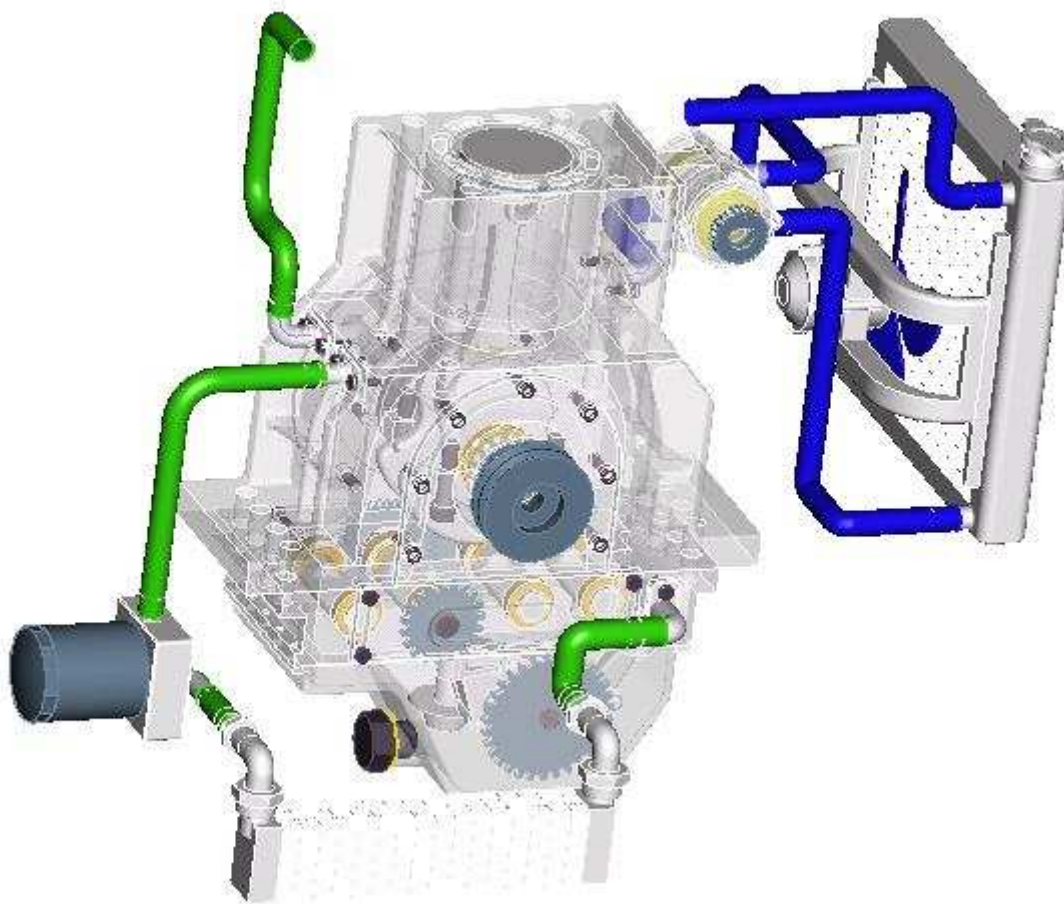
Obr. 29 Sestava klikové skříňe s válcem a vložkou v detailu.



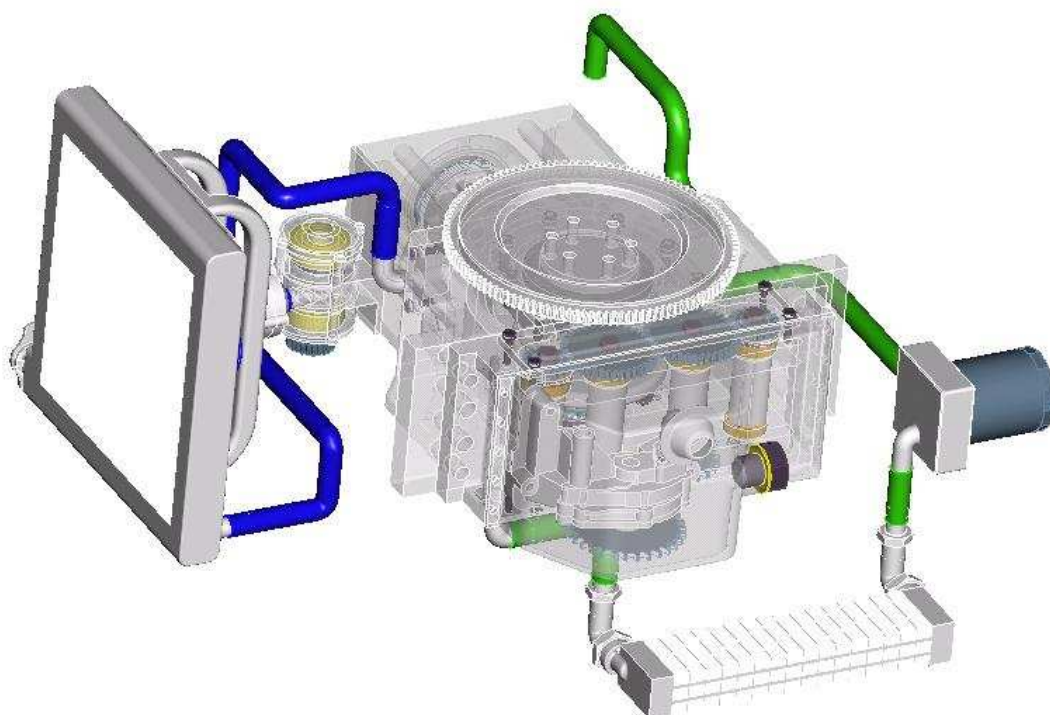
Obr. 30 Detailní znázornění umístění mokré vložky v bloku motoru.

3.6. Návrh sestavy motoru.

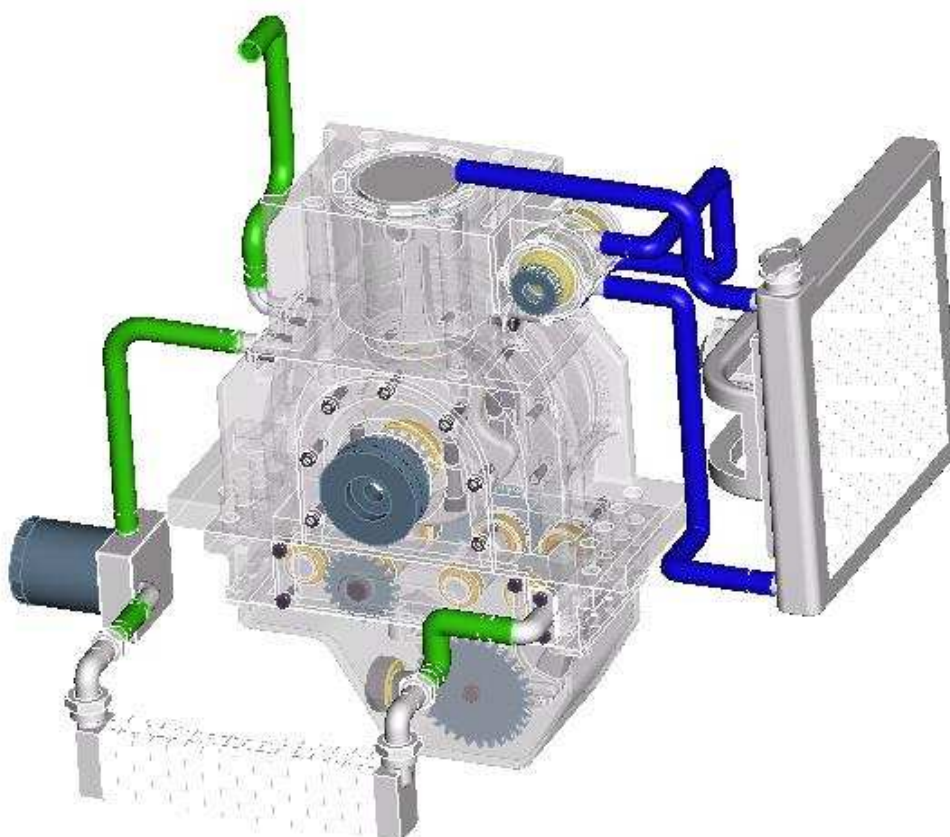
Předběžný návrh motoru a jeho příslušenství (vyvažovací hřídele, olejové čerpadlo, řemenice, olejový chladič, olejový filtr, vodní chladič, ventilátor, vodní čerpadlo, setrvačník, příruby atd.). Na úplně přesný návrh motoru by bylo zapotřebí více času a museli by se provést ještě další optimalizace. Cílem mé diplomové práce je zaměřit se více na klikovou hřídel a klikovou skříň navrženého motoru. Pro předběžný 3-D návrh byl použit program Pro/Engineer. Na obrázcích 31, 32 a 33 je znázorněn předběžný návrh experimentálního motoru.



Obr. 31 Kompletní sestava navrženého experimentálního motoru.



Obr. 32 Kompletní sestava navrženého experimentálního motoru.



Obr. 33 Kompletní sestava navrženého experimentálního motoru.

4. MKP model.

Převedení geometrického modelu klikové hřídele na výpočetní matematický model. Navržený 3-D model v programu Pro/Engineer byl zpracován do nejmenších detailů (zaoblení, zkosení vnějších hran, mazací otvory, atd.). Z hlediska následujících výpočtů je takto detailní model ale zbytečný, protože vede to k nadměrnému počtu elementů, což má za následek delší výpočetní čas a mnohem větší nároky na výpočetní techniku. Vzhledem k rozsáhlosti diplomové práce jsem přistoupil k účelnému upravení a zjednodušení modelu v programu Pro/Engineer. Upravený model převedu do výpočetního programu – ANSYS.

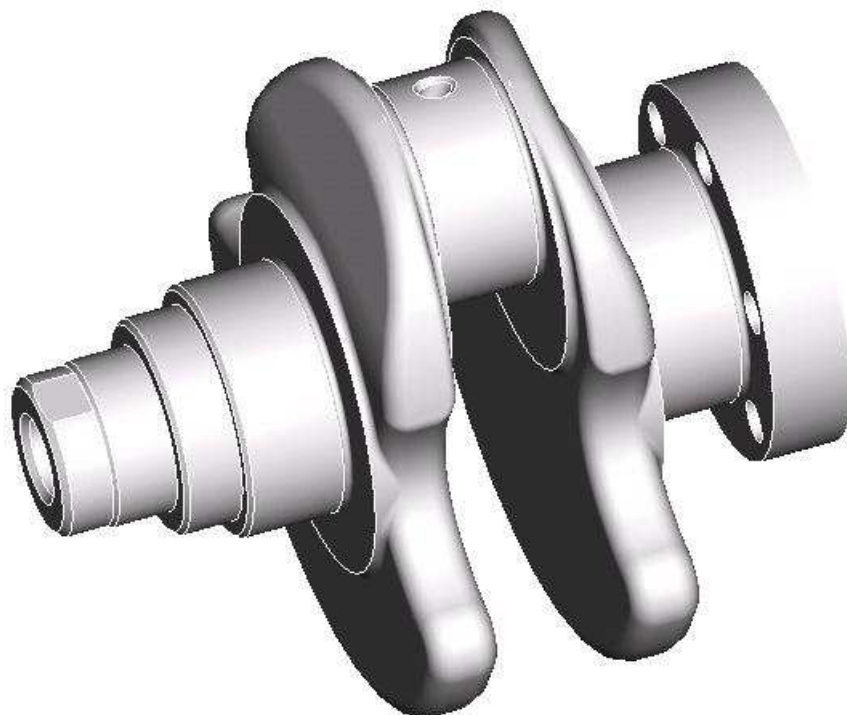
Upravení a převod CAD modelu do výpočetního programu ANSYS.

Předpokládané zjednodušení bylo následující :

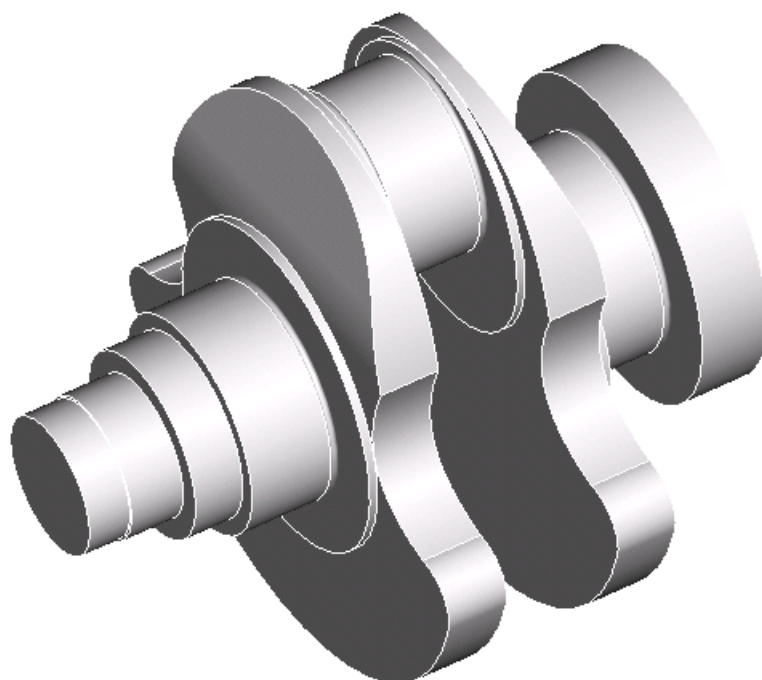
- zkosení hran do $1 \times 45^\circ$.
- přípojovací otvory pro setrvačnick (vyplněny dříkem šroubu).
- vynechání některých zaoblení .
- mazací kanálky - jedná se o významnou část z hlediska špiček napětí (na okraji mazacích kanálků na čepech dochází k vysoké koncentraci napětí). Vypustil jsem je z důvodů vysokého nárůstu konečno-prvkových elementů. Celkový význam při vlastních frekvencích je minimální.

Pro dynamickou simulaci běhu motoru je takto zjednodušený model postačující.

V programu Pro/Engineer provedeme následující zjednodušení. Porovnání jednotlivých 3-D modelů je na obrázcích 34 a 35. Na obrázku 34 je znázorněn model klikového hřídele před zjednodušením a na obrázku 35 je znázorněn model po zjednodušení. Po provedených úpravách převedu model klikové hřídele z programu Pro/Engineer do programu ANSYS.



Obr. 34 Navržená kliková hřídel před zjednodušením.



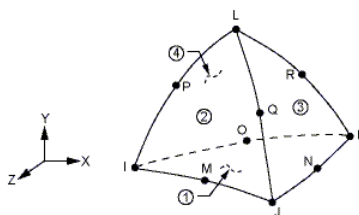
Obr. 35 Klikový hřídel zjednodušený pro převod z Pro/Engineer do programu ANSYS.

4.1. Vytvoření MPK modelu klikové hřídele v programu ANSYS.

Programu ANSYS můžeme libovolně upravovat síť konečných prvků, definovat materiálové charakteristiky, okrajové podmínky, počítat zatěžující stavy a zobrazovat výsledky. Po převedení z programu Pro/Engineer do programu ANSYS (obrázek 39.) musí být provedeny následující úkony.

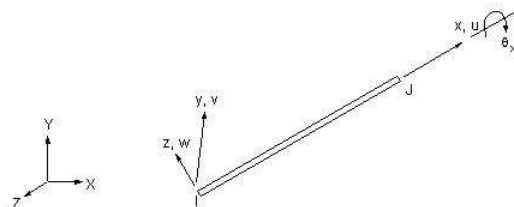
4.1.1. Definování konečno - prvkových elementů.

- Nastavení typu elementů modelu hřídele na SOLID 187



Obr. 36 SOLID187 , 3D konečný prvek s 10 uzly.

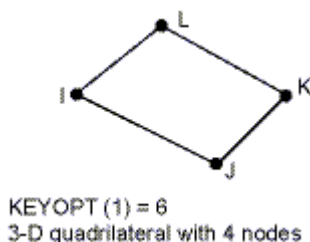
- Vytvoření interface uzlů pro modální redukci, resp.pro model poddajného tělesa do MBS.
- Propojení interface uzlů pomocí konečných prvků. Pro tento účel jsem použil prvek BEAM4 (6 stupňů volnosti v uzlu – attachment uzly musí mít 6 stupňů volnosti.).



Obr: 37 BEAM4 , 3D elastický prut.

- Nastavení prvku MESH200

Pro vytvoření sítě na plochách byl použit typ elementu MESH 200. Tento prvek je vhodný pro síťování ve 2-D nebo 3-D prostoru. Prvek může být po využití smazán nebo ponechán na místě , čímž není výsledek výpočtu nijak ovlivněn.



Obr: 38 MESH200 , 3D čtyřúhelník s 4 uzly.

4.1.2. Nastavení materiálových vlastností.

Nastavení materiálových charakteristik pro typy prvků. Pro SOLID187 a BEAM4. Materiálové vlastnosti prvku SOLID187 vyplývají z vlastností zvoleného materiálu.

Prvek SOLID187

- | | |
|--------------------------|--|
| - hustota | $\rho = 7850 \cdot 10^{-12} \text{ t.mm}^{-3}$. |
| - modul pružnosti v tahu | $E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$. |
| - Poissonovo číslo | $\mu = 0.3$. |
| - reálné konstanty | |

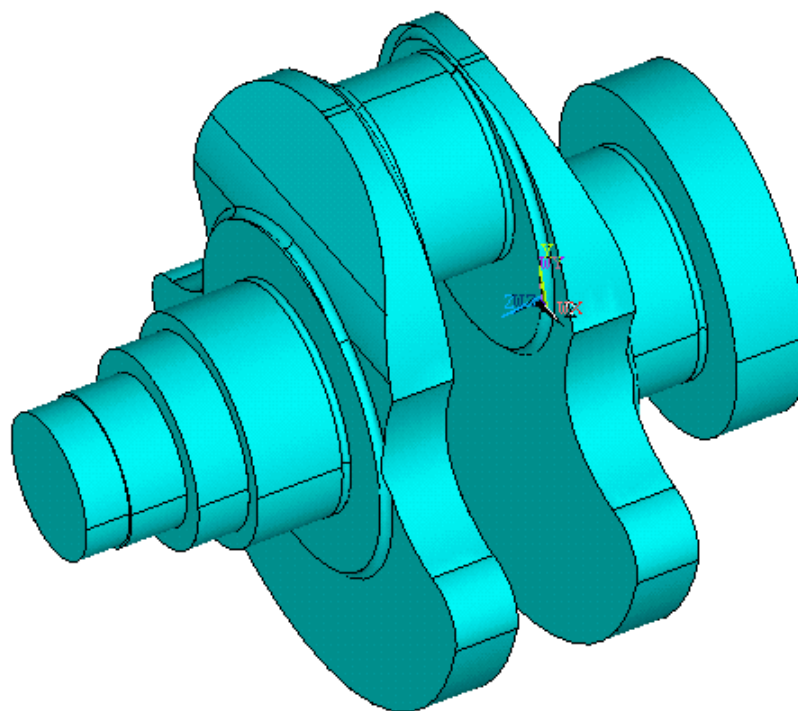
Pro prvek BEAM4 jsem musel hodnoty vhodně navrhnout tak, aby co nejméně ovlivnili vypočtené výsledky. Materiálové vlastnosti pro prvek BEAM4 jsem zvolil následovně:

Prvek BEAM4:

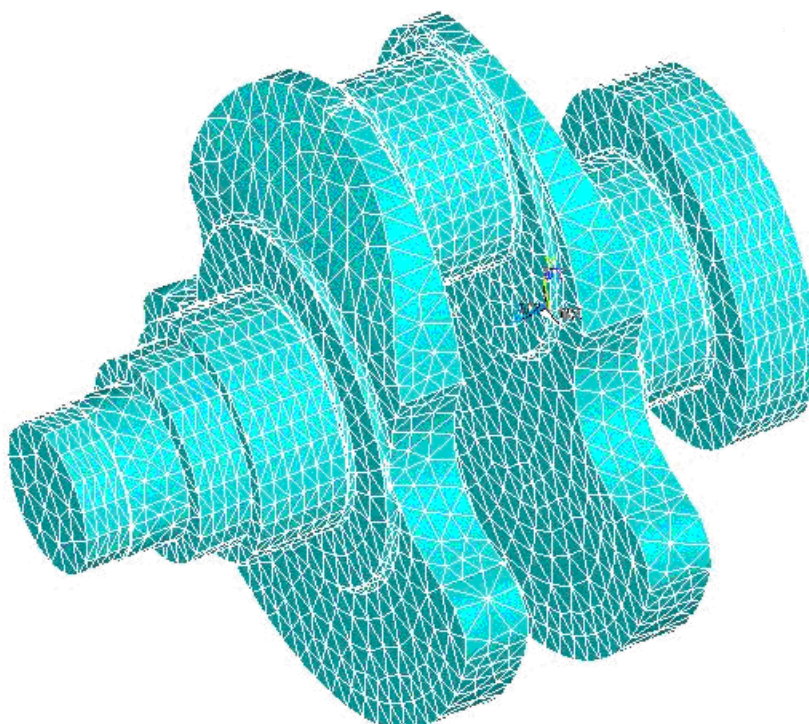
- | | |
|--------------------------|---|
| - hustota | $\rho = 1 \cdot 10^{-10} \text{ t.mm}^{-3}$. |
| - modul pružnosti v tahu | $E = 1 \cdot 10^6 \text{ MPa}$. |
| - Poissonovo číslo | $\mu = 0.3$. |
| - reálné konstanty | |

Nastavení jsem následně ověřil modální analýzou. Porovnal jsem hodnoty vlastních frekvencí a tvarů modelu bez prvku BEAM4 a s prvkem BEAM4. Výsledky tohoto porovnání jsou uvedeny v tabulce 2. kapitola 4.2.1. Na obrázku 40 je znázorněna kliková hřídel po vytvoření sítě konečných elementů prvkem SOLID187

Výslednou úpravu v programu ANSYS byl MKP model klikové hřídele se 12ti interface uzly, každý z nich napojený pomocí 4 stupňů.



Obr. 39 Kliková hřídel po převodu do programu ANSYS.



Obr. 40 Kliková hřídel po vytvoření sítě elementů prvkem SOLID187.

Na obr.40 Je výsledný MKP model klikového hřídele vytvořený v programu ANSYS.

Výsledný MKP model obsahuje prvky viz tab.2

Keypoints	110
Lines (čár)	174
Areas (ploch)	74
Volumes(objemů)	1
Nodes (bodů)	56084
Elements (elementů)	40968

Tab.2 Počet jednotlivých prvků a elementu.

4.2. Modální analýza.

Kromě statických úloh lze metodou konečných prvků řešit i dynamické úlohy. Takovou úlohou je i vlastní kmitání konstrukcí. Výsledkem je pak nalezení vlastních tvarů a vlastních frekvencí konstrukce (součásti).

Při řešení dynamických úloh se sestavuje matice tuhosti stejně jako u statických úloh. Další maticí, kterou je pro konstrukci možné sestavit, je matice hybnosti M . Ta je sestavená z matic M_e hmotností jednotlivých prvků, které vyjadřují setrvačné vlastnosti prvku. Při řešení vlastního kmitání konstrukce tedy řešíme rovnici . (1).

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad (1)$$

jejíž řešení hledáme ve tvaru rovnice (2).

$$X = Y \cdot \sin \omega t \quad (2)$$

Jsou-li matice M a K n -tého řádu, potom lze vypočítat n vlastních frekvencí ω_i a n vlastních tvarů Y . Sestavíme-li vektory Y_i do matice a kvadráty vlastních frekvencí do diagonální matice Ω^2 , lze všechna řešení zahrnout do jediné maticové rovnice (3).

$$KY = \Omega^2 MY \quad (3)$$

Při řešení vlastního kmitání nezadáváme vnější silové zatížení. Obecná volná konstrukce, která nemá žádnou vazbu k rámu má tolik vlastních frekvencí nulových, kolik má stupňů volnosti. Nulové vlastní frekvence odpovídají pohybu konstrukce jako celku, takže u prutové úlohy bude prvních 6 vlastních frekvencí nulových.

4.2.1. Provedení Modální Analýzy.

Jako první provedu kontrolní výpočet byla provedena modální analýza, pro získání vlastních frekvencí a tvarů kmitů. Zajímá mě prvních 10 nenulových vlastních frekvencí (prvních 6 frekvencí je viz. předchozí text nulových.). Modální analýzu jsem provedl jak na modelu bez interface uzlů, tak na finálním modelu s interface uzly. Cílem bylo si ověřit, zda přidáním nových prvků nedošlo náhodou k výraznému ovlivnění výsledku. Porovnání vlastních frekvencí v obou případech je znázorněno v tabulce 3.

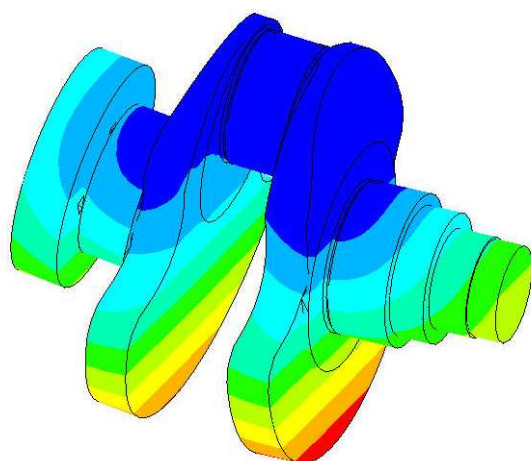
číslo módu	Vlastní frekvence na modelu bez interface uzlů	Vlastní frekvence na modelu s interface uzly	rozdíl frekvencí
1	1094,0 Hz	1096,5 Hz	2,5 Hz
2	2016,5 Hz	2016,1 Hz	0,4 Hz
3	2133,3 Hz	2131,9 Hz	1,4 Hz
4	3293,5 Hz	3300,0 Hz	6,5 Hz
5	4596,5 Hz	4600,0 Hz	3,5 Hz
6	5433,5 Hz	5432,9 Hz	0,6 Hz
7	5621,3 Hz	5621,9 Hz	0,6 Hz
8	5930,1 Hz	5931,1 Hz	1,0 Hz
9	6345,9 Hz	6347,0 Hz	1,1 Hz
10	6425,0 Hz	6425,2 Hz	0,2 Hz

Tabulka 3.

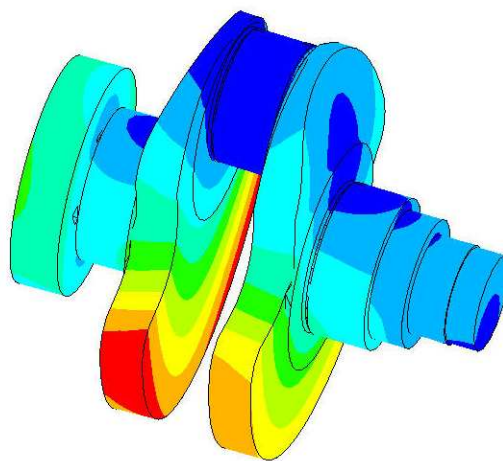
Výsledky modální analýzy v programu ANSYS jsou i vlastní tvary modelu. Jedním z výstupů je animace deformace tvaru, podle kterého se dá velmi přesně odhadnout charakter kmitání, které je při této frekvenci dominantní a nebezpečné pro klikovou hřídel. Na obrázcích 41 až 50 jsou znázorněny statické obrázky vlastních tvarů klikové hřídele.

Modální analýza

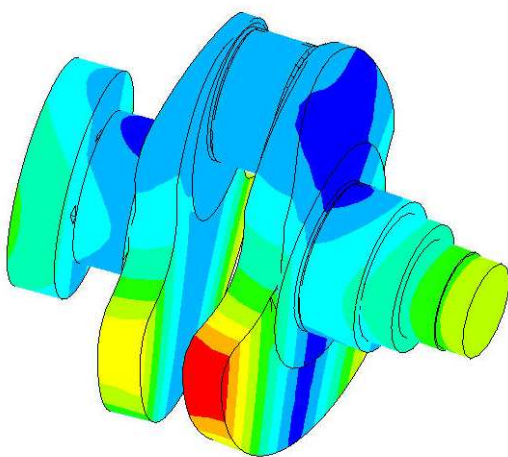
Umožňuje zjistit vlastní frekvenci a tvar součásti při jejím dosažení. Vlastní frekvence jsou důležité pro projektování strojních uzlů, jelikož shoda vlastní frekvence a frekvence pracovní může mít za následek konstruktivní interferenci (rezonanci), a tím možné porušení spojitosti.



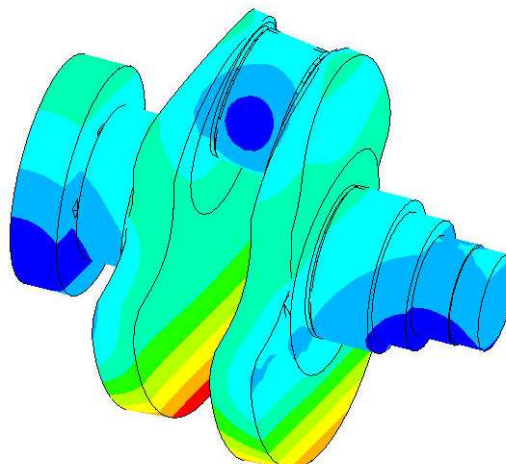
Obr.41 Vlastní frekvence 1096,5 Hz.



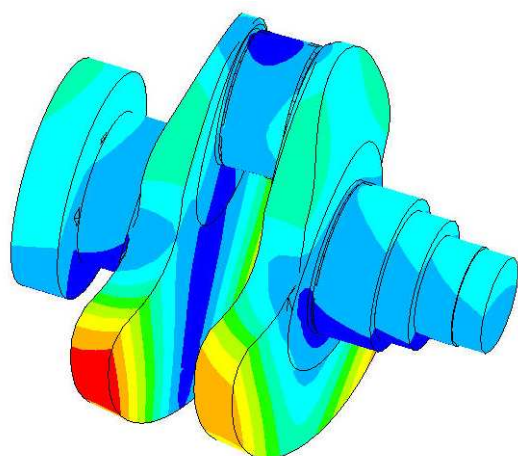
Obr.42 Vlastní frekvence 2016,1 Hz.



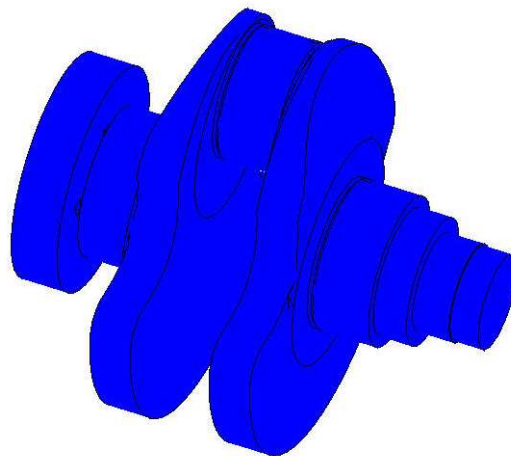
Obr.43 Vlastní frekvence 2131,9 Hz.



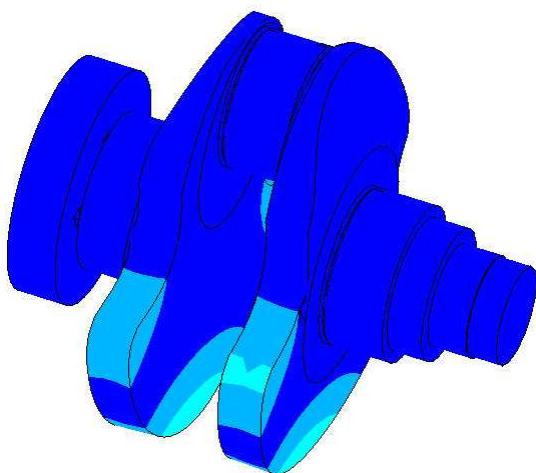
Obr.44 Vlastní frekvence 3300,0 Hz.



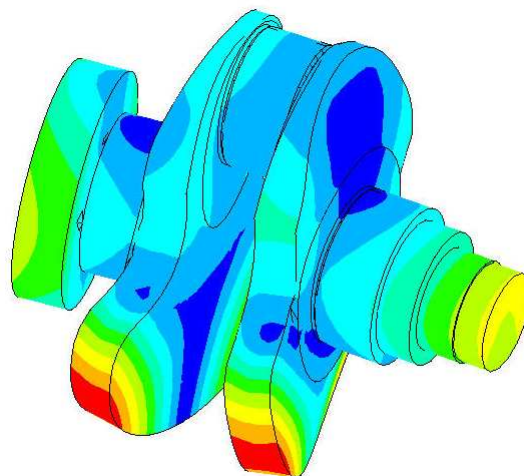
Obr.45 Vlastní frekvence 4600,0 Hz.



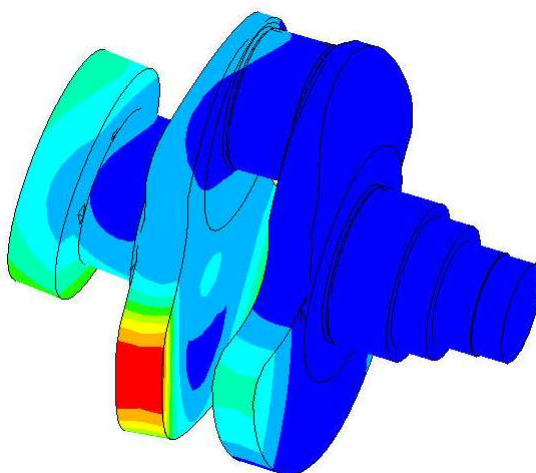
Obr.46 Vlastní frekvence 5432,9 Hz.



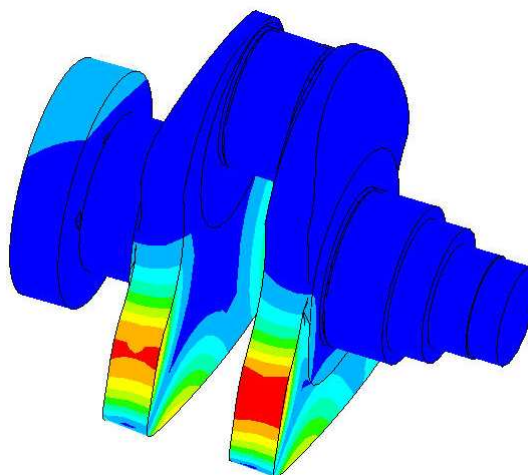
Obr.47 Vlastní frekvence 5621,9 Hz.



Obr.48 Vlastní frekvence 5931,1 Hz.



Obr.49 Vlastní frekvence 6347,0 Hz.

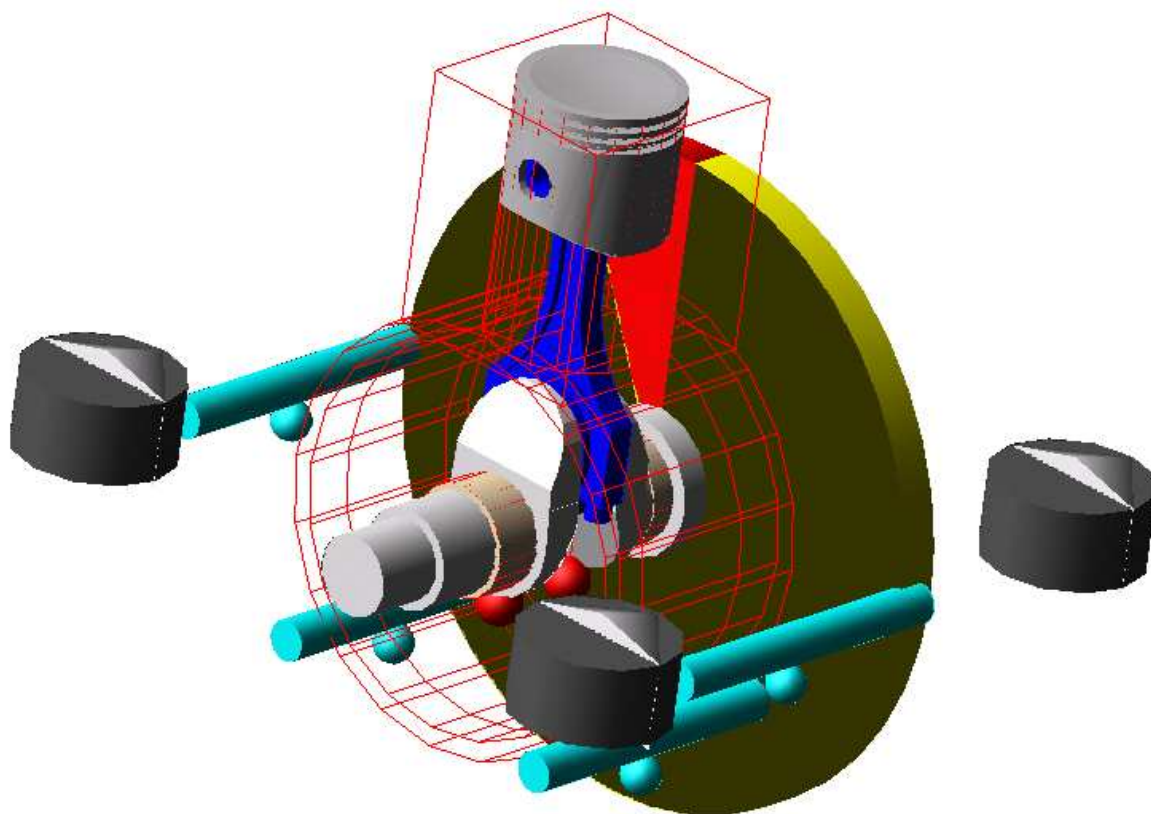


Obr.50 Vlastní frekvence 6425,2 Hz.

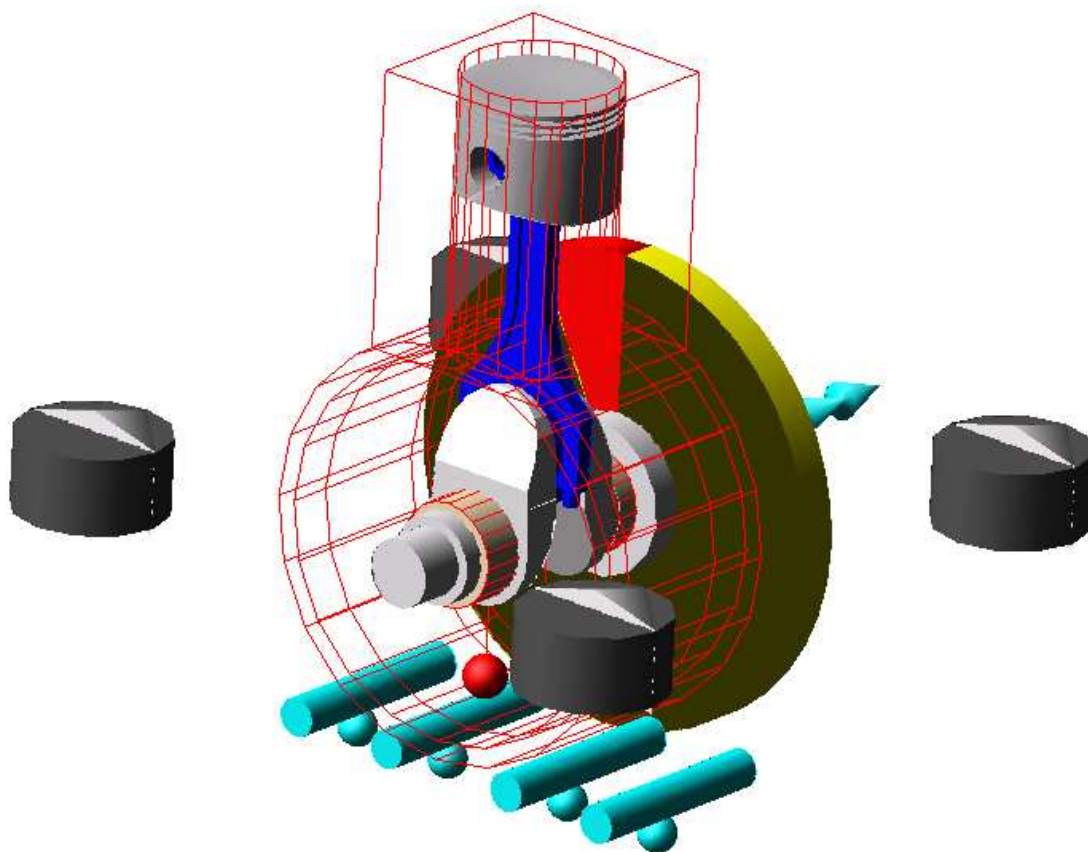
Modální analýzou práce na klikové hřídeli v programu ANSYS končí. Nyní převedu klikovou hřídel s programem ANSYS do programu ADAMS/Engine.

5. Tvorba výpočtového modelu v programu ANSYS.

Pro výpočet sil, které budou působit na klikovou hřídel a na klikovou skříň, jsem zvolil výpočtový software Multi-Body systém, konkrétně program MSC.ADAMS/Engine. Program MSC.ADAMS/Engine obsahuje již několik standardních šablon virtuálních modelů klikového mechanismu. V našem případě jsem využil již předdefinovaný model klikového mechanismu jednoválcového motoru. Tento model jsem upravil tak, aby přesně odpovídal mému návrhu (kliková skříň, klikový hřídel, píst, vyvažovací hřídele, atd.). Pro ukázkou je na obrázku 51. znázorněna původní šablona klikového mechanismu a na obrázku 52. je znázorněn náš přesný návrh. Šablona modelu neobsahuje pouze „fyzické“ modely klikového mechanismu, ale také definice typu tlaku plynů ve spalovacím prostoru motoru, model olejového filmu kluzných ložisek, případně tlumič torzních kmitů atd. Tyto modely jsou předdefinovány.[4]



Obr. 51 Původní šablona klikového mechanismu.



Obr. 52 Navržený klikový mechanismus.

5.1. Nastavení základních rozměrů.

Nastavení Engine Global Dat tak, aby odpovídaly mému návrhu experimentálního motoru.
Viz. Tabulka 4.

Modify Engine Global Data			
Engine Global Data Name: .motor_30_9_2008.cranktrain_i1.ues_i1_data			
Cycle	4-Stroke	Rotation	Clockwise
Number of Banks	1	Bank Layout -->	
Number of Cylinders	1	Cylinder Layout -->	
Stroke	95.5	Bore Diameter	81.6
Axial Cylinder Distance	87.5		
Effective Con Rod Length	150.0		
Thrust Main Bearing No.	2	Bearing Layout -->	
Piston Pin Diameter	22.0	Length	53.5
Piston Boss Spacing	21.0		
Total Displacement			0.49 liter
OK Apply Cancel			

Tab. 4 Znázorňuje základní nastavení parametrů klikového mechanismu.

Pro přesné stanovení velikostí ložisek musíme rozvinout v tabulce 4. záložku (Bearing Layout). Po rozvinutí se objeví tabulka 5..

Crank Pin Bearing				Main Bearing		
Diameter	Length	No.	No.	Diameter	Length	Exact Position
uniform	uniform			uniform	uniform	User Specified
47.8	21.0	1	☒	53.9	23.6	-43.75
		2	☒	53.9	23.6	43.75

Tab. 5 Znázorňuje průměry a délky ojnicního ložiska a dvou hlavních ložisek klikového hřídele.

Jakmile máme všechny parametry v předchozích tabulkách nastaveny, můžeme přejít k dalšímu nastavení. Dalším nastavením je nastavení hlavních rozměrů klikové hřídele. Tabulka 6.

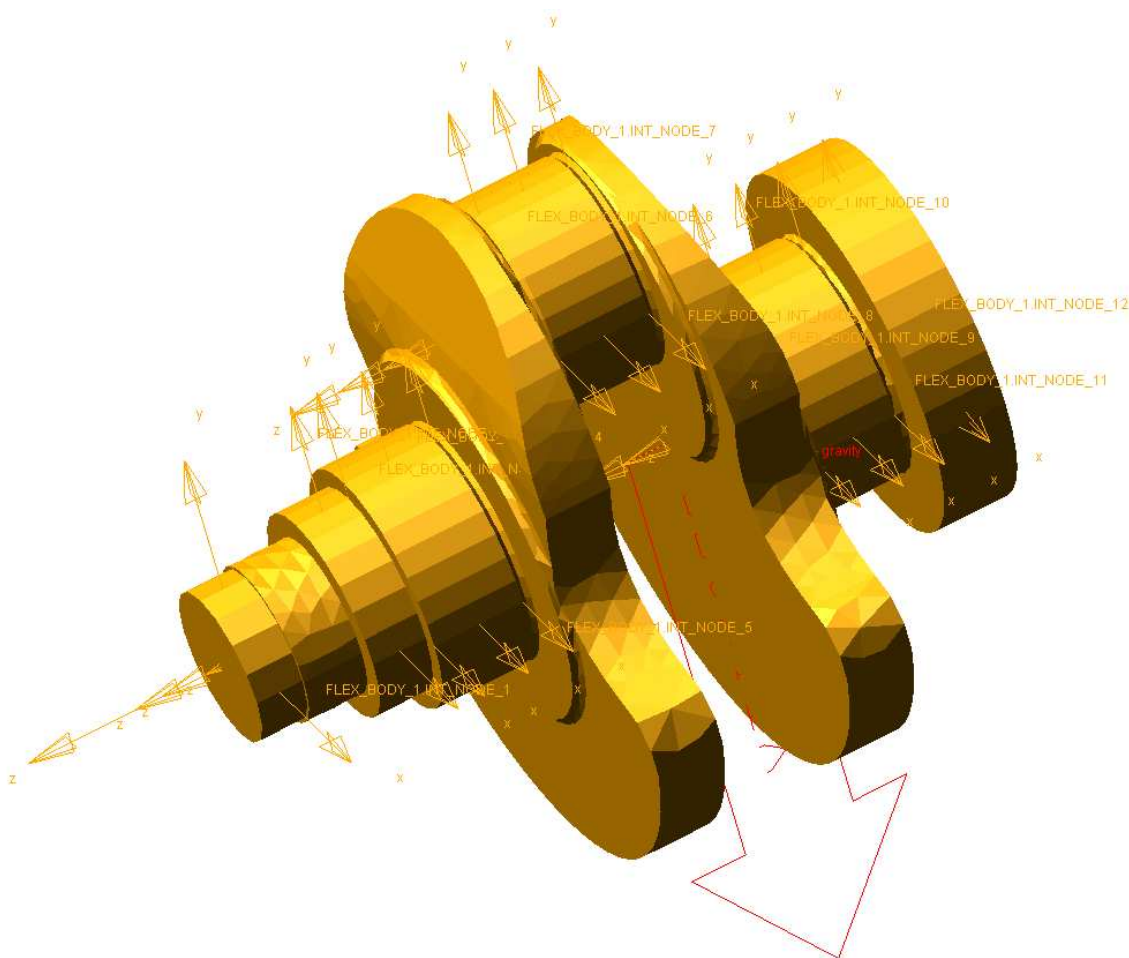
Shaft #	Length	Diameter	Attach Pos.
1	24.87	35.3	15.0
2	11.25	45.9	15.0
3	17.0	80.2	15.0

Tab.6 Znázorňuje délky jednotlivých zalomení klikového hřídele a základní materiálové vlastnosti.

Další nastavení parametrů experimentálního motoru je poněkud zdlouhavější. Proto jsem se rozhodl dále už podrobně nepopisovat jednotlivé nastavení. Jen tak pro představu jsem uvedl ještě dalších součástí, které je zapotřebí nastavit a pozměnit.[4]

- nastavení vyvažovacích hřídelů (rozměry, jejich hmotnosti, umístění, rozdílné otáčky, protiběžné otáčky, atd..).
- přesné rozměry pístu (průměr a výška pístu, průměr a délka pístního čepu, atd..)
- přesné rozměry ojnice (průměr a šířka spodního oka, průměr a šířka horního oka, rozteč obou ok, tloušťka, atd...).

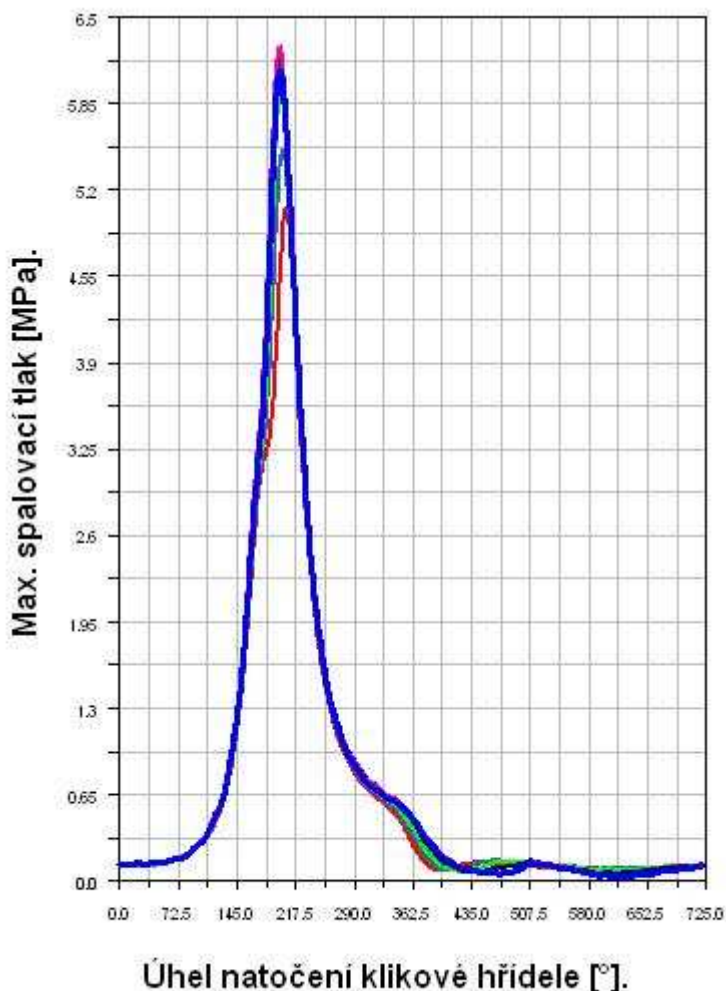
Po nastavení všech rozměrů experimentálního motoru převedu navrhnutou klikovou hřídel z programu ANSYS do programu ADAMS/view. Na obrázku 53. je znázorněna kliková hřídel po převedení s programu ANSYS do Programu ADAMS/view.



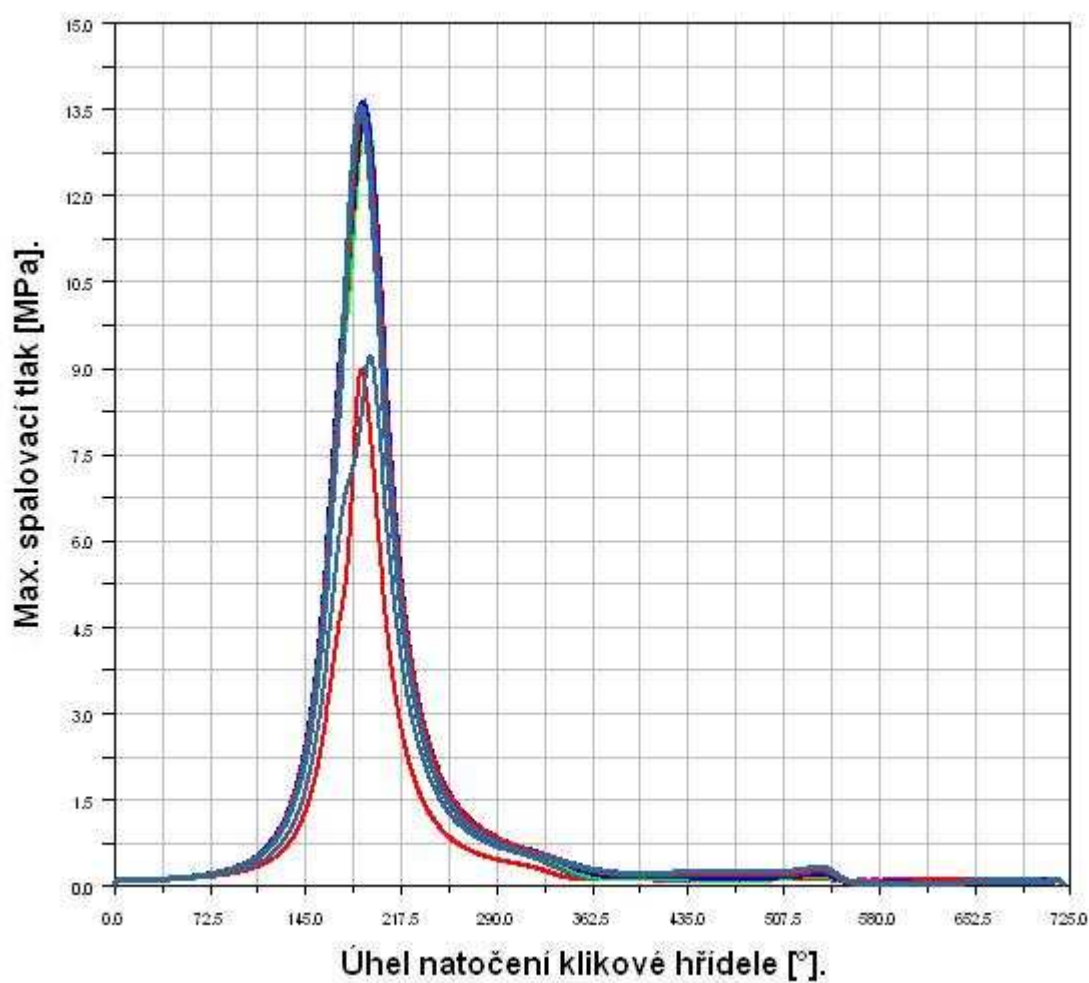
Obr. 53 Kliková hřídel znázorněná v programu ADAMS/View.

Vytvořený model klikové hřídele uložíme v programu ADAMS/View a následně ji otevřeme v programu ADAMS/Engine. V programu ADAMS/Engine nahradím modifikovanou klikovou hřídel hřídelí nově načtenou. Jelikož jsem již od začátku v programu ADAMS/Engine konstruoval motor přesně podle rozměrů skutečné klikové hřídele, tak záměnou (nahrazením) nevznikl žádný problém.

Jelikož se jedná o experimentální motor, a jak už bylo řečeno, v předchozích kapitolách je konstrukce dosti robustní. To mě vedlo k použití místo běžného tlaků plynů v motoru, tlak plynu přeplňovaného motoru. Tímto pokusem si zároveň ověřím, jak je má konstrukce klikové hřídele a klikové skříně dimenzovaná. Tlaky které použiji, dosahují takřka dvojnásobných hodnot oproti tlakům běžného zážehového motoru. V grafu 1. jsou znázorněny tlaky běžného zážehového motoru a v grafu 2. jsou tlaky mého přeplňovaného zážehového motoru.



Graf.1 Znárodněje tlak uvnitř válce běžného zážehového motoru.

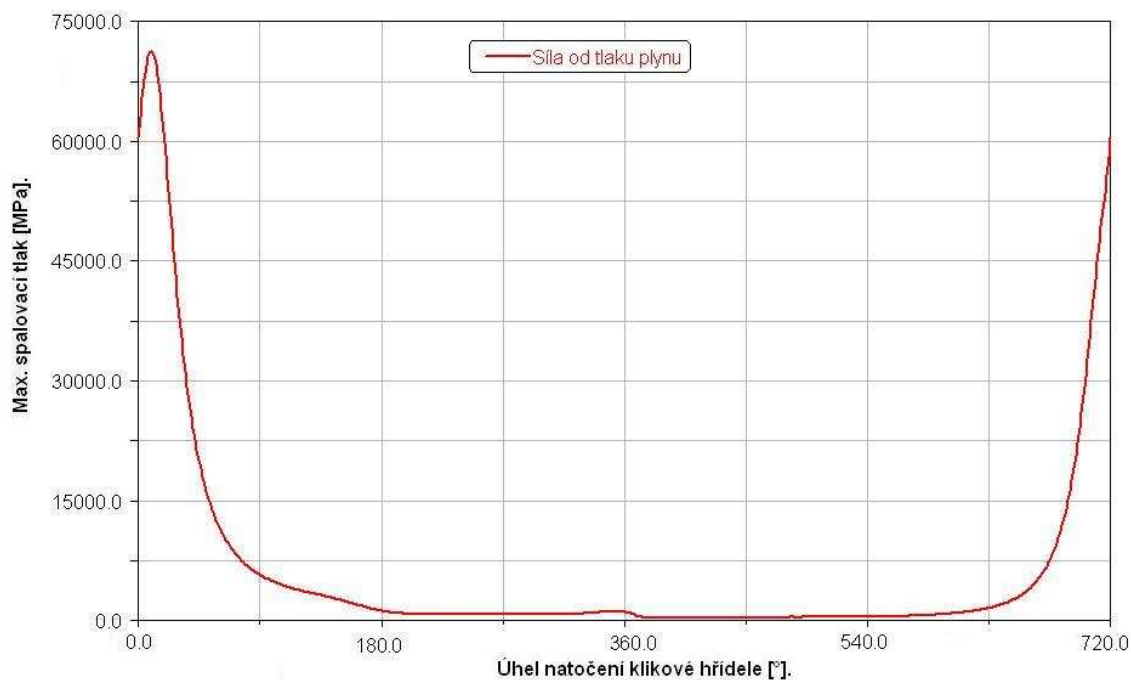


Graf. 2 Znáznorňuje tlak uvnitř válce mého přeplňovaného motoru.

5.2. Výpočet dynamických účinků v motoru.

Zadám potřebné parametry pro dynamickou analýzu (počet kroku, otáčky motoru, název souboru, atd.). Výpočet provedu při 3000 ot/min Po zadání všech parametrů spustím výpočet při ustáleném chodu motoru. (Running a Steady – State Analysis). Jakmile proběhne, tento výpočet (Steady – State Analysis), přepnu se v programu ADAMS/Engine pomocí klávesové zkratky F8 do režimu zobrazování výsledků (postprocesing) a vyhodnotím jednotlivé reakce. V mém případě mě zajímají síly, které budou působit na blok motoru. Jsou to síly působící na uchycení ojnicích ložisek a boční síla na válec od pístu. V grafu číslo 3. je znázorněna síla od tlaků plynu při 3000 ot/min.

5.2.1. Síla od tlaků plynu při 3000 ot/min



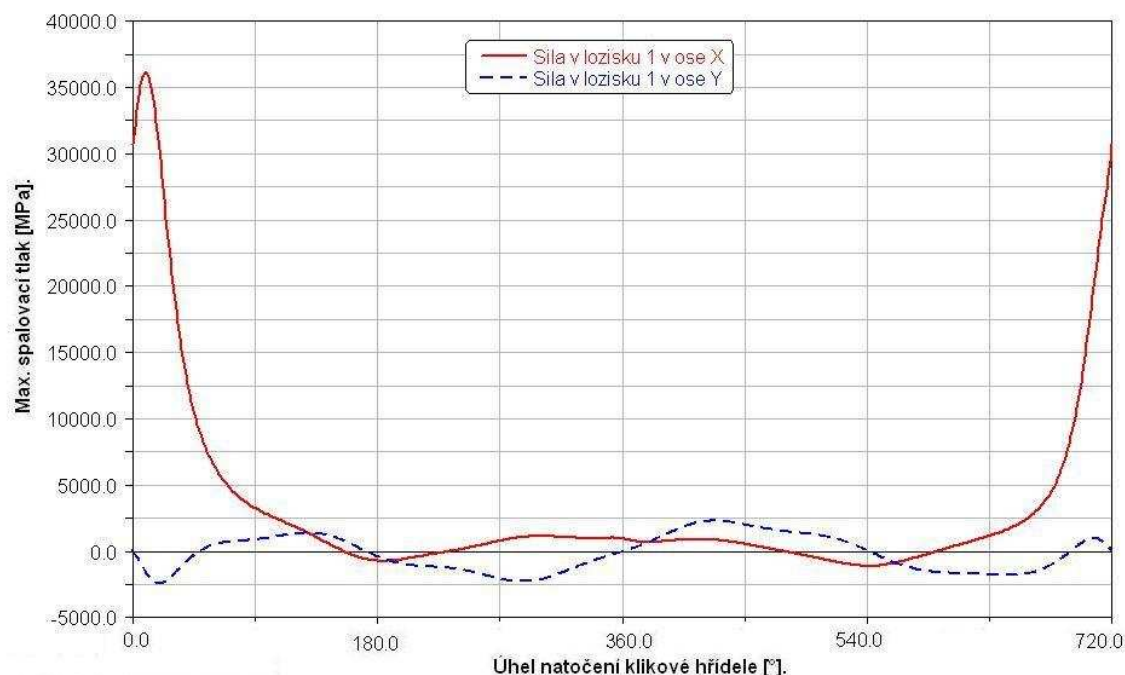
Graf. 3 Znáznorňuje sílu od tlaku, plynu při 3000 ot/min.

V grafu můžeme vidět, jaká je maximální síla od tlaku plynu a při jakém natočení klikové hřídele. V postprocesingu jsem zjistil, že síla od tlaku plynu dosahuje maximální hodnoty $F = 71261,8 \text{ N}$, při natočení klikové hřídele o úhel $\alpha = 10^{\circ}48'00$.

To samé provedu pro jednotlivé hlavní ložiska klikové skříně. V hlavních ložiskách klikové skříně působí síly jak v ose X, tak v ose Y. Pro mě je ale nejdůležitější součet této silové dvojice (magnitude).

Hlavní klikové ložisko (označím si jej římskou číslici I). Nachází na vyústění klikové hřídele pro pohon rozvodového mechanismu. (musím je rozlišovat, protože síly působící na klikovou skříně jsou v každém ložisku jiné). Po zatížení a simulaci běhu motoru získáme grafické vyhodnocení doplněné přesnými hodnotami našeho experimentálního motoru. To je zaznamenáno a přesně graficky znázorněno na následujícím grafu číslo 4.

5.2.2. Síly působící na klikovou skříně experimentálního motoru v ložisku I.

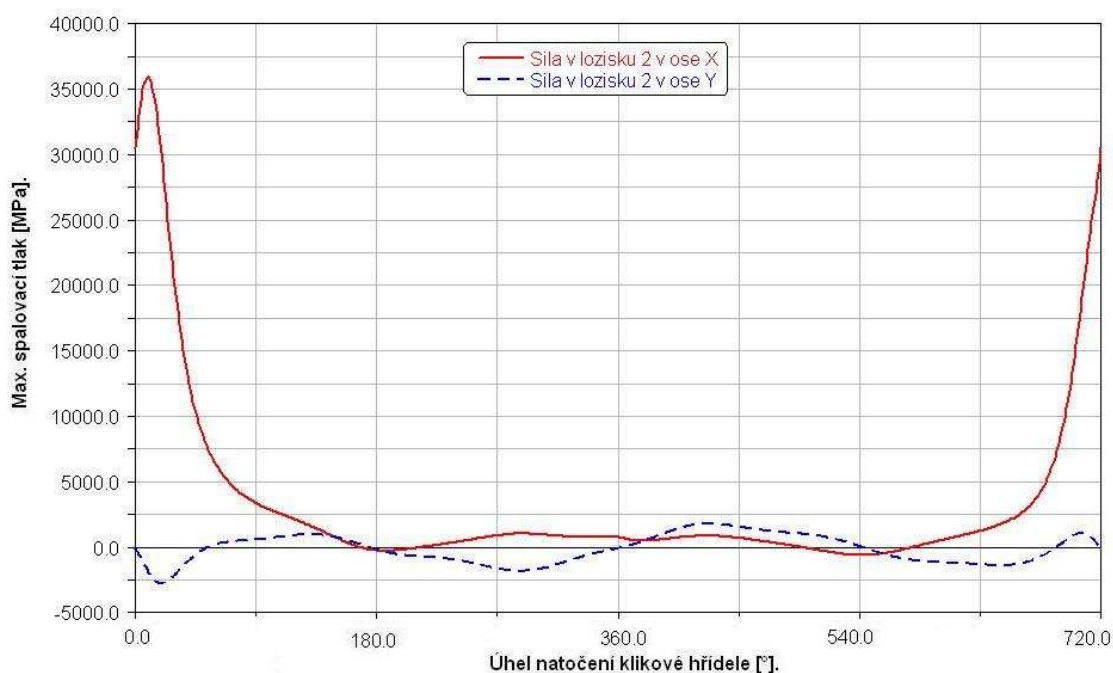


Graf.4 Známkování sil v ložisku I. při 3000 ot/min. které působí v ose X a Y

Z grafu 4. můžeme vidět, jaké jsou maximální síly (v ose X a Y), které působí v hlavním ložisku I. klikové skříně. Další hodnotu, kterou vidíme v následujícího grafu, je úhel natočení klikové hřídele, při kterém síly dosahují svého maxima. Po odečtení z grafu jsem zjistil, že síla v ložisku I v ose X dosahuje maximální hodnoty $F = 36108,5 \text{ N}$, a v ose Y dosahuje maximální hodnoty $F = -1619,54 \text{ N}$, a to při natočení klikové hřídele o úhel $\alpha = 10^{\circ}48'00''$.

Druhé hlavní klikové ložisko (označíme jej římskou číslici II) se nachází na opačné straně klikové hřídele. Na tuto stranu klikového hřídele se upevní setrvačnick. Po zatížení a simulaci běhu motoru získáme grafické vyhodnocení doplněné přesnými hodnotami našeho experimentálního motoru. Viz následujícím grafu číslo 5.

5.2.3. Síly působící na klikovou skříň experimentálního motoru v ložisku II.



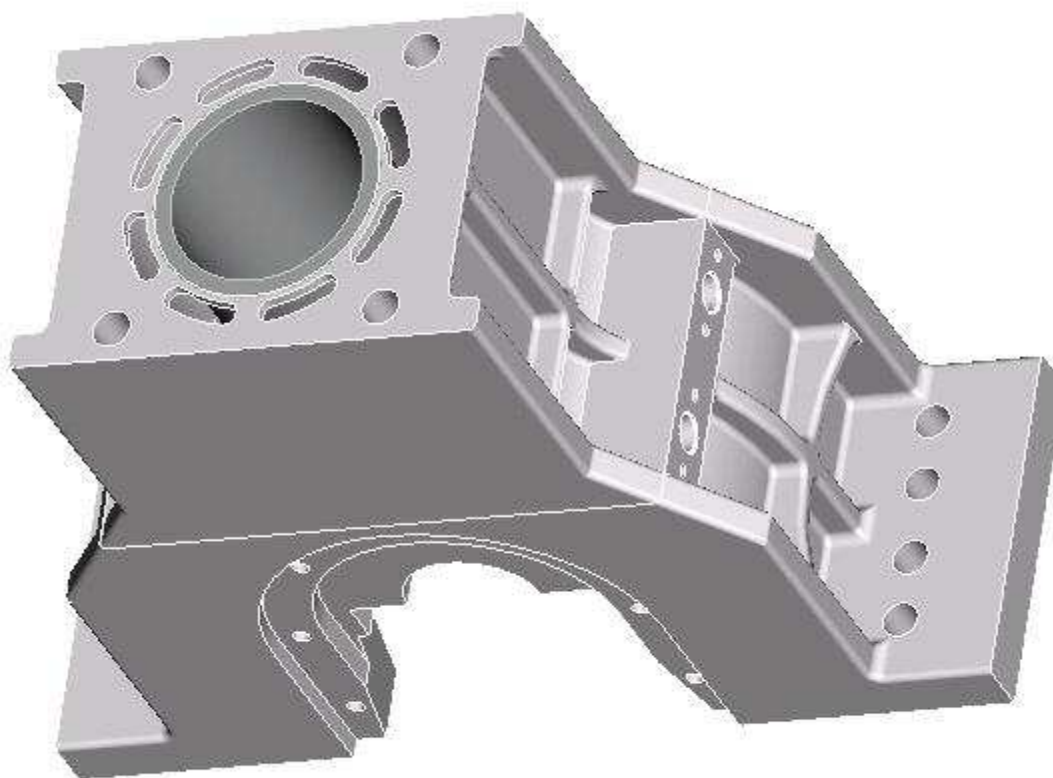
Graf.5 Znárodnuje síly v ložisku II. při 3000 ot/min. které působí v ose X a Y

Z grafu můžeme vidět jaké jsou maximální síly (v ose X a Y) které působí v hlavním ložisku II. klikové skříně. Další hodnotu kterou vidíme v následujícího grafu je úhel natočení klikové hřídele při kterém síly dosahují svého maxima. V postprocessingu jsem zjistil že síla v ložisku II. v ose X dosahuje maximální hodnoty $F = 35877,6 \text{ N}$ a v ose Y dosahuje maximální hodnoty $F = -1881,54 \text{ N}$, a to při natočení klikové hřídele o úhel $\alpha = 10^{\circ}48'00$.

Síly získané po zatížení a simulaci běhu experimentálně navrženého motoru v programu ADAMS/Engine a přeneseme do programu ANSYS kde již máme navrženou klikovou skříň (blok motoru). Tyto síly přesně rozmístíme do daných uzlů, tak abychom přesně simulovali zatížení a deformaci mnou navržené klikové skříně.

6. Kliková skříň.

Tvorba klikové skříně (bloku motoru). Postup stejný jako při konstrukci klikové hřídele. Nejprve jsem navrhnul základní tvar. (viz obrázek 54.). Navržený model v programu Pro/Engineer jsem zpracoval do nejmenších detailů. (zkosení, zaoblení vnějších hran, mazací otvory, atd.). Z hlediska následujících výpočtů je ale takto detailní model zbytečný, vede to k nadměrnému počtu konečno-prvkových elementů, což vede k dlouhým výpočtovým časům. Proto jsme se rozhodl stejně jako u klikové hřídele nejprve přistoupit k účelnému upravení a zjednodušení modelu v programu Pro/Engineer, a až pak provedu převod do výpočetního programu – ANSYS.



Obr. 54 Detailně zpracovaný návrh bloku motoru v programu Pro/Engineer

Upravení a převod modelu z programu Pro/Engineer do výpočetního programu ANSYS.

Provedl jsem následující zjednodušení.

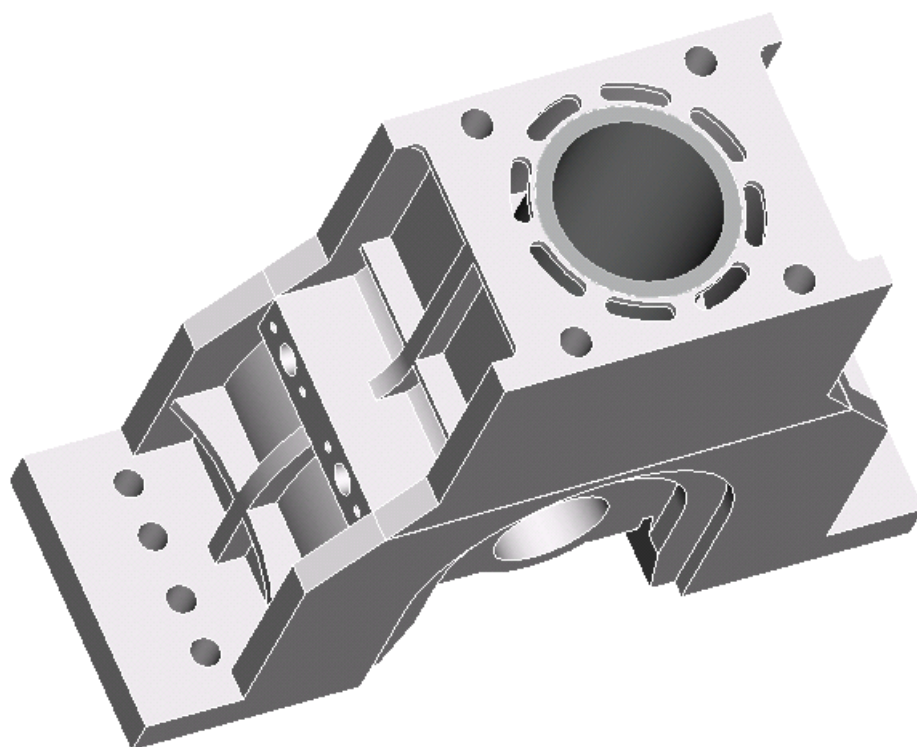
- zkosení hran do $1 \times 45^\circ$.
- vynechání některých přebytných estetických zaoblení .
- vynechání děr pro šroubové spojení (předpokládá se že roub vyplní díru a vnikne tak stejná struktura jako kdyby se jednalo o plný materiál) .
 - a) Vynechání šroubu spodních vík (zaplnění plným materiálem).
 - b) Vyplnění děr pro přichycení bočních krytů .

Pro dynamickou simulaci běhu motoru je takto zjednodušený model postačující.

Na obrázku 55. je kliková skříň (blok motoru) nakreslená tak, jak jsem ji nejprve navrhl v programu Pro/Engineer a na obrázku 56. je už znázorněna kliková skříň zjednodušená.



Obr.55 Přesný návrh klikové skříně



Obr. 56 Kliková skříň zjednodušená, vhodná pro převod do programu ANSYS.

Po provedených úpravách jsem klikovou skříň vyexportoval z programu Pro/Engineeru do programu ANSYS.

6.1. Vytvoření MPK modelu klikové skříně v programu ANSYS.

Program ANSYS umožní vytvoření modelu MKP. V Programu ANSYS můžeme v daném rozsahu upravovat síť konečných prvků, definovat materiálové charakteristiky, okrajové podmínky a samozřejmě počítat zatěžující stavy. Po převedení z programu Pro/Engineer do programu ANSYS postupujeme stejně jako v případě klikové hřídele (viz kapitola 4.1.)

6.1.1. Definování matematických modelů: (viz kapitola 4.1.1)

Pro tvorbu klikové skříně potřebuji následující elementy:

- SOLID 187 (3D konečný prvek s 10 uzly) Obr.39.
- MESH 200 (3D čtyřúhelník s 4 uzly) Obr:41
- LINK 10.

6.1.2. Nastavení materiálových vlastností.

Prvek SOLID187

Materiálové vlastnosti prvku SOLID187 vyplývají z vlastností zvoleného materiálu.

- hustota $\rho = 7850 \cdot 10^{-12} \text{ t} \cdot \text{mm}^{-3}$.
- modul pružnosti v tahu $E = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$.
- Poissonovo číslo $\mu = 0.3$.
- reálné konstanty

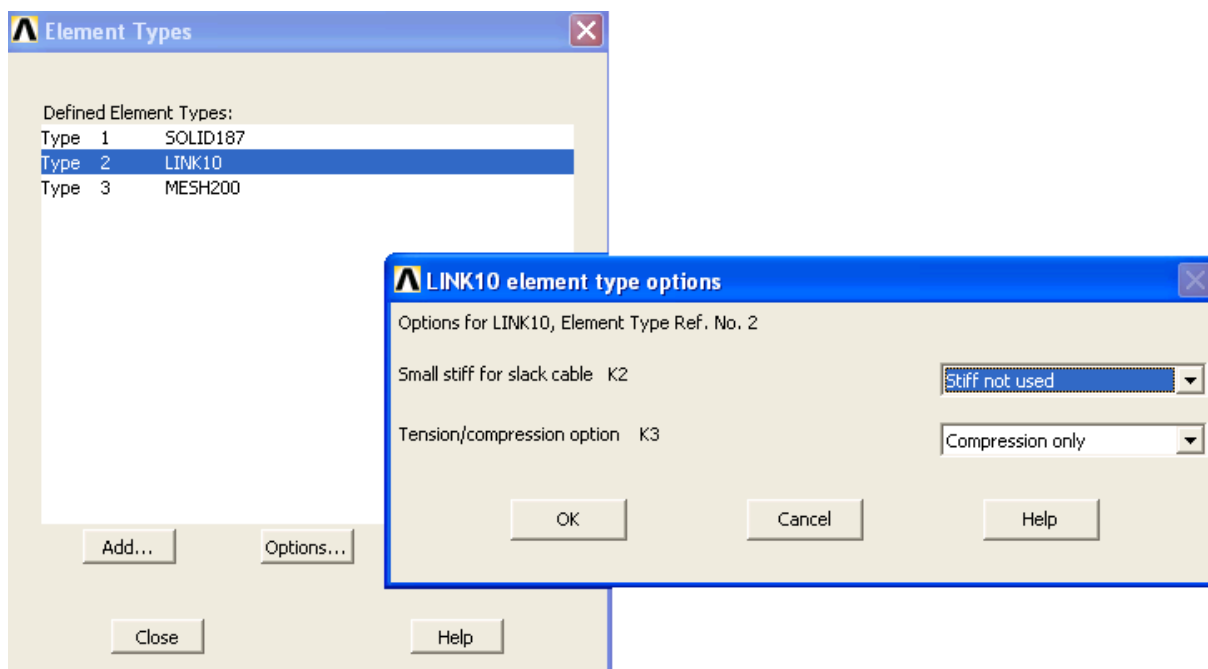
Prvek MESH200

Pro vytvoření sítě na plochách byl použit typ elementu MESH 200. Tento prvek je vhodný pro síťování ve 2-D nebo 3-D prostoru. Prvek může být po využití smazán nebo ponechán na místě, čímž není výsledek výpočtu nijak ovlivněn.

Prvek LINK 10

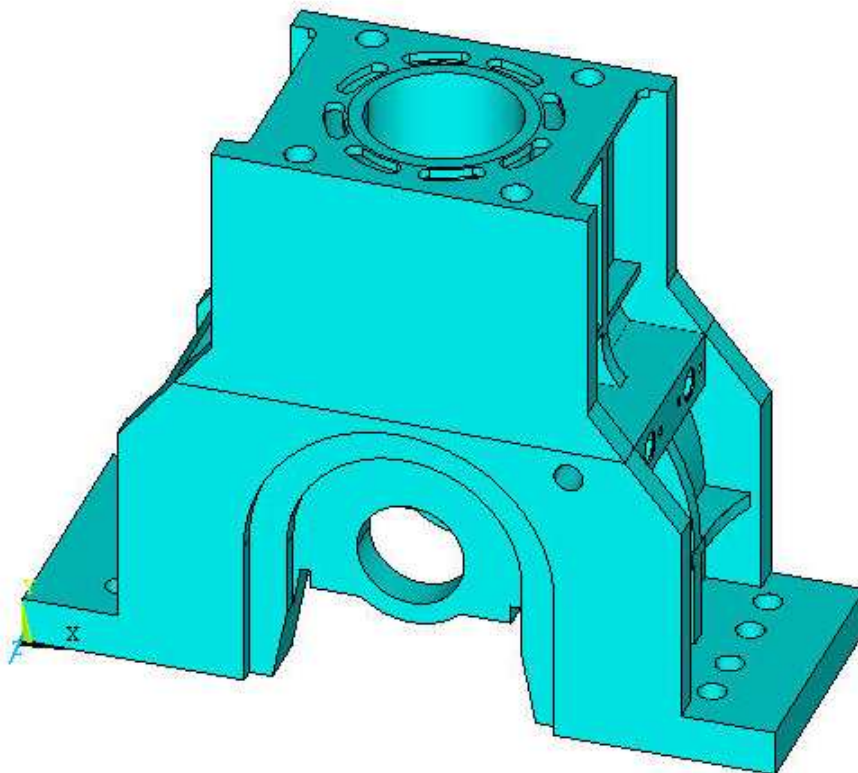
použijeme jako prutovou náhradu (ježek) v místech, kde jsou ložiska a pist. Při zadávání prvku LINK10 musíme přednastavit:

Pension/compression option: na (compression only) „Pouze na kompresi“
tabulka 7.



Tab. 7 Nastavení prvku LINK10.

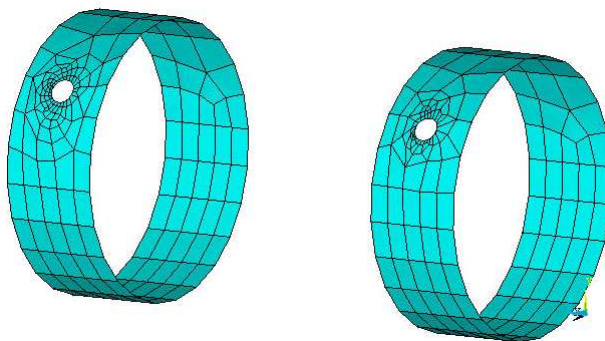
Návrh klikové skříně převedeme z programu ProEngineer do programu ANSYS.
Viz obrázek 57



Obr: 57 Kliková skříň po převedení do programu ANSYS.

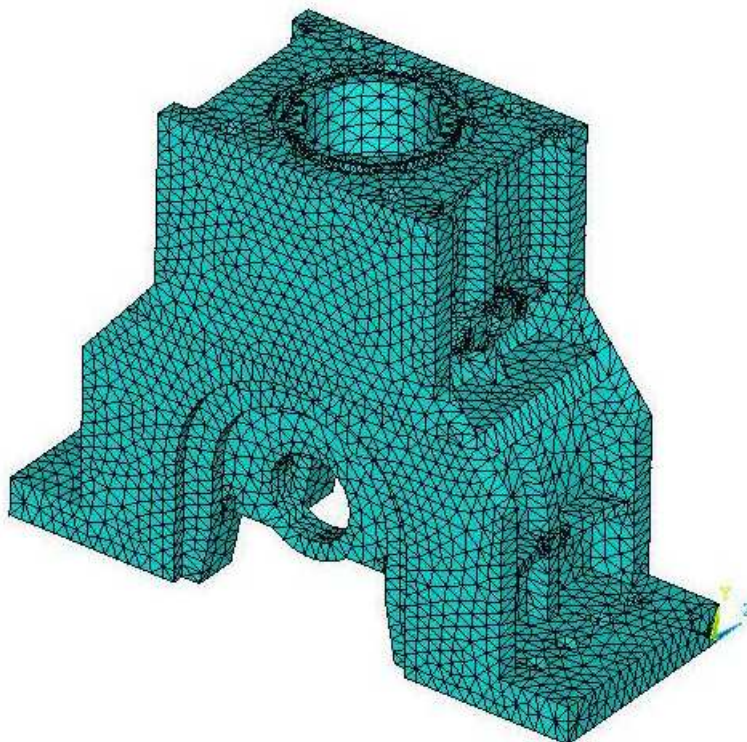
6.1.3. Sestavení sítě elementu.

Po převedení do programu ANSYS a nastavení základních parametrů konstant a vlastností materiálu, můžeme přejít k tvorbě sítě elementů. Předchozími výpočty (viz kapitola 5.) jsem zjistil velikost sil působící na ložiska v klikové skříni. V místech uložení kluzných ložisek je zapotřebí provést jemnější dělení sítě elementů. Zvolil jsem si prvek MESCH 200 a vytvořil v místě ložisek a vložky pístu rovnoměrnou síť. Jak je vidět na obrázku 58. Kvůli mazacím otvorům nešlo v místě kluzných ložisek použít mapovanou síť. Další část, kde jsem musel stejně jako u ložisek klikové skříně provést přesnější síť elementů, je vložka válce. Je to z důvodu přenášení síly od tlaku plynu.



Obr.58 Síť elementů v místě ložisek klikové hřídele.

Na celé klikové skříni vytvořím síť konečno-prvkových elementů pomocí prvku SOLID187. Jako velikost elementu jsem zvolil velikost prvku 8. I Když se číslo 8 zdálo na první pohled poměrně hodně vysoké, po výpočtech se síť jeví jako vyhovující. Viz obrázek 59



Obr. 59 Kliková skříň ze sítě konečných elementů pomocí prvku SOLID187.

Základní údaje po vytvoření sítě konečných elementů prvkem SOLID187

Výsledný MKP model obsahuje prvky viz tab.č.8.

Keypoints	578
Lines (čár)	900
Areas (ploch)	347
Volumes(objemů)	4
Nodes (bodů)	136175
Elements (elementů)	86311

Tab. 8 Počet jednotlivých prvků a elementu

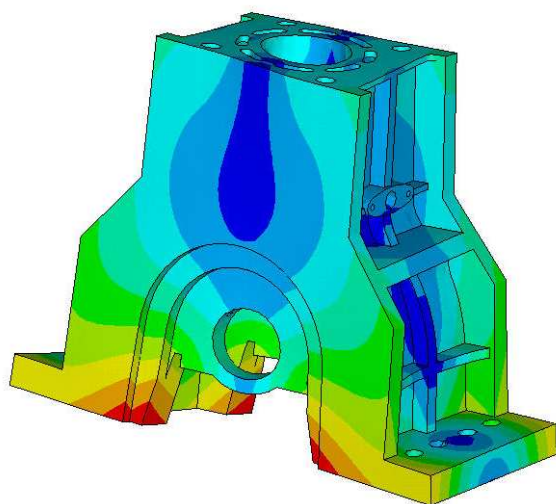
6.1.4. Modální analýza v programu ANSYS.

Prvním výpočtem na MPK modelu bylo stanovení vlastních tvarů a vlastních frekvencí. Zajímalo mě prvních 10 nenulových vlastních frekvencí. Prvních 6 frekvencí po provedení modální analýzy má nulovou hodnotu, takže s nimi nepočítáme. V tabulce 9. jsou znázorněny jednotlivé frekvence. (viz.text Modální analýza kap 4.2)

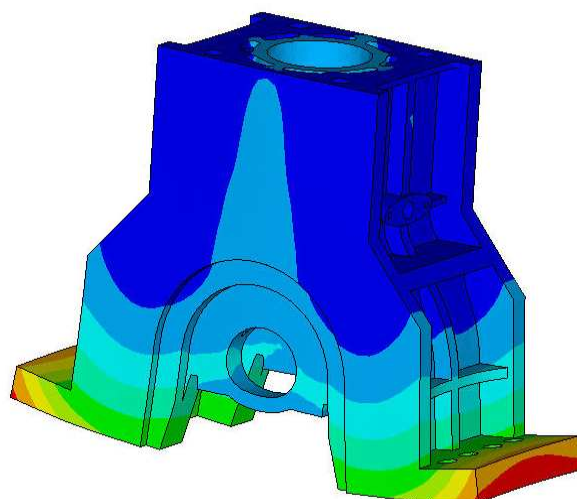
číslo módu	Vlastní frekvence na modelu s interface uzly
1	1313,8 Hz
2	1702,1 Hz
3	2005,8 Hz
4	2383,4 Hz
5	2638,4 Hz
6	3153,8 Hz
7	3368,9 Hz
8	3445,6 Hz
9	3706,7 Hz
10	3715,5 Hz

Tab. 9 Vlastní frekvence bloku motoru.

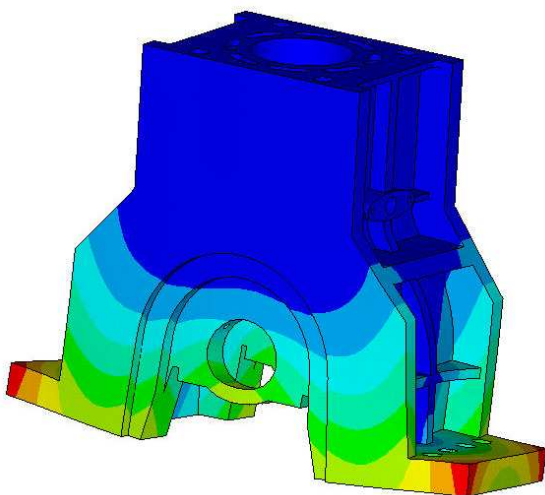
Výsledky modální analýzy v ANSYSu jsou i vlastní tvary modelu. Jedním z výstupů je i animace deformace tvaru, podle kterého se dá velmi přesně odhadnout charakter kmitání, které je při této frekvenci dominantní a nebezpečné pro klikovou skříň. Na obrázcích 60 až 69 jsou znázorněny statické obrázky vlastních tvarů klikové skříně (bloku motoru).



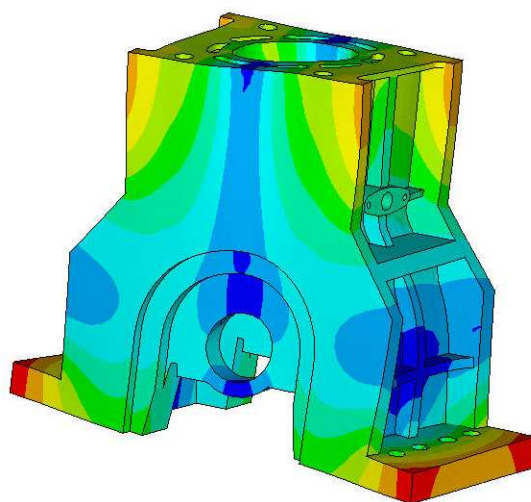
Obr.60 Vlastní frekvence 1313,8 Hz.



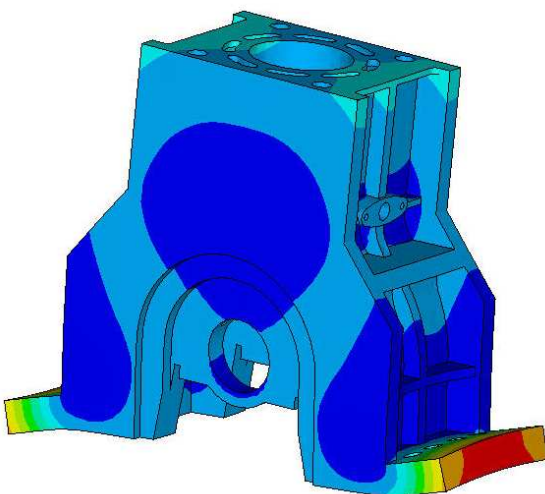
Obr.61 Vlastní frekvence 1702,1 Hz.



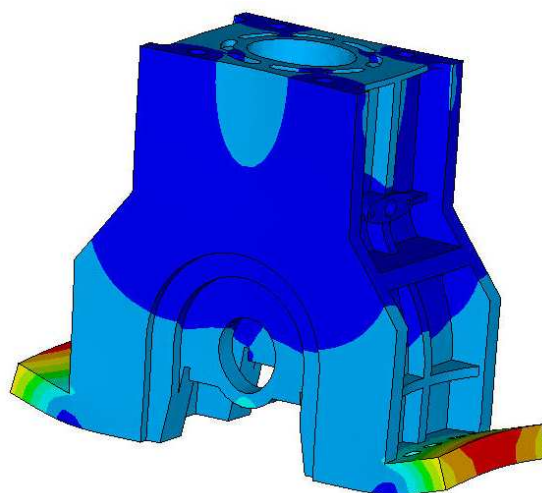
Obr.62 Vlastní frekvence 2005,8 Hz .



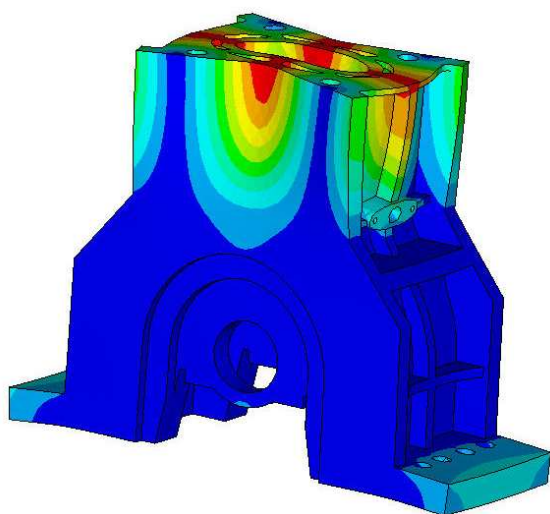
Obr.63 Vlastní frekvence 2383,4 Hz.



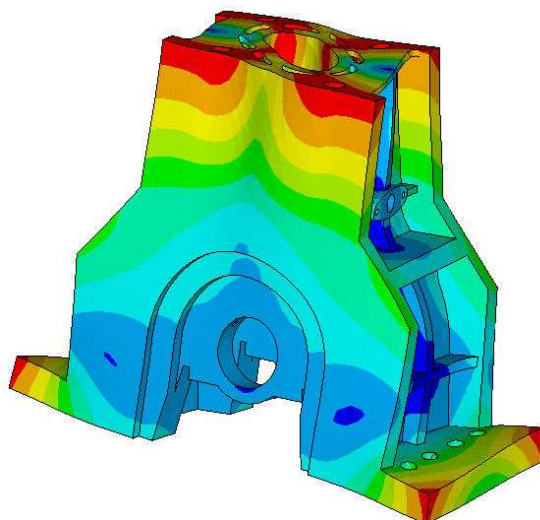
Obr.64 Vlastní frekvence 2638,4 Hz .



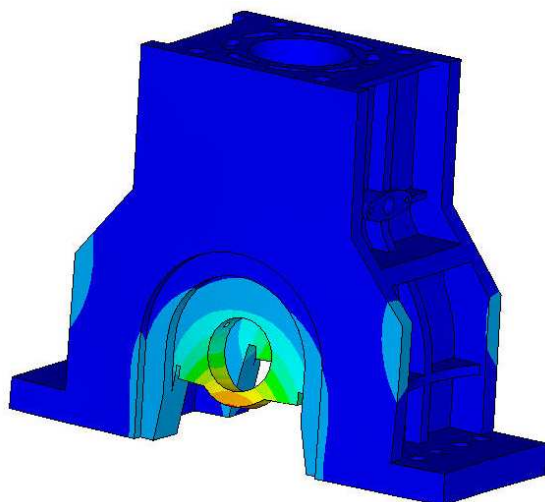
Obr.65 Vlastní frekvence 3153,8 Hz.



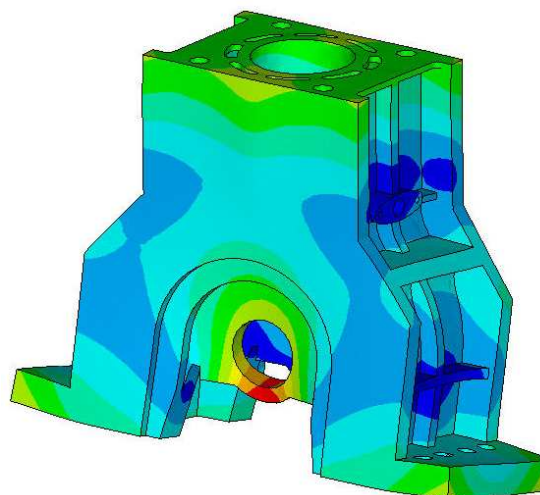
Obr.66 Vlastní frekvence 3368,9 Hz.



Obr.67 Vlastní frekvence 3445,6 Hz.



Obr.68 Vlastní frekvence 3706,7 Hz .



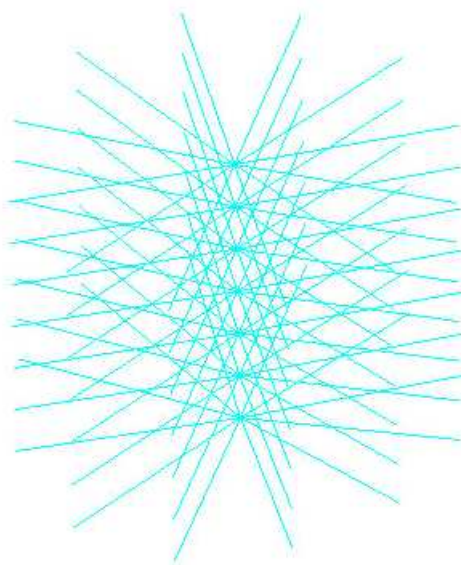
Obr.69 Vlastní frekvence 3715,5 Hz.

Modální analýza

Umožňuje zjistit vlastní frekvenci a tvar součásti při jejím dosažení. Vlastní frekvence jsou důležité pro projektování strojních uzlů, jelikož shoda vlastní frekvence a frekvence pracovní může mít za následek konstruktivní interferenci (rezonanci), a tím možné porušení spojitosti.

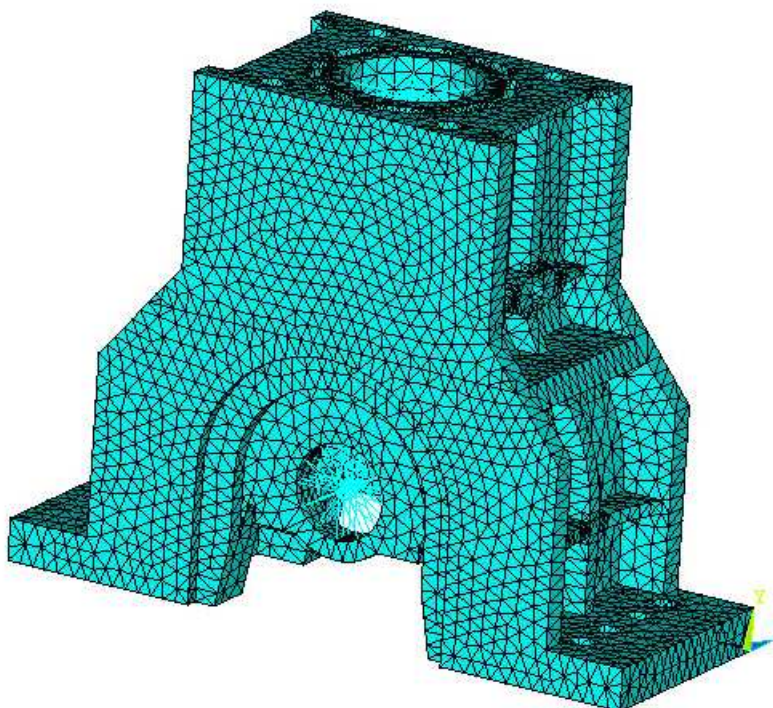
6.1.5. Vytvoření prutových náhrad.

Po modální analýze bloku motoru vytvořím v ložiskách a ve válci prutovou náhradu (obr 70). Na tvorbu prutové náhrady zvolím bilineární prvek LINK10. U prvku LINK10 nastavíme v jeho vlastnostech compression only.(viz. tabulka 5). To mně zabezpečí, že prutová náhrada se bude chovat jako kliková hřídel.(přenáší se pouze tlaková síla)



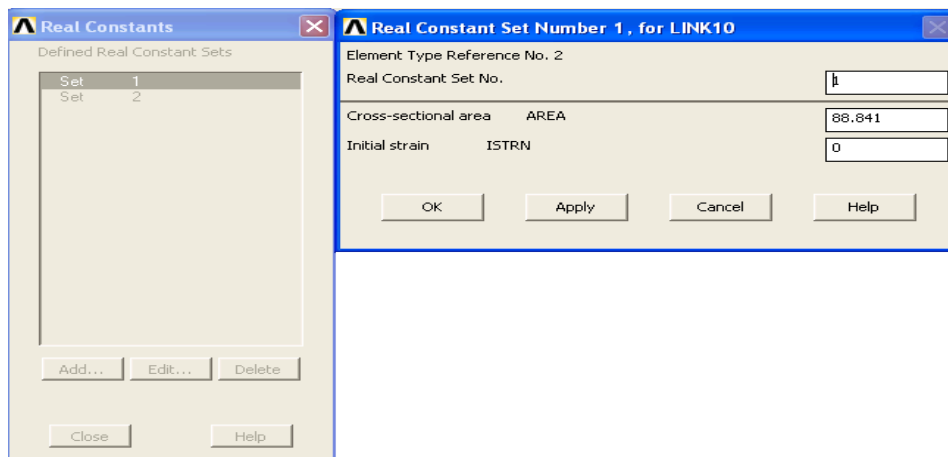
Obr.70 Prutová náhrada z prvku LINK10 pro vložku válce

Kompletní blok motoru s prutovou náhradou jak v ložiscích, tak ve vložce válce. Je vidět na obrázku 71.



Obr.71 Kliková skříň s prutovou náhradou

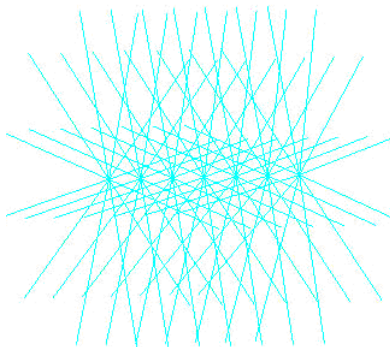
Pro přesný výpočet deformací bloku motoru musím zadat správné průřezy prutových náhrad. Nastavení reálné konstanty pro prvek LINK 10 je znázorněno v tabulce 10. Prutová náhrada z prvku LINK10 je rozdílná jak pro ložiska, tak pro vložku válce.



Tab. 10 Nastavení průřezu prutové náhrady. (AREA).

6.1.6. Nahrazení klikového hřídele v bloku motoru

Klikový hřídel (respektive hřídel a kluzné ložisko) nahradíme pomocí bilineárních prutů.(prutová náhrada obrázek 72). Prvek, který použijeme pro náhradu, se nazývá LINK 10. Jedná se o 3-D bilineární prvek, který má v každém uzlu tři stupně volnosti, a to posuv ve směru osy (x,y a z). Bilineární znamená, že může přenášet buď tah, nebo tlak (dle potřeby).



Obr.72 Prutová náhrada z prvku LINK10 pro ložisko v bloku motoru.

U bilineárních prutů můžeme zadávat pouze délku prutu, typ materiálu a průřez prutu. Pro to je nutné deformaci vzniklou zatížením reálného klikového hřídele převést. To provedeme následovně.

- Klikový hřídel zatížíme tlakem p_z a odečteme zjištěnou deformací Δl ,
- Vypočítám sílu připadající na jeden prut.
- Pomocí vypočtené síly jsem stanovil průměr prutů nahrazující klikový hřídel.

6.1.6.1. Výpočet vlastností prutu nahrazujícího klikový hřídel.

Zvolené vlastnosti materiálu klikové hřídele.

- modul pružnosti v tahu	$E_1 = 2,1 \cdot 10^5$
- Poissonova konstanta	$\mu_1 = 0,3$
- hustota	$\rho_1 = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Parametry modelu v tomto místě

- poloměr otvoru pro uložení klikového hřídele	28,45 mm
- šířka otvoru pro uložení klikového hřídele	$h_o = 19,6 \text{ mm}$
- rozdělení plochy rotoru stýkající se s klikovou hřídelí	
- počet řad ve směru kliky	$n_{rk} = 4$
- počet řad ve směru obvodu otvoru	$n_{ro} = 12$

- vzdálenost mezi řadami.

$$l_r = \frac{h_o}{n_r} \quad (4)$$

$$l_r = 4,9 \text{ mm}$$

- úhel jednoho elementu.

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n_{ro}} \quad (5)$$

$$\Phi = 30^\circ$$

- síla působící na jeden prut

$$F_{pr} = l_r \cdot \int_{-\frac{\varphi}{2}}^{\frac{\varphi}{2}} p_z \cdot r_o \cdot \cos(\varphi) \cdot d\varphi \quad (6)$$

Kde p_z je zatěžovací tlak, v našem případě $p_z = 10 \text{ MPa}$

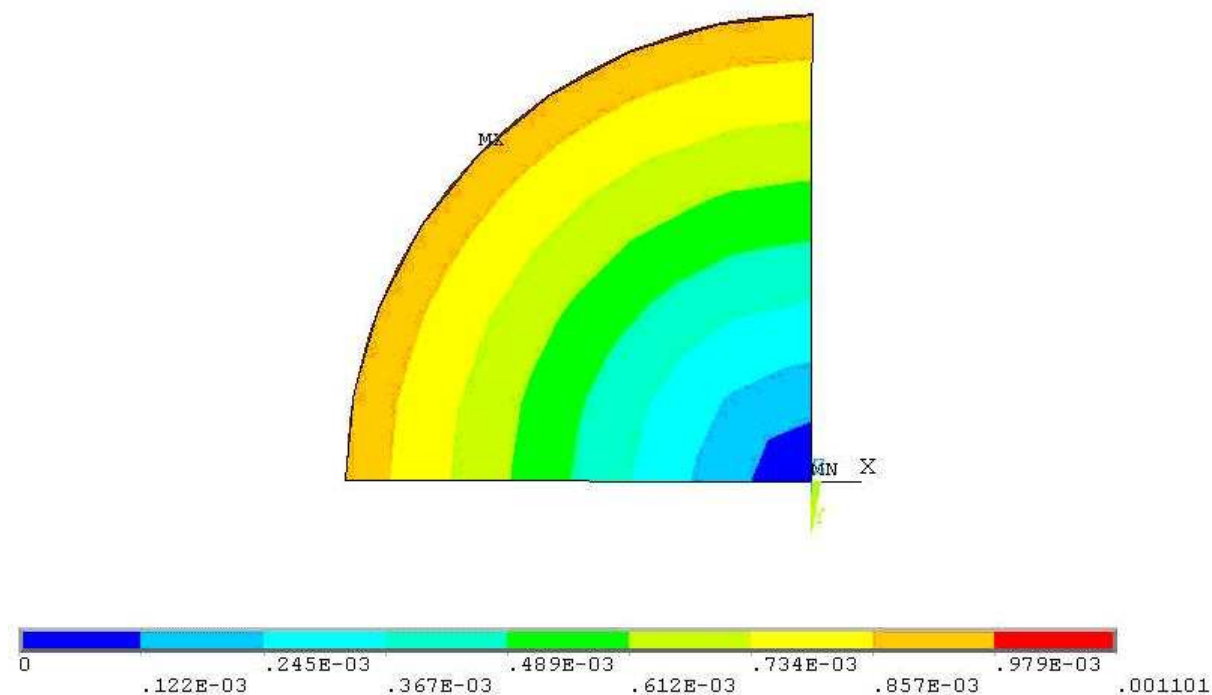
dle rovnice (6) je $F_{pr} = 722 \text{ N}$.

- výpočet průřezu středních prutů

$$S_{pr1} = \frac{F_{pr} \cdot r_o}{E_1 \cdot \Delta l} \quad (7)$$

kde $\Delta l = 0.001101$ mm je posuv uzlu klikového hřídele z programu ANSYS. (obrázek 73).

Dle rovnice (7) je $S_{pr1} = 88,841 \text{ mm}^2$



Obr. 73 Deformace zatíženého hřídele.

Krajní bilineárním prutům byl přiřazen poloviční průřez podle rovnice (8.)

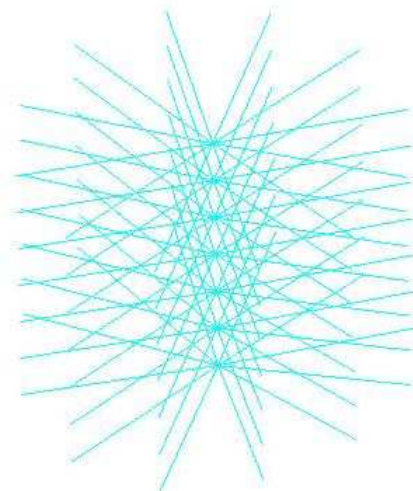
- výpočet průřezu krajních prutů

$$S_{pr2} = \frac{1}{2} \cdot S_{pr1} \quad (8)$$

$$S_{pr2} = 44,42 \text{ mm}^2$$

6.1.7. Nahrazení pístu v bloku motoru

Nahrazení pístní skupiny (respektive vložky a pístu) nahradíme pomocí bilineárních prutů (prutová náhrada obrázek 74.). Prvek, který použijeme pro prutovou náhradu se nazývá LINK 10. Jedná se o 3-D bilineární prvek, který má v každém uzlu tři stupně volnosti, a to posuv ve směru osy (x,y a z). Bilineární znamená že může přenášet buď tah nebo tlak, dle potřeby.



Obr.74 Prutová náhrada z prvku LINK10 pro píst v bloku motoru.

U bilineárních prutů můžeme zadávat pouze délku prutu, typ materiálu a průřez prutu. Pro to je nutné deformaci vzniklou zatížením reálného pístní skupiny převést. To provedeme následovně.

- Stěnu vložky zatížíme tlakem p_z a odečteme zjištěnou deformaci Δl ,
- Dále vypočítaná síla působí jen na prut.
- Pomocí vypočtené síly jsem stanovil průměr prutů nahrazující píst.

6.1.7.1. Výpočet vlastností prutu nahrazujícího píst.

Zvolené vlastnosti materiálu pístu

- modul pružnosti v tahu	$E_l = 2,1 \cdot 10^5$
- Poissonova konstanta	$\mu_l = 0,3$
- hustota	$\rho_l = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Parametry modelu v tomto místě

- poloměr vložky pístu pro uložení pístu	40.8 mm
- šířka otvoru pro uložení pístu	$h_o = 160 \text{ mm}$
- rozdělení plochy rotoru stýkající se s pístem	
- počet řad ve směru posuvu pístu	$n_{rk} = 11$
- počet řad ve směru obvodu otvoru	$n_{ro} = 12$

- vzdálenost mezi řadami

$$l_r = \frac{h_o}{n_r} \quad (4)$$

$$l_r = 14,54545455 \text{ mm}$$

- úhel jednoho elementu

$$\varphi = \frac{360^\circ}{n_{ro}} \quad (5)$$

$$\Phi = 30^\circ$$

- síla působící na jeden prut

$$F_{pr} = l_r \cdot \int_{-\frac{\varphi}{2}}^{\frac{\varphi}{2}} p_z \cdot r_o \cdot \cos(\varphi) \cdot d\varphi \quad (6)$$

Kde p_z je zatěžovací tlak, v našem případě $p_z = 10 \text{ MPa}$

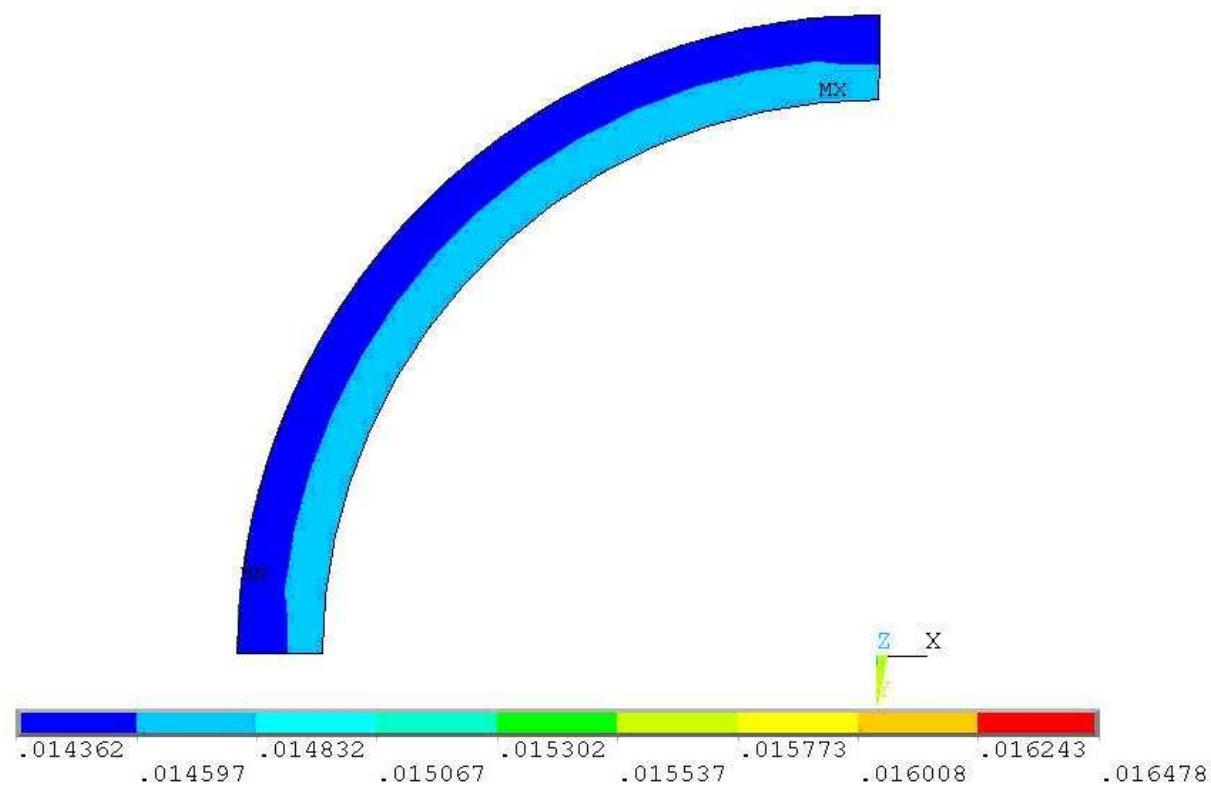
dle rovnice (6) je $F_{pr} = 3071,95 \text{ N}$

- výpočet průřezu středních prutů

$$S_{pr1} = \frac{F_{pr} \cdot r_o}{E_l \cdot \Delta l} \quad (7)$$

kde $\Delta l = 0.016478 \text{ mm}$ je posuv uzlu klikového hřídele z programu ANSYS. (Obrázek 75).

Dle rovnice (35) je $S_{pr1} = 36.22076 \text{ mm}^2$



Obr. 75 Deformace zatíženého pístu.

Krajní bilineárním prutům byl přiřazen poloviční průřez podle rovnice (8.)

- výpočet průřezu krajních prutů

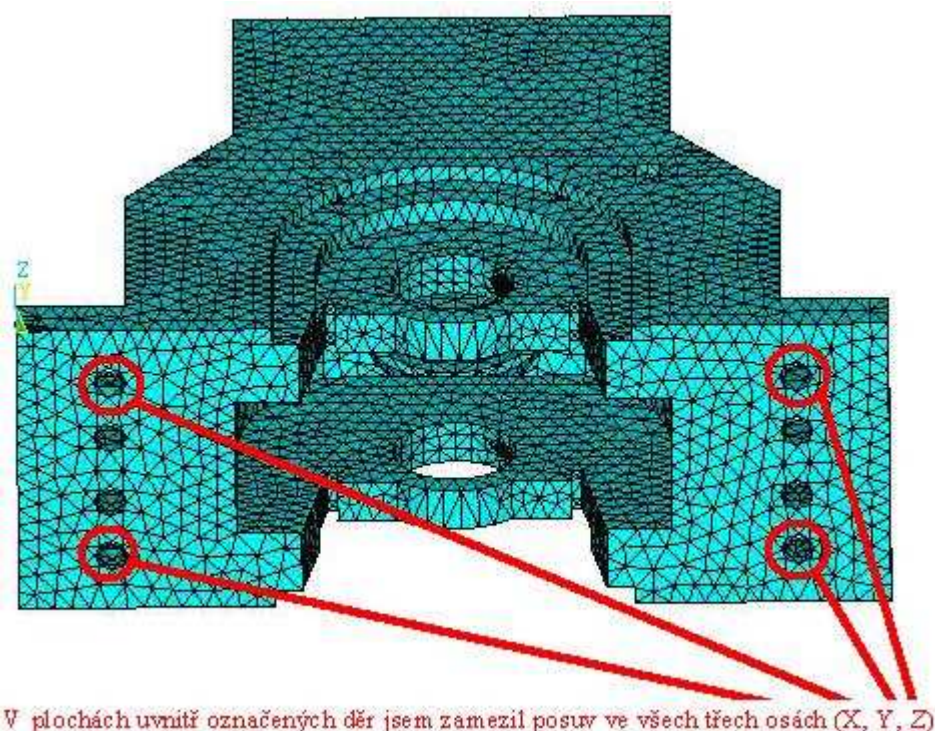
$$S_{pr2} = \frac{1}{2} \cdot S_{pr1} \quad (8.)$$

$$S_{pr2} = 18.11038 \text{ mm}^2$$

Po dosazení průřezů prutové náhrady můžeme začít klikovou skříň zatěžovat

6.2. Uchycení bloku motoru.

Pro uchycení bloku motoru existuje řada možných variant. Já jsem si vybral variantu uchycení bloku motoru za spodní vyvrtané otvory. Místo uchycení bloku motoru je znázorněno na obrázku 76. Tyto vyvrtané otvory slouží pro uchycení motoru na rám. Plochám, jenž se nachází uvnitř vybraných vyvrtaných děr, jsem zamezil posuv ve všech třech osách (X, Y, Z). Tím pádem se nám blok motoru nemůže volně pohybovat a mohu jej začít zatěžovat a sledovat napětí a deformace v kritických místech.



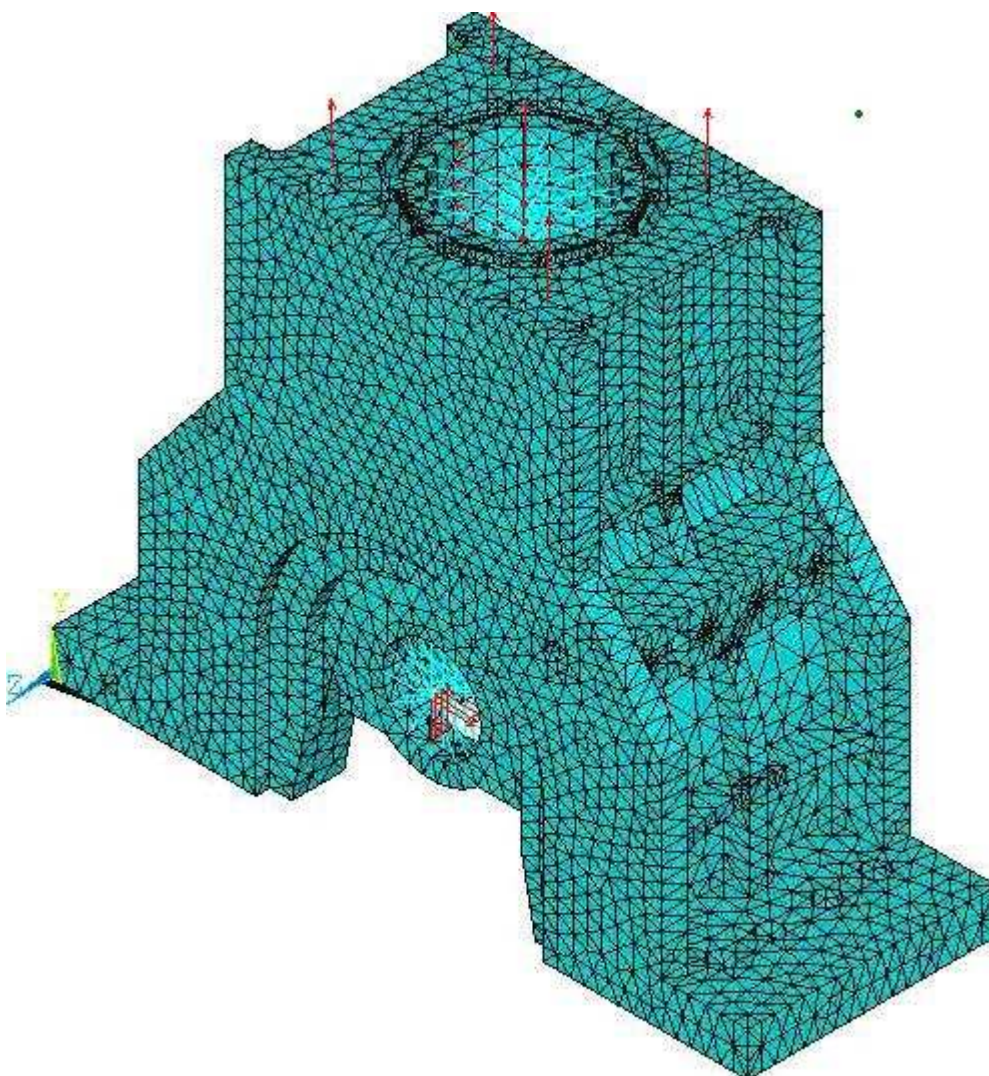
Obr.76 Plochy za které je blok upevněn.

V dalším kroku dosadím složky sil, které jsem získali (tab.11). Při zatížení a simulaci experimentálního motoru v programu ADAMS/Engine. Získané síly dosadím tak, aby přesně simulovali zatížení a deformaci navrženého bloku motoru. Hodnot. Nejprve rozmístím jednotlivé složky sil do středu prutových náhrad v ložiscích.(Viz obrázek 77, 78, 79). V programu ADAMS/Enginee jsem vypočítal síly působící na celé jedno ložisko. V programu ANSYS jsem v místě ložiska nahradil klikovou hřídel prutovou náhradou, která se skládá ze čtyř uzlových bodů. Z toho vyplývá, že vypočtenou sílu v programu ADAMS/Engine musíme vydělit 4 a její čtvrtinovou hodnotu dosadit do každého ze 4 uzlových bodů (výsledné zatížení ložiska musí mít stejnou hodnotu působící síly). (viz obrázek 78). To samé provedeme pro ložisku. Sílu, která působí na vložku válce, nahradíme prutovou náhradou, která se skládá z osmy uzlových bodů. Tím vyplyne, že vypočtenou sílu musíme kvůli přesnému rozmístění rozdělit na 8 sil a každou sílu umístit do jednoho bodu tak, aby výsledné zatížení vložky válce mělo stejnou hodnotu působící síly. (Viz obrázek 79).

Tabulka vypočítané síly z programu ADAMS/Engine:

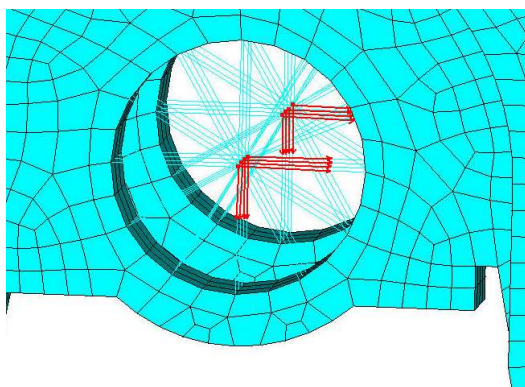
Síla od tlaku plynu	$F = 71261,8 \text{ N}$
Natočení klikové hřídele	$\alpha = 10^{\circ}48'00.$
Síla v ložisku I v ose X	$F = 36108,5 \text{ N}$
Síla v ložisku I v ose Y	$F = -1619,54 \text{ N}$
Natočení klikové hřídele	$\alpha = 10^{\circ}48'00.$
Síla v ložisku II. v ose X	$F = 35877,6 \text{ N}$
Síla v ložisku II v ose Y	$F = -1881,54 \text{ N}$
Natočení klikové hřídele	$\alpha = 10^{\circ}48'00.$

Tab.11 Zatěžující síly vypočtené v programu ADAMS/Engine.

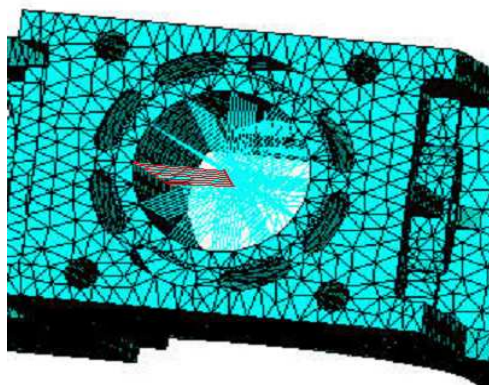


Obrázek 77 Grafické znázornění umístění sil působící na klik motoru

6.2.1. Podrobné znázornění rozmístění působících sil.

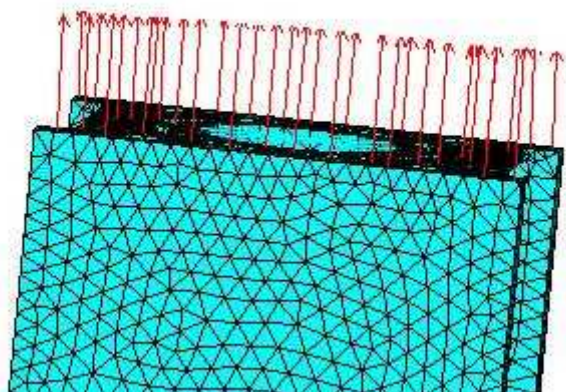


Obr.78 Rozmístění sil působících v hlavním ložisku motoru (osy X, Y).



Obr.79 Rozmístění sil působících v ve vložce válce od tlaků plynů.(osa X)

Reakce od tlaků plynů působící přes hlavové šrouby na blok válců byla aplikována jako tlak na horní dosedající plochu bloku válce.(směr kladné osy Y). Velikost tohoto tlaku je přímo úměrná průměru plochy pístu k této dosedací ploše. Její velikost je 4,9214 MPa.(viz. Obr. 80).



Obr.80 Ukázka rozmístění tlaku na horní dosedající plochu bloku válce

Na obrázcích (78, 79, 80) je znázorněno rozmístění jednotlivých složek síly do hlavních ložisek klikové skříně,a rozmístění sil působících od tlaků plynu.

6.3. Napětí na bloku motoru.

Po dosazení všech vypočtených sil provedu výpočet napětí na bloku motoru. Na obrázku 80. je graficky znázorněn celý blok motoru po zátěžném stavu. V následujících obrázcích je graficky znázorněno napětí, které působí na navržený blok motoru po zatížení všemi silami.

6.4. Podmínka plasticity HMM

Pro reprodukci výsledků výpočtů namáhání jsem vybral podmínku plasticity HMM. Podle této podmínky nastane mezní stav pružnosti, při zatěžování materiálu v základním strukturním stavu, když napětí v oktaedrické rovině dosáhne mezní hodnoty τ_{OK} , která je materiálovou charakteristikou. Oktaedrickou rovinou je myšlena rovina, jejíž normála svírá s hlavními osami stejné úhly.

Atematická formulace této podmínky zní:

$$\sigma_K = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (9)$$
$$\tau_{OK} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sigma_K$$

Výsledky výpočtů, tudíž hodnoty redukovaného napětí jsou pozorovány se smluvní mezí kluzu zvoleného materiálu a z nich je počítána bezpečnost dané součásti. Bezpečnost součásti je dána vztahem:

$$k_K = \frac{\sigma_K}{\sigma_{red}}, \quad (10)$$

Kde σ_{red} je vypočítané maximální napětí a σ_K je materiálovou charakteristikou (v mém případě smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$). Napětí je počítáno podle vztahu.

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (11)$$

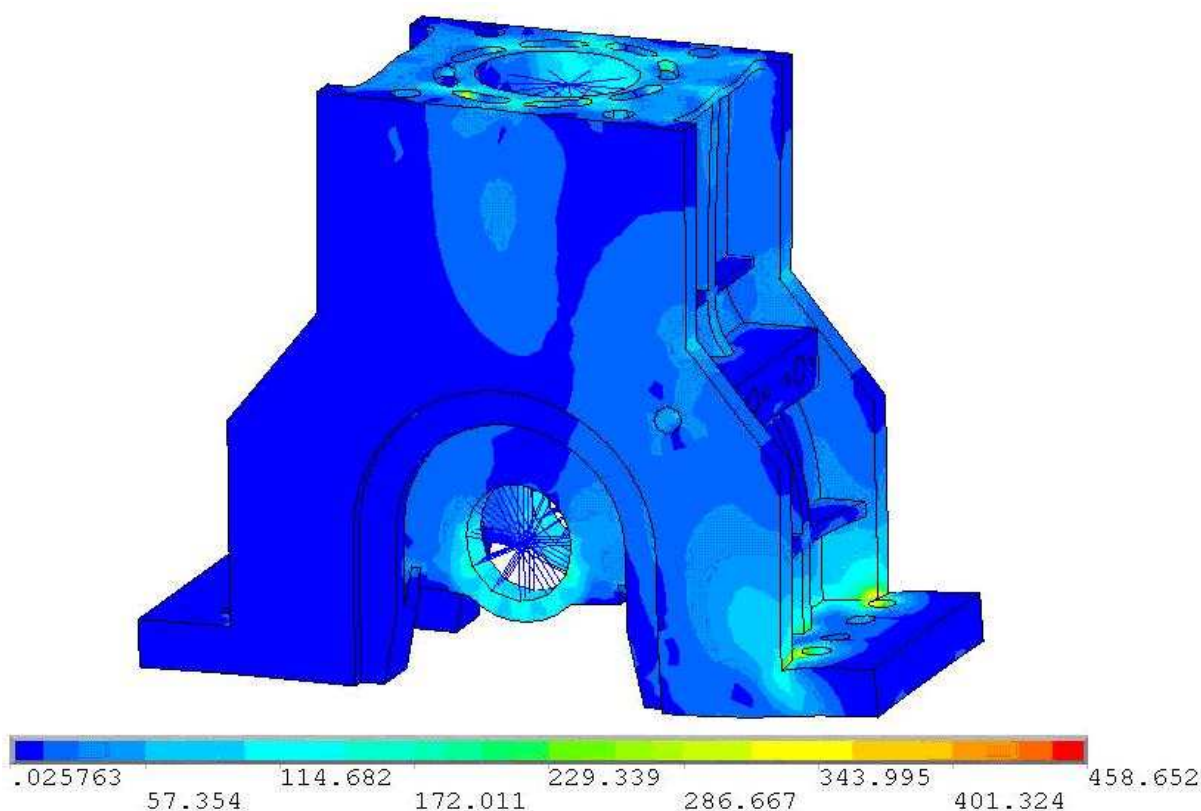
Je si ovšem nutno uvědomit, že redukované napětí je fiktivní napětí přiřazené obecné prostorové napjatosti a tudíž ho nelze přímo změřit a verifikovat.

Při výpočtech namáhání byl u všech částí motoru použit jako konstrukční materiál ocel.

Vlastnosti oceli jsou uvedeny v Tab.12

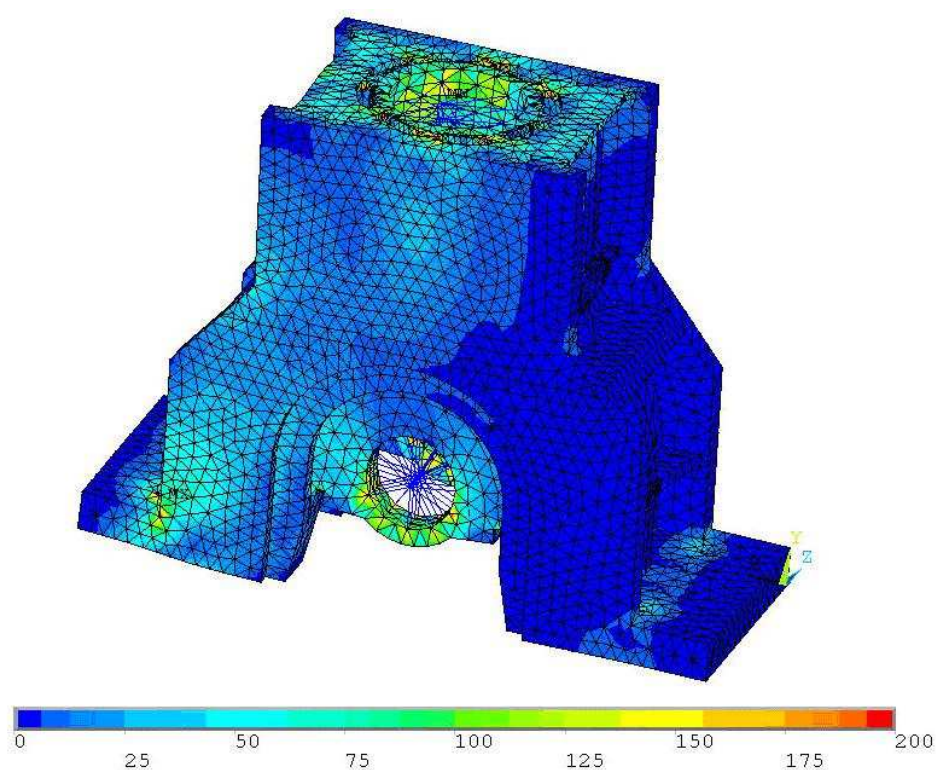
Modul pružnosti v tahu	$E_1 = 2,1 \cdot 10^5$
Poissonova konstanta	$\mu_1 = 0,3$
Hustota	$\rho_1 = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Mez kluzu	$R_{p0,2} = 235 \text{ Mpa}$

Tab.12 vlastnosti oceli.

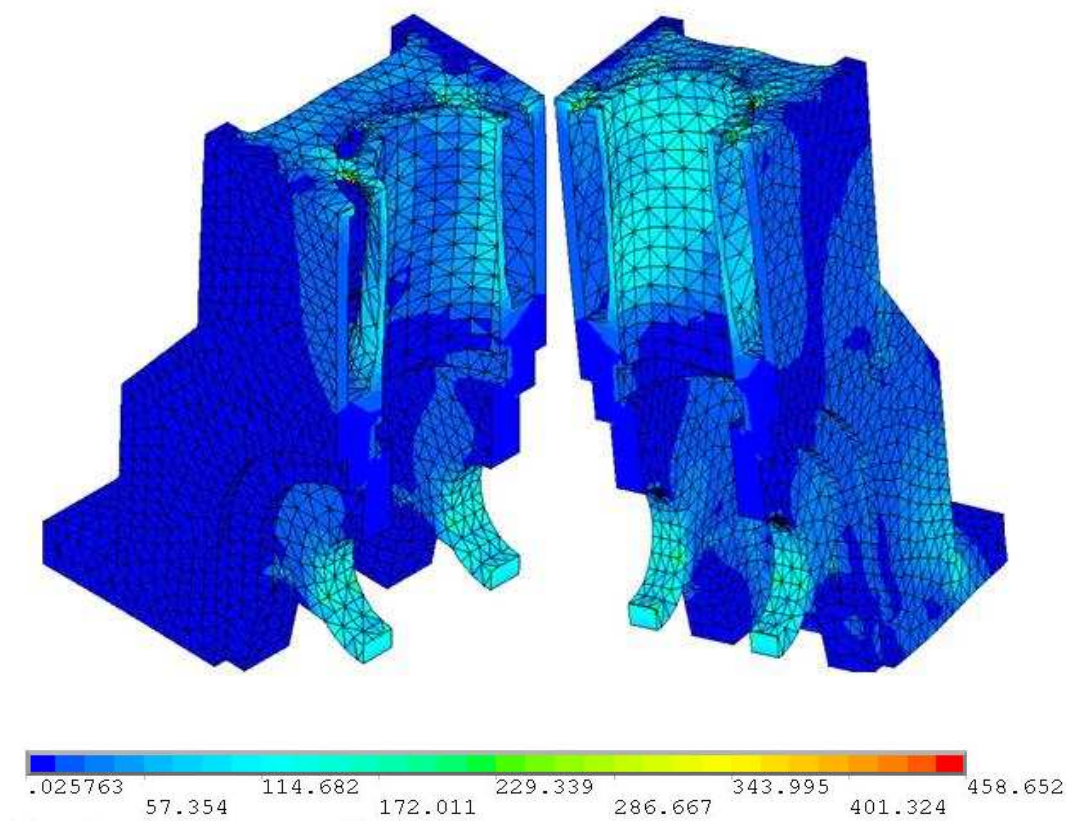


Obr. 81 Napětí na bloku motoru po zatížení vypočtenými silami. [MPa].

Na grafickém znázornění jsou znázorněna kritická místa napětí. Pro přesnější znázornění napětí zobrazím kritická místa v detailech (viz obrázek 84 až 94). Na následujícím obrázku 82.

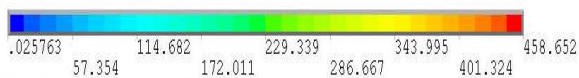
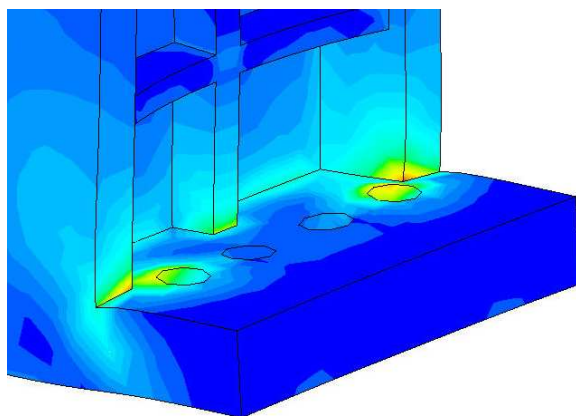


Obr. 82 Grafické znázornění napětí na bloku motoru při zvětšení citlivosti znázorněné stupnicí v rozsahu od (0-200) [MPa].

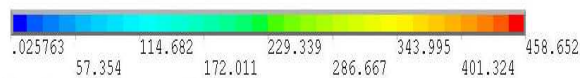
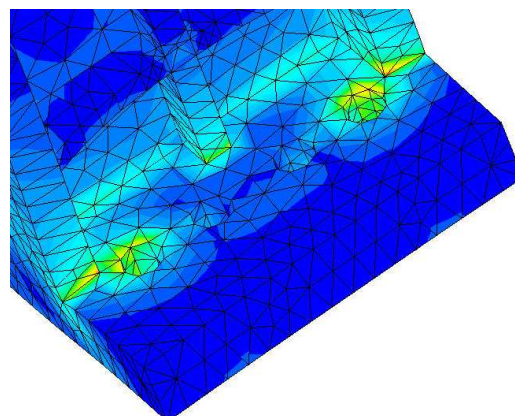


Obr.83 Graficky barevně znázorněné napětí uprostřed bloku motoru. [MPa].

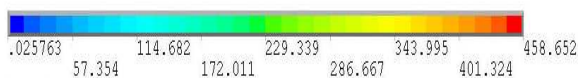
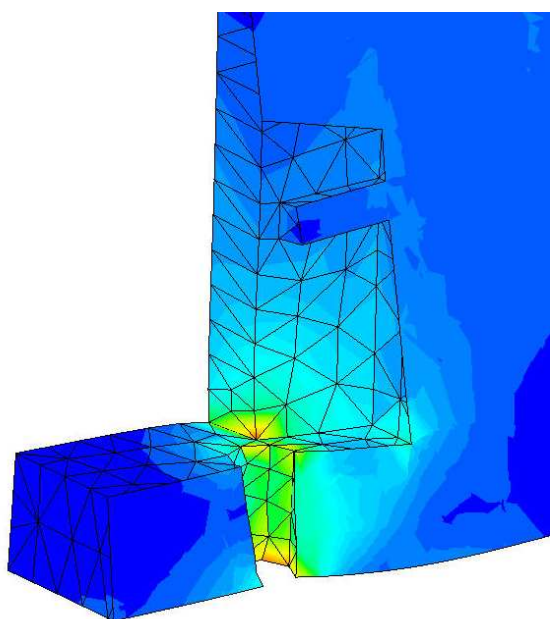
6.4.1. Detailní znázornění napětí v místech upevnění šroubu v bloku motoru.



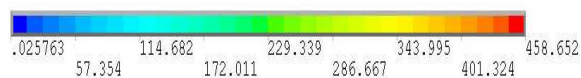
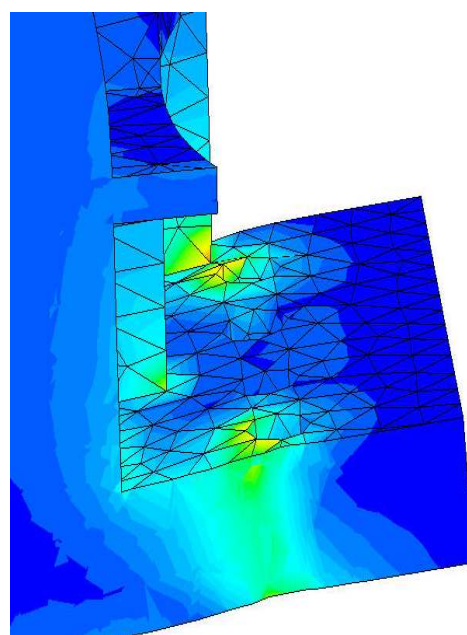
Obr. 84 Napětí v oblasti šroubu. [MPa].



Obr. 85 Napětí v oblasti šroubů II. [MPa].

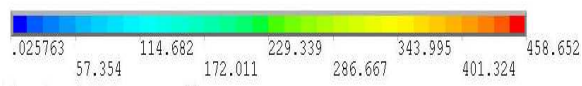
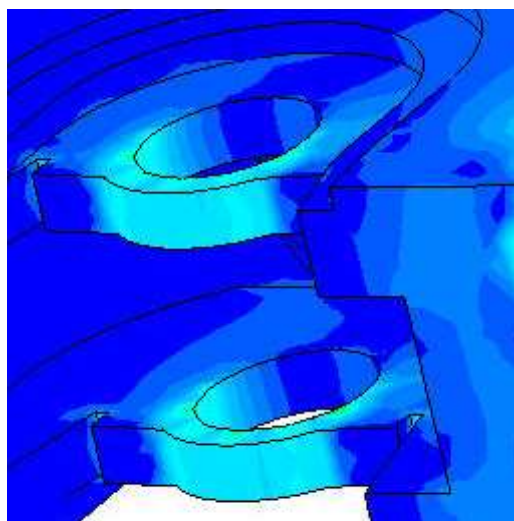


Obr. 86 Napětí uvnitř šroubu v řezu. [MPa].

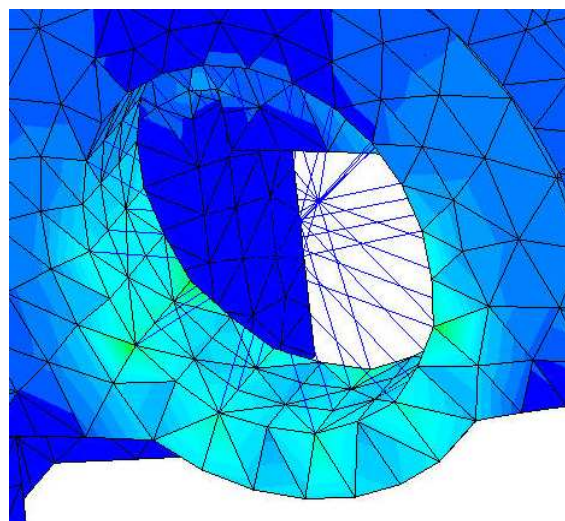


Obr. 87 Napětí v řezu před šroubem. [MPa].

6.4.2. Detailní znázornění napětí v místech ložisek bloku motoru.

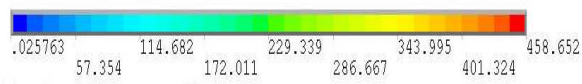
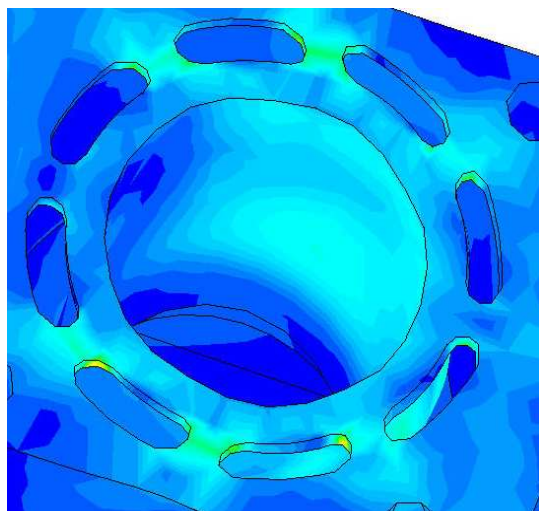


Obr. 88 Napětí v místech ložisek. [MPa].

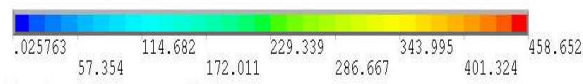
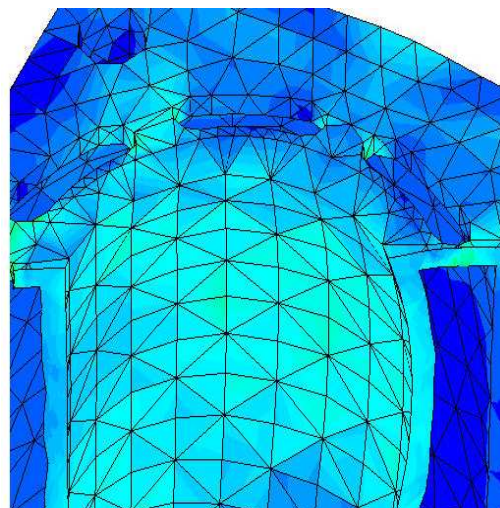


Obr.89 Napětí v místech ložisek II. [MPa].

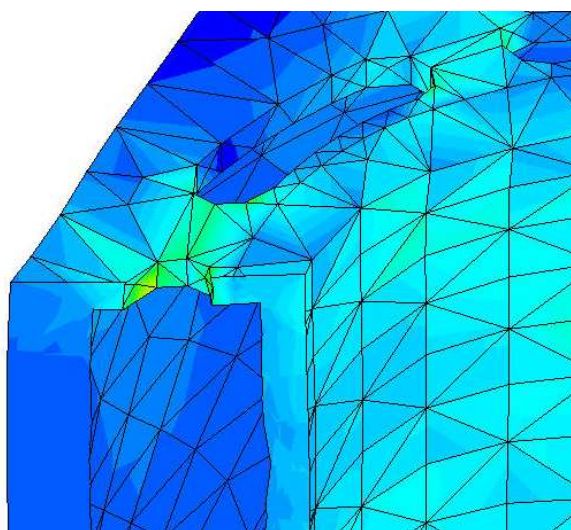
6.4.3. Detailní znázornění napětí v místech upevnění vložky válce v bloku motoru.



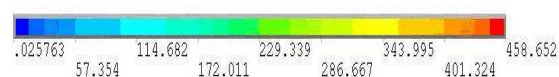
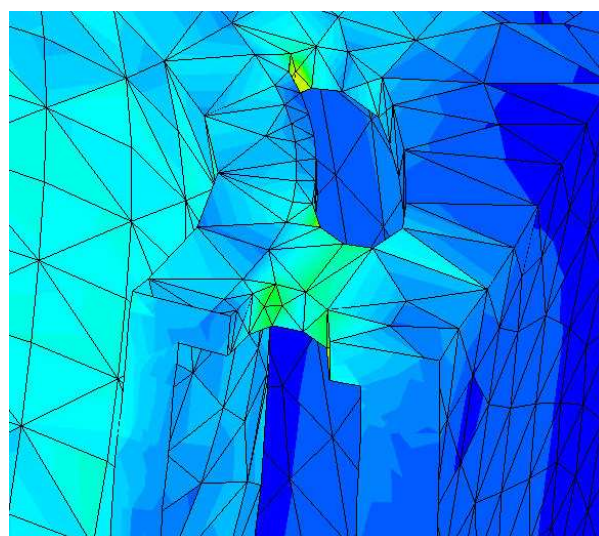
Obr.90 Napětí v místě vložky válce.[MPa].



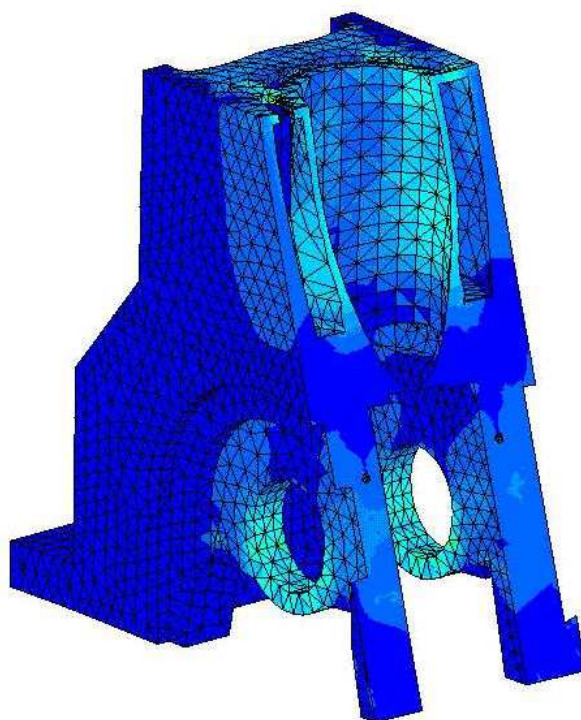
Obr.91 Napětí v místě vložky válce [MPa].



Obr. 92 Napětí v místě vložky válce [MPa].



Obr. 93 Napětí v místě vložky válce [MPa].

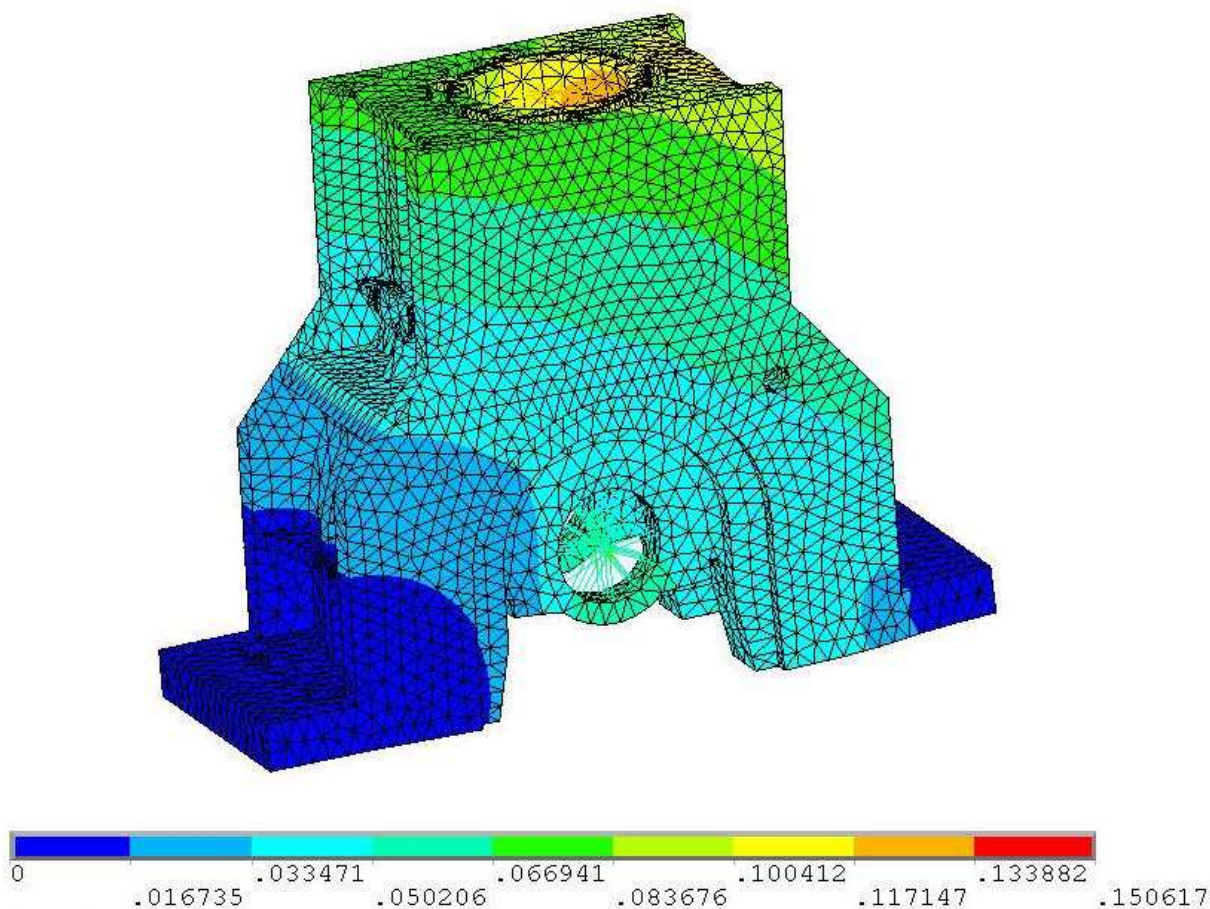


Obr. 94 Napětí v místě vložky válce. [MPa].

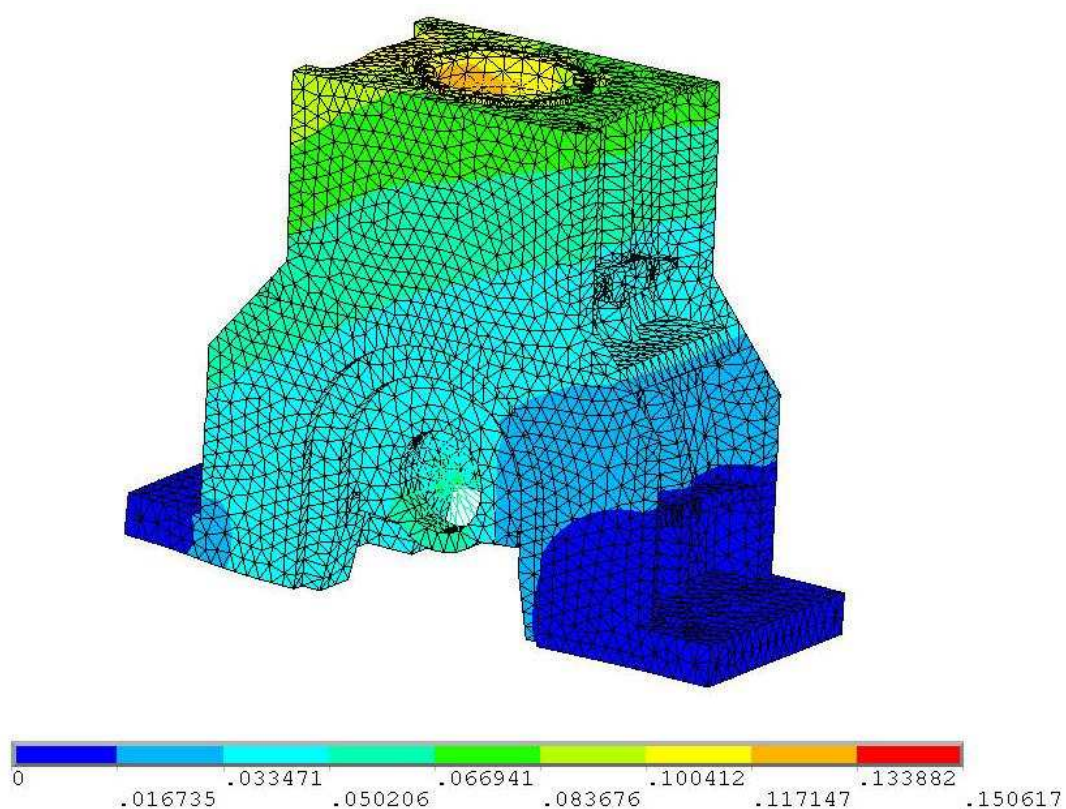
Největší hodnoty napětí se vyskytují v místech upevnění bloku motoru, v hlavních ložiskách, po obvodu vložky válce. Tyto vysoké (vyšší) hodnoty napětí, jsou způsobeny prutovou náhradou a tudíž nevypovídají o skutečné hodnotě napětí v těchto místech. Pro určení skutečného napětí by bylo nutné řešit tato uložení jako kontaktní úlohu, což je ovšem náročné z hlediska vstupních dat a chování hydrodynamického ložiska. Všechny napětí, které se vyskytli jsou ale poměrně malé a navržený blok motoru vykazuje velmi vysokou tuhost. Čímž plně splňuje naše požadavky pro experimentální pokusný motor.

6.5. Deformace bloku motoru.

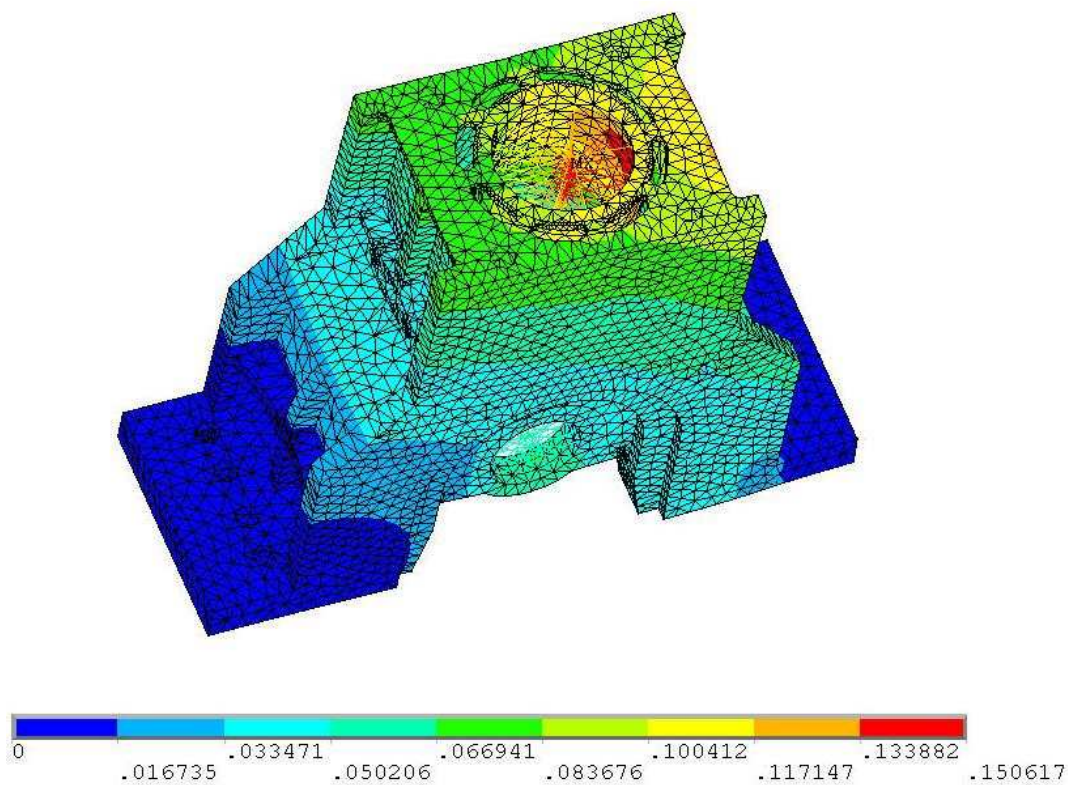
Na obrázcích (95, 96 a 97). je graficky znázorněn blok motoru po zatížení. Největší deformace, které blok motoru dosahuje mají hodnotu 0.150 mm. Tyto deformace jsou ovšem v místě, kde jsme použil prutovou náhradu. Místo, kde je umístěna prutová náhrada nemůžu považovat za nejkritičtější a to z následujícího důvodu. Prutová náhrada se nechová stejně jako hydrodynamické ložisko. Ve skutečnosti je deformace v těchto místech mnohem menší. Jako nejkritičtější místo jsem vybral horní část válce. Zde se deformace dosahují hodnoty přibližně někde kolem 0.1 mm. (viz grafické znázornění pod každým obrázkem). Navržený blok motoru vykazuje velikou pevnost., což plně splňuje naše požadavky na experimentální blok motoru.



Obr.95 Grafické znázornění deformace bloku motoru. [mm]



Obr.96 Grafické znázornění deformace bloku motoru. [mm]



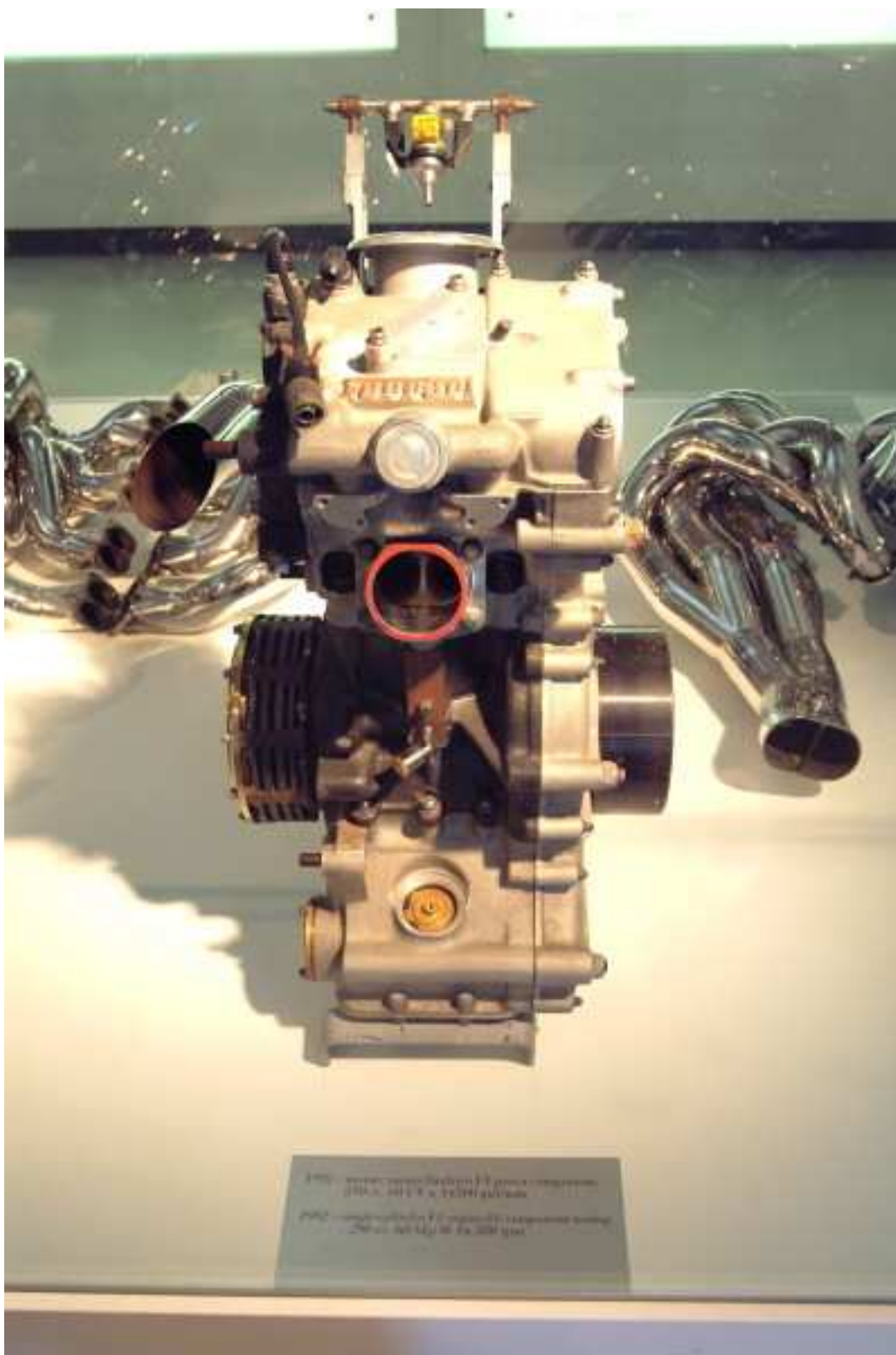
Obr.97 Grafické znázornění deformace bloku motoru. [mm]

7. Alternativní konstrukce.

Konstrukce experimentálních motorů se dost liší. Při hledání a porovnávání jednotlivých konstrukcí jsem zjistil že veškeré informace jsou velmi těžce dostupné. Je to dáno tím že se jedná o motory, které se vyskytují pouze ve zkušebnách. Podrobnější fotografie těchto motorů jsou takřka nedostupné. Na následujících obrázcích jsou fotografie zkušebních experimentálních motorů..(viz obrázek 98, 99, 100). Pro porovnání na obr.101 je znázorněn můj navržený experimentální motor.



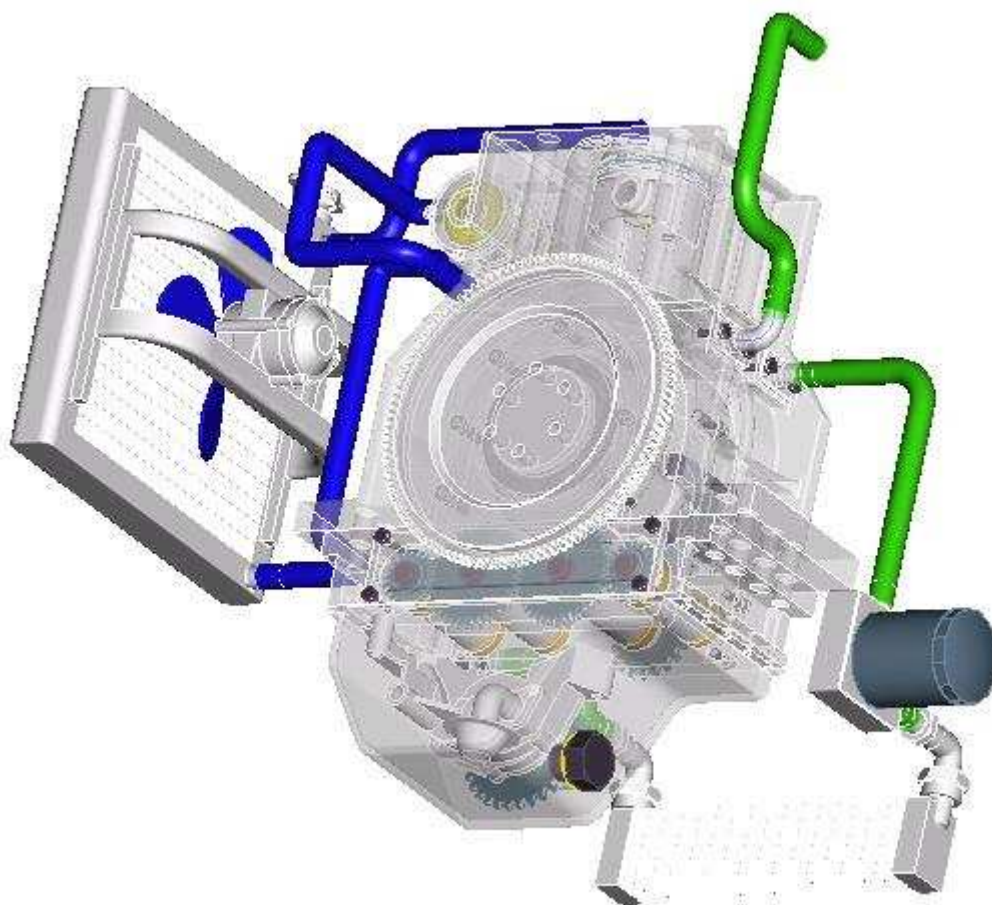
Obr.98 Zkušební jednoválcový motor automobilky Lotus.[8.]



Obr. 99 Zkušební jednoválcový motor automobilky Ferrari [9.]



Obr.100 Zkušební jednoválcový experimentální motor. [10.]



Obr. 101 Vlastní předběžný návrh experimentálního jednoválcového motoru.

8. Závěr.

V diplomové práci jsem se zabýval konstrukcí zážehového experimentálního motoru. Nejprve jsem provedl dostupnou rešerši jednotlivých typů konstrukcí spalovacích motorů. Ze získaných informací jsem stanovil základní rozměry a vytvořil 3-D konstrukční návrh experimentálního motoru. Jelikož výroba vlastní klikové hřídele je po finanční stránce nákladná, rozhodl jsem se pro použití již vyrobeného klikového hřídele. Zvolil jsem si klikový hřídel, který pochází z osobního automobilu Škoda Octavia 1.9 TDi. Pro mé účely jsem musel klikový hřídel speciálně upravit (zkrátit pouze na jedno zalomení hřídele).

Po úpravě klikové hřídele jsem přistoupil k návrhu klikové skříně. Návrh vychází z rozměrů upraveného klikové hřídele. Jelikož se jedná o experimentální motor, rozhodl jsem použít dělenou konstrukci bloku motoru (zvlášť válec a zvlášť kliková skříň).

Při tvorbě válce jsem použil variantu s vloženou mokrou vložkou. Vložka je v dolní části osazena, těsněna pomocí měděného těsnění a v horní části je vedena přímo vnitřní stěnou válce. Takto navržená konstrukce válce umožní měnit vložku dle vlastní potřeby. V praxi to znamená, že můžu měnit objem mého experimentálního motoru. Změnu průměru vložky mohu provést v rozsahu od 81.6 mm až 90 mm. (Zdvihový objem válce se tím mění z 500 cm³ až na 607 cm³).

Po navržení jednotlivých částí motoru jsem sestavil předběžný návrh celého motoru a jeho příslušenství (vyvažovací hřídele, olejové čerpadlo, řemenice, olejový chladič, olejový filtr, vodní chladič, ventilátor, vodní čerpadlo, setrvačnick, příruby atd.). Pro přesný návrh motoru by bylo zapotřebí více času a musely by se provést ještě další optimalizace. Cílem mé diplomové práce bylo zaměřit se jen na klikovou hřídel a klikovou skříň navrhovaného motoru.

Geometrický model klikové hřídele jsem převedl na výpočetní matematický model. Navržený 3-D model v programu Pro/Engineer jsem zpracoval do nejmenších detailů. Z hlediska následujících výpočtů byl ale takto detailní model zbytečný, protože to vedlo k nadměrnému počtu elementů, což mělo za následek mnohem delší výpočetní čas a větší nároky na výpočetní techniku. Vzhledem k rozsahu diplomové práce jsem přistoupil k účelnému upravení a zjednodušení modelu klikové hřídele. Vytvořený model jsem převedl z programu Pro/Engineer do programu ANSYS. První kontrolní výpočet provedený v programu ANSYS byla modální analýza. Modální analýzu jsem prováděl pro získání vlastních frekvencí a tvarů kmitů. Zajímalo mě prvních 10 nenulových vlastních frekvencí. Všechny vypočtené hodnoty odpovídaly mým předpokladům tuhého klikového hřídele.

Pro výpočet sil, které budou působit na klikovou hřídel a na klikovou skříň, jsem zvolil výpočtový software Multi-Body systém (MBS), konkrétně program MSC.ADAMS/Engine. V programu MSC.ADAMS/Engine jsem vytvořil virtuální model experimentálního motoru. Do vytvořeného modelu jsem se rozhodl zadat tlak plynů ve válci přeplňovaného motoru. Tímto výpočtem jsem si ověřil, jak je má konstrukce klikové hřídele a klikové skříně tuhá. Tlaky, které jsem použil, dosahují takřka dvojnásobných hodnot oproti tlakům běžného atmosférického zážehového motoru. Po zadání potřebných parametrů jsem prováděl výpočet sil v bloku motoru při 3000 ot/min.

Postup pro vytvoření klikové skříně je stejný jako při konstrukci klikové hřídele. Nejprve jsem navrhnul základní tvar v programu Pro/Engineer a zpracoval jej do konstrukčních detailů. Z hlediska následujících výpočtů byl ale takto detailní model zbytečný. Vedlo to k nadměrnému počtu elementů, což mělo za následek mnohem delší výpočetní čas. Proto jsem přistoupil k účelnému upravení a zjednodušení modelu. Vytvořený model bloku

motoru jsem převedl z programu Pro/Engineer do programu ANSYS. V místech uložení kluzných ložisek a ve vložce válce bylo zapotřebí provést jemnější dělení sítě konečno-prvkových elementů. Následně na celé klikové skříni vytvořím síť konečno-prvkových elementů prvkem SOLID187. V ložiskách a ve válci vytvořím prutovou náhradu (obr 70). Na tvorbu prutové náhrady zvolím bilineární prvek LINK10. První kontrolní výpočet provedený v programu ANSYS byla modální analýza. Zajímalo mě prvních 10 nenulových vlastních frekvencí, a to z důvodu vlastních tvarů kmitů.

Dalším krokem, který následuje, je uchycení bloku motoru. Pro uchycení existuje řada možných variant. Já jsem si vybral variantu uchycení bloku motoru za spodní vyvrtané otvory. Místo uchycení je znázorněno na obrázku 76. Po uchycení dosadím složky sil, které jsem získal (tab.11) při zatížení a simulaci experimentálního motoru v programu ADAMS/Engine. Tyto síly dosadím do bloku motoru tak, aby přesně simulovaly zatížení a deformaci. Po dosazení všech vypočtených sil provedu výpočet napětí a deformací navrženého bloku motoru.

Vypočtené napětí (max. 428,652 MPa) a deformace (max. 0.150 mm) jsou velmi malé. Je to zapříčiněno velmi robustní konstrukcí klikové skříňe, což je i zároveň hlavní požadavek kladený na experimentální motor. Návrh klikové skříňe byl záměrně navrhnut předimenzovaně, protože se tu naskýtal možnost navržený motor přepřehovat turbodmychadlem. Jedinou možností odlehčení je zúžení stěn profilu bloku motoru. Všechna napětí a deformace, které se vyskytly, jsou ale poměrně malé a navržený blok experimentálního motoru vykazuje velmi vysokou tuhost, čímž plně splňuje naše požadavky na něj kladené. Cílem mé navržené konstrukce je především celková univerzálnost. Při řešení mé diplomové práce jsem splnil všechny body zadání.

9. Použité zdroje:

- [1.] Ing.Jaroslav Rauscher,CSc Vozidlové motory, studijní opory, FSI VUT Brno 2003.
- [2.] Ing.Jaroslav Rauscher,CSc Ročníkový projekt, studijní opory, FSI VUT Brno 2005.
- [3.] Prof.Ing.František Vlk,DrSc. Vozidlové spalovací motory. Nakladatelství a vydavatelství Mokrohorská 34, 644 00 Brno.
- [4.] MSC SOFTWARE: ADAMS 2005 R2 User manuál, 2005.
- [5.] www.auto.cz
- [6.] www.autorevue.cz.
- [7.]http://images.popularhotrodding.com/hotnews/0712phr_09_s%2Bchevrolet_corvette_supercharged_ls9%2Bsupercharger_and_intercooler.jpg&imgrefurl.
- [8.]http://www.grouplotus.com/staticfiles/img/app/casestudies/hardcoded/RT_optical_Page2.jpg&imgrefurl.
- [9.]http://lh3.ggpht.com/_Gq3B_4Dk8SY/RcTJPcapXGI/AAAAAAAAAHo/va0_Xr-YT4Q/DSC_0117.JPG&imgrefurl.
- [10.]http://www.fev.com/data/images/2_2_4_singleCylindEng_2.jpg&imgrefurl.