



Středoškolská technika 2014

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Motor Bentley BR2

Rostislav Brabec

Střední průmyslová škola strojnická, Olomouc

tř. 17. listopadu 49, OLOMOUC

Prohlašuji, že tuto práci vypracoval samostatně a použil jen uvedené prameny a literaturu.

Datum: 15.5. 2014

Brabec R.

Podpis

Poděkování:

Je namístě poděkovat mému poradci Ing. Vladimíru Houšťovi a také ostatním pedagogům, kteří mi věnovali svůj čas, především Ing. Borisi Šmárikovi a Mgr. Karlu Neumannovi.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také Ing. Ladislavu Červinkovi a Mgr., Bc. Zdeňku Přikrylovi za jejich věcné připomínky a srdečnou podporu.

Obsah

1	Úvod	4
2	Motory Bentley	5
2.1	Walter Owen Bentley	5
3	Rotační motory	7
3.1	Historie	7
3.2	Zástupci rotačních motorů (výběr)	8
3.3	Bentley BR2	10
3.4	Shrnutí rotačních motorů	13
3.4.1	Výhody.....	13
3.4.2	Nevýhody.....	13
4	Model motoru Bentley BR2 ve měřítku 1/4.....	14
4.1	Základní části motoru	14
4.1.1	Kliková hřídel	14
4.1.2	Kliková skříň.....	14
4.1.3	Válec a hlava válce	15
4.1.4	Vačková skříň a uchycení vrtule.....	15
4.1.5	Tlačná skříň a její víko.....	16
4.1.6	Ojnice.....	17
4.1.7	Písty	17
4.1.8	OHV rozvod.....	18
4.1.9	Sání motoru.....	19
4.1.10	Karburátor	19
4.1.11	Olejové čerpadlo	20
4.1.12	Zážehový systém.....	20
4.1.13	Palivová nádrž.....	21
4.1.14	Vrtule	21
5	Výpočtová část.....	22
5.1	Síla působící na píst.....	24
5.2	Změna výkonu motoru v závislosti na změně rozměrů	25
6	Ekonomická část	28
7	Závěr	30

1 Úvod

Žijeme v 21. století. Tato doba se vyznačuje mnohými věcmi, které by si člověk před několika lety nedokázal ani představit. Lidstvo dosáhlo mnohých úspěchů, a to jak na poli vědy, tak i techniky. Lidé nezůstali jen na Zemi, ale odlepili se od ní a nyní zkoumají vesmír pomocí meziplanetárních družic a obřích teleskopů, které dohlédnou na milióny světelných let daleko. Lidé mohou společně vymýšlet dříve nepředstavitelné věci díky dnes už běžným počítačům, které jsou již velice výkonné, a přitom se vlezou do mikroskopického rozměru. Cestují na značné vzdálenosti a to nevídanou rychlostí. Mladí lidé v dnešní době už tyto věci považují za samozřejmost a nemají problém s jejich užíváním. Avšak úroveň, na které dnes žijeme, tu nebyla od pradávna. Všechno vzniklo díky velkému úsilí a snaze našich předků posunout se dále. A tak i mým přáním je přiblížit, o čem si lidé ještě před sto lety mysleli, že je vrcholem technického umu. To, co my dnes považujeme jen za historii, to kdysi bývalo nejmodernějším typem zařízení, které dokázalo člověka vynést až do nebe.

Cílem mé práce je přiblížit historii a princip fungování leteckých rotačních motorů. Představíme si hlavní zástupce těchto motorů a také jejich výrobce. Poté se zaměříme na názorný popis částí motoru na modelu k tomuto účelu vytvořenému.

2 Motory Bentley

Když se řekne „Bentley“, tak si většinou každý okamžitě vybaví výkonné a noblesní automobily. Pravdou však je, že pod tímto názvem se skrývá daleko více. Motor Bentley BR2 (Bentley Rotary) je příkladem technické dovednosti a pečlivosti našich předků, kteří nám v něm předali další vývojový článek leteckých motorů, abychom je dnes mohli mít lepší a výkonnější. Smutné ale je, že v době jeho vzniku zuřila největší a nejstrašnější válka, kterou do té doby člověk poznal.

Bentley BR2 byl motorem ve své době hojně používaným. Tento typ motoru se u letadel používal od svého vzniku ještě dalších deset let, avšak dnes je již pouze muzejním kouskem. Jeho konstruktérem byl Walter Owen Bentley.

2.1 Walter Owen Bentley

Tento velice talentovaný mladý inženýr pocházel z rodiny podnikatele Alfreda Bentleyho. Narodil se 16. září roku 1888 v Hampsteadu jako nejmladší z devíti dětí. Díky otcově podpoře se stal učněm v Great Northern Railway v Doncasteru, kde získal řadu zkušeností v konstruování složitých strojů. Odtud vyšel v roce 1910 jako strojvedoucí, ale rozhodl se pokračovat ve studiu teoretického inženýrství na King's College v Londýně. V roce 1912 se připojil ke svému bratrovi (Horace Millner Bentley) ve firmě s názvem *"Bentley and Bentley"* a společně prodávali francouzské vozy značky DFP. Bentley přišel na to, že pokud vyrobí písty do motorů ze slitiny hliníku namísto litiny a oceli, dosáhne vyššího výkonu. S tímto objevem dosáhl nevídaných výsledků.



Obrázek 1: W. O. Bentley

Po vypuknutí války navázal W. O. Bentley spolupráci s ministerstvem letectví Velké Británie. Na jeho podnět začali vyrábět ve společnosti Rolls-Royce první letecký motor Eagle s hliníkovými písty na místo ocelových. Eagle dosáhl překvapivých výsledků a Bentleyho nápad začal být průlomový. Díky tomu dostal nabídku, na základě licence ministerstva letectví se společností Clerget-Blin, aby přepracoval a vylepšil motor Clerget 9B.

Společnost Clerget-Blin byla ochotna Bentleymu poskytnout tým vývojářů, aby tento motor přivedl k dokonalosti. A tak se v továrně v Chiswicku na počátku roku 1916 zrodil

první typ rotačního motoru Bentley – Bentley BR1. Mohutnější a hlavně výkonnější BR2 následoval koncem roku 1917. Za tuto práci získal po válce Řád britského impéria, a také byl oceněn Královskou Komisí pro ocenění vynálezců 8 000 librami. [10]



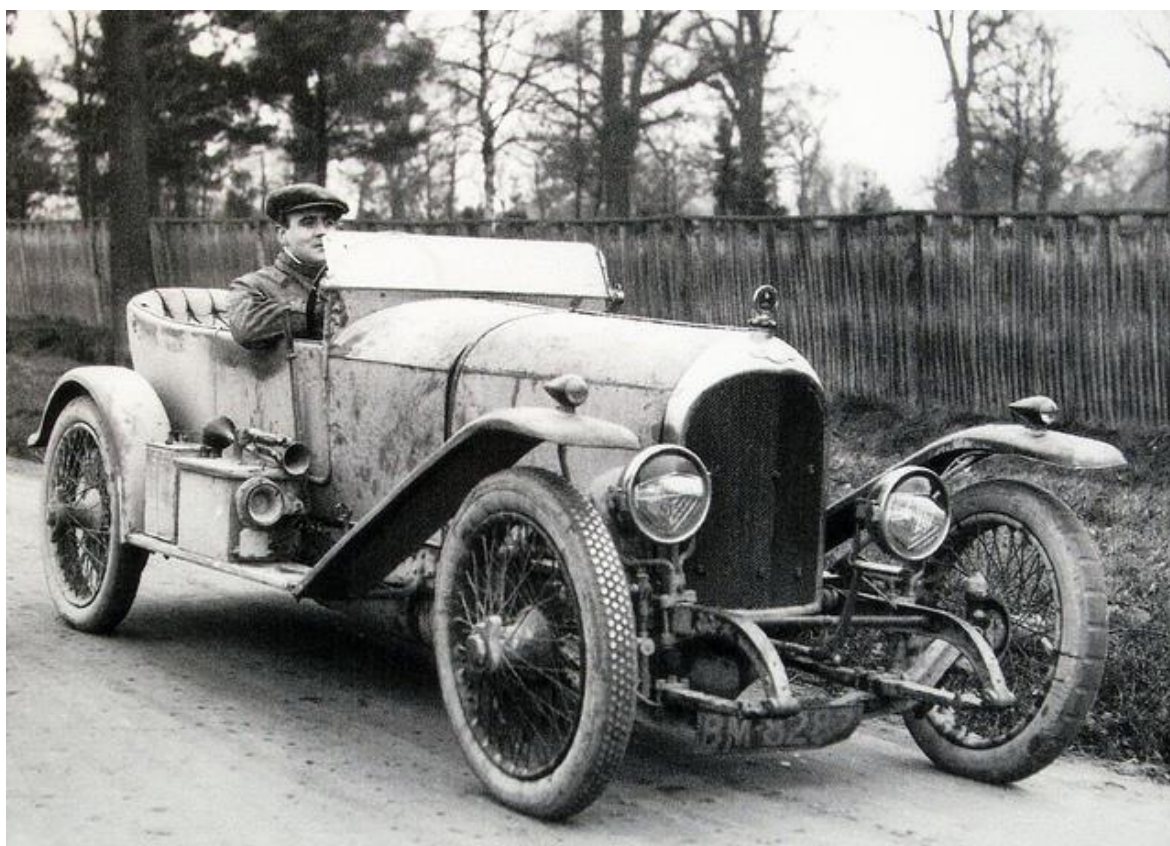
Obrázek 2: Bentley BR2

Po skončení války a těchto úspěchů na poli letectví se začal W. O. Bentley spolu se svým bratrem naplno věnovat automobilovému průmyslu. Tato kapitola jeho života byla provázena také mnoha úspěchy, ale i nezdary. W. O. Bentley se nakonec dožil úctyhodných 82 let, zemřel 13. srpna 1971.



BENTLEY

Obrázek 4: logo Bentley - současnost



Obrázek 3: W. O. Bentley 20 léta

Obr.3: [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://goo.gl/0Ld9Dt>

Obr.4:[cit.2014-03-30].Dostupné z: <http://goo.gl/9M608t>

3 Rotační motory

Protože Bentley BR2 je motor rotační, přibližme si nyní vývoj a vlastnosti těchto zařízení. Rotační motory mají do hvězdy uspořádané válce, které rotují kolem klikové hřídele zároveň s pevně připevněnou vrtulí. Počet válců musí být vždy lichý. Zpravidla se využívaly v letectví jako pohonné jednotky. Tento druh motorů se však již nepoužívá a můžeme jej spatřit pouze v muzeích.

3.1 Historie

Dá se říct, že tyto motory stály u vzniku moderního letectví a značnou mírou přispěly k jeho vývoji. Tento typ motoru poprvé uviděl světlo světa již v roce 1908, kdy francouzská společnost *Motor Company Gnome* představila svůj první rotační 7-válec s označením *Gnome 7 Omega*. Tento motor byl následován řadou designů od mnoha výrobců, z nichž většina byla úspěšná. [13]

Vypuknutím 1. sv. války zažily tyto motory nevídané rozšíření. Díky svému hojnému použití se vyráběly v mnoha státech Evropy a často to byla výroba na základě licence. Například již zmíněná společnost *Motor Company Gnome* se v roce 1915 spojila se společností *Société des Moteurs Le Rhône*, a vytvořili tak uznávaný celek *Société des Moteurs Gnome et Rhône* známý spíše jen jako *Gnome et Rhône*. Takto vzniklá společnost byla schopna produkovat na tehdejší dobu nejmodernější letecké pohonné jednotky po celé Evropě, aby tak podpořila válečné běsnění. Její motory se skrze licenci vyráběly v Německu, USA, Velké Británii, v Rakousku i ve Švédsku. [3]



Obrázek 5: Gnome et Rhône

A právě v Německu bylo v té době potřeba obstarat početné letectvo, jehož vývoj byl zatím ještě v plenkách. O to se postarala společnost *Motorenfabrik Oberursel* sídlící nedaleko Frankfurtu nad Mohanem. Tato společnost se zaměřovala na výrobu lokomotiv, automobilů a v neposlední řadě i leteckých motorů. Díky licenci, kterou společnost získala na výrobu motorů *Gnome et Rhône*, se záhy stala nejproduktivnější společností na výrobu leteckých motorů v celém Německém císařství. Vyráběly se zde kopie motorů *Le Rhône*,



Obrázek 6:
Motorenfabrik Oberursel

Obr.5: [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://goo.gl/LRveqc>

Obr.6: [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://goo.gl/WLTs7Z>

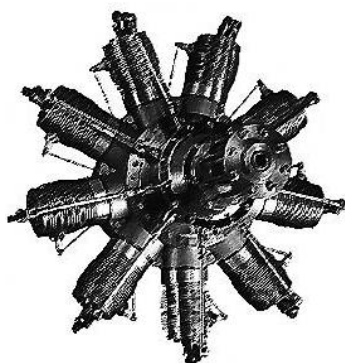
které ovšem byli následně označovány jako motory Oberursel. [4]

Další významnou společností, která vyráběla rotační motory, byla francouzská strojní společnost *Société Clerget-Blin et Cie* známá jen jako *Clerget-Blin*. Tato společnost byla založena v roce 1913. Jejimi zakladateli byli inženýr a vynálezce Pierre Clerget a průmyslník Eugène Blin. Během 1. sv. války společnost vyráběla především letecké motory jak ve Francii, tak skrze licenci i v Británii. Jejich motory měly veliký ohlas a byly vyráběny v tisících kusech. Snad nejznámějším zástupcem rotačních motorů od tohoto výrobce je motor Clerget 9B, který se stal předchůdcem našeho Bentley BR2. [5]

CLERGET-BLIN & C^{ie}

3.2 Zástupci rotačních motorů (výběr)

Gnome Monosoupape

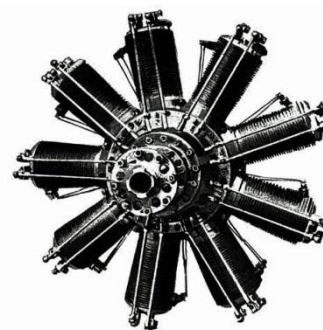


Obrázek 7: Gnome Monosoupape

Gnome Monosoupape byl francouzský letecký rotační motor představený v roce 1913 společností *Motor Company Gnome*. Jak jeho název napovídá, byl vybaven pouze jedním ventilem na válec a zjednodušené celkové vnitřní uspořádání tak usnadnilo výrobu a provoz motoru. Tento motor se stal hojně užívaným, a to pro svou jednoduchost a účinnost. Dosahoval výkonu kolem 100 hp (73,5 kW). S tímto motorem zpravidla vzlétala první letadla na počátku 1. sv. války.

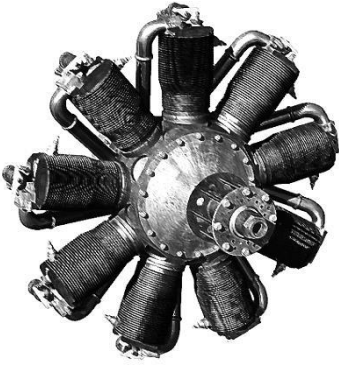
Clerget 9B

Clerget 9B byl francouzský letecký vzduchem chlazený rotační motor. Díky licenci byl vyráběn i ve Velké Británii. Tento motor se vyráběl již od roku 1915, a proto s rychlostí vývoje těchto motorů postupně zastaral, ale i přesto se vyrobilo tohoto motoru kolem 2350 kusů a stal se nejpoužívanějším ve své době. Dosahoval výkonu kolem 135 hp (100 kW). Používal se u mnoha letounů států Trojdhody, například v letounech Sopwith Camel, Bristol M.1 nebo Nieuport 17. Měl ale zásadní chybu, jeho výkon prudce klesal s narůstající výškou. A právě tento motor se stal předchůdcem motoru Bentley BR2. [6]



Obrázek 8: Clerget 9B

Le Rhône 9J



Obrázek 9: Le Rhône 9J

Le Rhône 9J byl francouzský letecký vzduchem chlazený rotační 9-válec o výkonu 110 hp (80,9 kW). Vyráběla jej francouzská firma *Gnome et Rhône*. První typ tohoto motoru se začal vyrábět již v roce 1913 a postupem let se stále vylepšoval.

Tyto motory byly také díky výrobní licenci vyráběny společnostmi *WH Allen Son & Company* z Bedfordu ve Velké Británii, a Německu firmou *Motorenfabrik* v Oberurselu, kde byly prodávány pod názvem Oberursel UR.II.

Byl používán u řady letadel jak francouzských, tak britských i německých, například v letounech Nieuport 17, Sopwith Camel nebo Fokker Dr.I. [7]

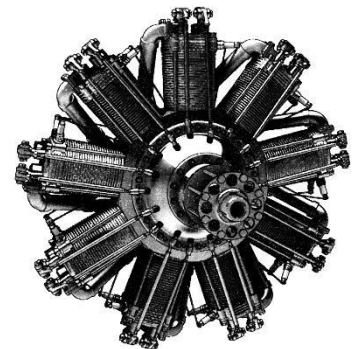
Bentley BR1

Tento motor, jak už víme, zkonstruoval W. O. Bentley ve spolupráci s britským Ministerstvem letectví.

Předlohou mu byl výše uvedený motor Clerget 9B, který již ale nedosahoval tak žádaného a potřebného výkonu. Bentley se rozhodl aplikovat svůj nápad a vybavil motor hliníkovými částmi, a to především hliníkovými válci s litinovou vložkou, ve které běhal hliníkový píst. Zvýšil zdvih, a do každého válce přidal ještě druhou svíčku, aby zajistil vyšší výkon a spolehlivost motoru.

Výsledný motor tedy zvýšil výkon oproti motoru Clerget 9B ze 135 hp na 150 hp (110 kW), a také byl levnějším na výrobu. Původně byl označen jako AR1 ("Admiralty Rotary"), ale za krátko se začal označovat zkratkou BR1 ("Bentley Rotary").

Tento motor byl okamžitě zařazen do výbavy britského letectva a byl primárně určen pro letouny Sopwith Camel v RNAS letkách. Avšak kvůli pokračující výrobě motorů Clerget se nikdy nepodařilo nahradit tyto dražší motory novějšími a výkonnějšími motory BR1. [8]



Obrázek 10: Bentley BR1

3.3 Bentley BR2

Jak už jsme si ukázali, tento motor vzešel ze svého téměř stejného předchůdce BR1. Tyto motory se lišily jak svými rozměry, tak i výkonem, který u BR2 přesáhl 200 koní, což bylo na tehdejší dobu opravdu hodně. Je nutné dodat, že tento motor byl posledním typem rotačního motoru používaným v RAF, a tak představoval vrchol vývoje rotačních motorů. Tyto motory se vyráběly v Nottinghamu a Coventry, kde byly areály společnosti *Humber*. Tato společnost byla založena roku 1868 a zaměřovala se především na výrobu jízdních kol. Od roku 1901 zde začala výroba prvních automobilů a od roku 1909 také letadel. V pozdějších letech se tato společnost stala druhým největším výrobcem automobilů ve Spojeném království a počátkem 1. sv. války dostala za úkol vyrábět letecké motory. A to se dostáváme již do roku 1917, kdy zde byl vyroben první rotační motor Bentley BR2. Těchto motorů bylo celkově vyrobeno kolem 2560 kusů a používaly se až do konce dvacátých let. [1, 9]

Již od svého prvního exempláře byl tento motor primárně určen pro letoun Sopwith Snipe, který byl moderním stíhacím letounem s proporcerami přímo pro BR2. Tato stíhačka byla následovníkem velice rozšířeného a slavného letounu Sopwith Camel a její kvalita tomu nasvědčovala.



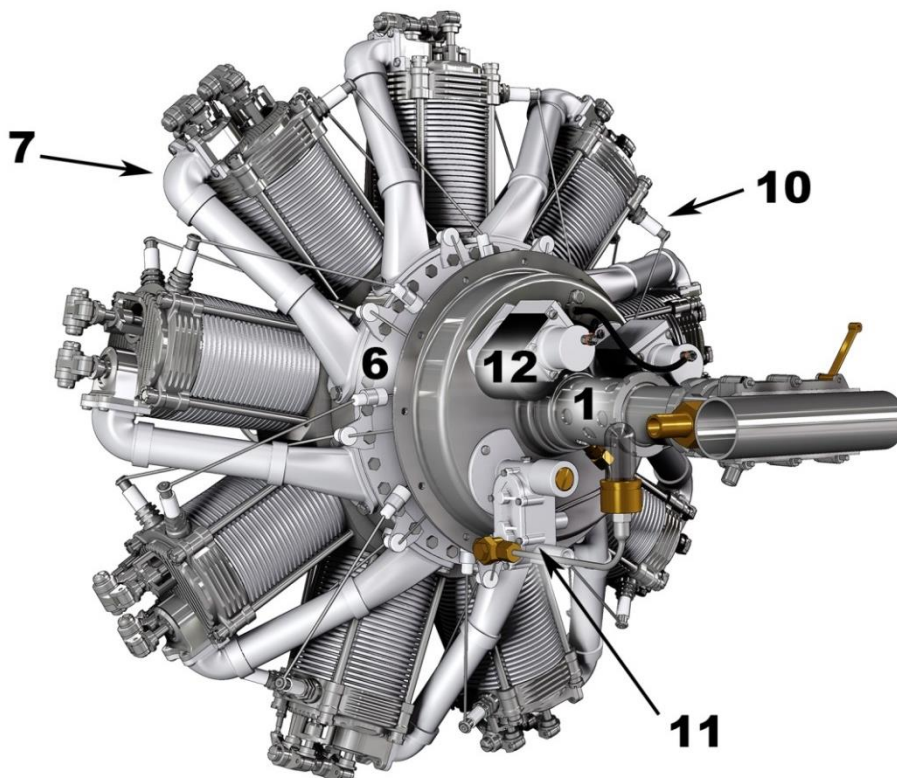
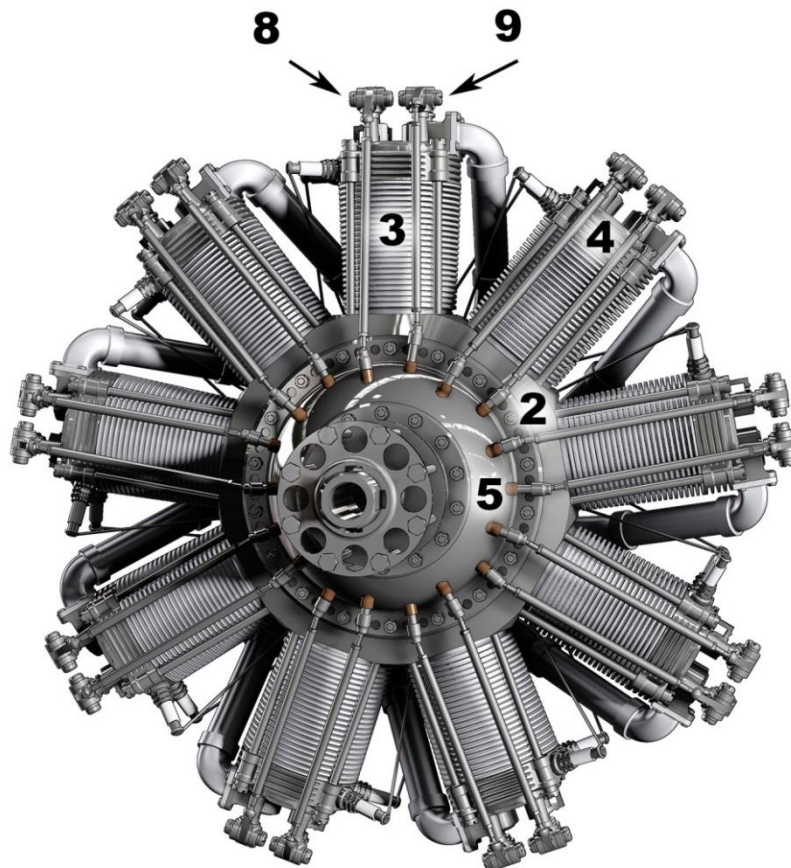
Obrázek 11: Sopwith Snipe

Porovnání parametrů [1]

	Bentley BR2	Clerget 9B
Výkon (hp)	235 (173,8 kW)	135 (100 kW)
Kompresní poměr	5.3	4.36
Celkový objem (litr.)	24,9	16,28
Hmotnost (kg)	215,5	181,5

Obr.11: [10]

Obr. 12: [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://goo.gl/rs0jo1>



LEGENDA

1 - KLIKOVÁ HŘÍDEL
 2 - KLIKOVÁ SKŘÍŇ
 3 - VÁLEC
 4 - HLAVA VÁLCE

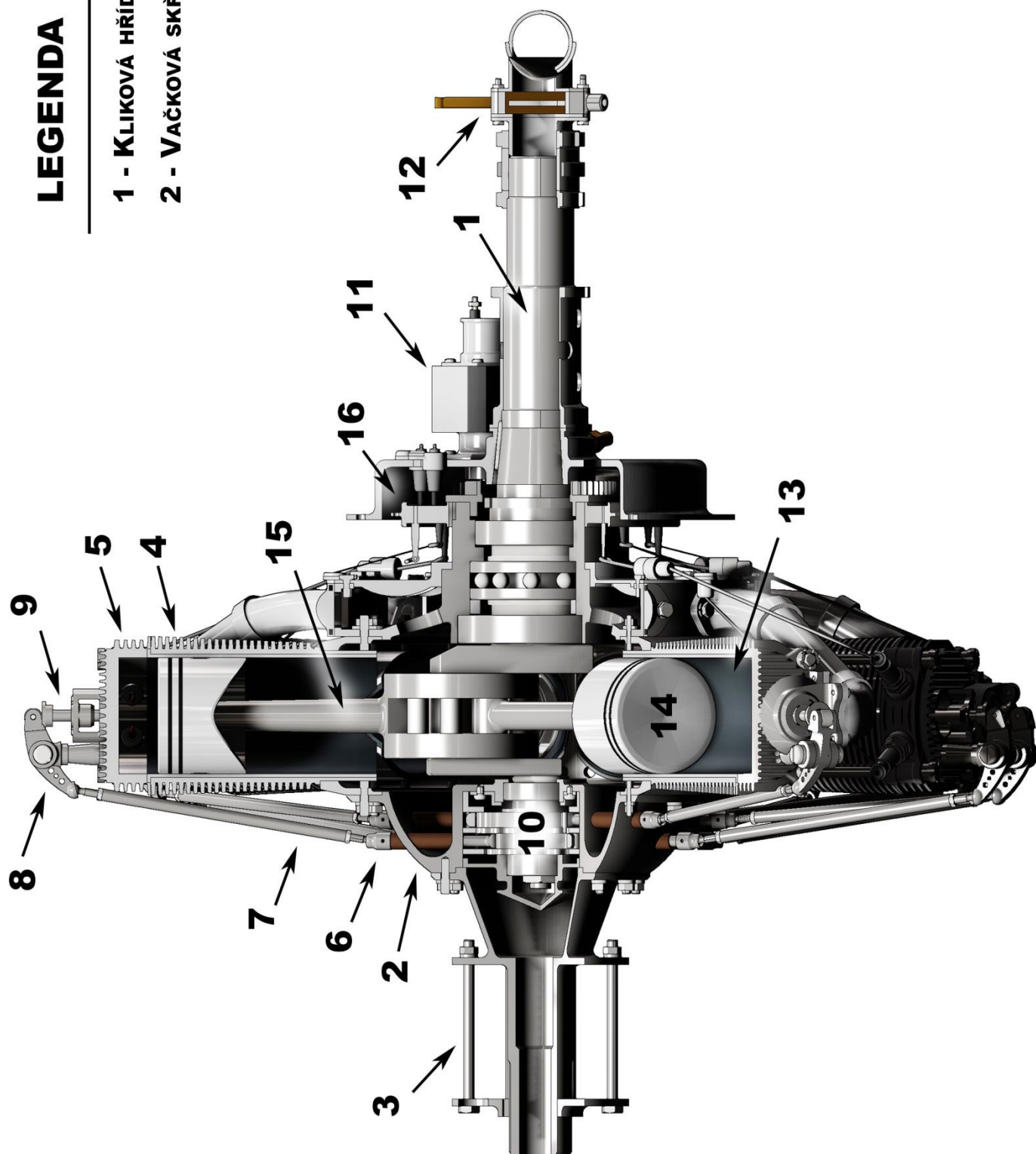
5 - VAČKOVÁ SKŘÍŇ
 6 - TLAČNÁ SKŘÍŇ
 7 - SACÍ POTRUBÍ
 8 - VÝFUKOVÝ VENTIL

9 - SACÍ VENTIL
 10 - SVÍČKA
 11 - OLEJOVÉ ČERPADLO
 12 - MAGNETO

LEGENDA

- 1 - KLIKOVÁ HŘÍDEL
- 2 - VAČKOVÁ SKŘÍŇ

- 3 - HLAVICE
- 4 - VÁLEC
- 5 - HLAVA VÁLCE
- 6 - ZDVIHÁTKO
- 7 - TÁHLO
- 8 - VAHADLO
- 9 - VENTIL
- 10 - VAČKY
- 11 - MAGNETO
- 12 - KARBURÁTOR
- 13 - VLOŽKA VÁLCE
- 14 - PÍST
- 15 - OJNICE
- 16 - ELEKTRICKÝ ROZVOD



3.4 Shrnutí rotačních motorů

3.4.1 Výhody

- Největší výhodou takového uspořádání bylo, že se celý motor choval jako setrvačnick, a tím „uhlazoval“ svůj chod a snižoval vibrace. Vibrace představovaly v té době vážný problém u všech leteckých motorů a pro jejich snížení se k motorům musely přidávat těžké setrvačnick. Protože se rotační motory obešly bez těchto setrvačnicků, byly tím pádem lehčí než stejně výkonné motory s nerotujícími válci (hlavně řadové motory).
- Další výhodou bylo dobré chlazení vzduchem i při nízkých rychlostech a na zemi. Tím, že nebylo potřeba chladicí médium, nebyla nutná ani nádrž pro jeho přepravu. Absence této nádrže také snižovala hmotnost letounu. [11, 12]

3.4.2 Nevýhody

- Do výkonu 110kW mají výhodu bezproblémového chlazení a tedy i nízkou váhu. Avšak se zvyšujícím se výkonem a váhou jejich výhody ustupují do pozadí. Velká rotující hmota vyvozuje značný gyroskopický moment, který zhoršuje letové vlastnosti. S rostoucím výkonem tedy rostla i hmotnost motoru, a tím pádem i gyroskopický moment.
- Další nevýhodou rotačních motorů byla jejich vysoká spotřeba paliva ve srovnání s konkurenčními koncepcemi.
- Rovněž požadavky na zvyšování otáček rotačních motorů se nedařilo plnit, protože i při mírném zvýšení otáček prudce vzrůstal odpor vzduchu, který brzdil rotující válce. [11, 12]

S koncem 1 sv. války dosáhly rotační motory hranice zvyšování výkonu, a tak i použitelnosti. Po válce byly proto rotační motory vytlačeny motory hvězdicovými s pevnými válci.

4 Model motoru Bentley BR2 ve měřítku 1/4

Tento model jsem vytvořil za pomoci publikace, kterou vydalo nakladatelství *Camden Miniature Steam Services* v Somersetu. Tuto knihu zpracoval Lew Blackmore. Sám v ní popisuje výrobu jednotlivých dílů motoru i s rozměrovou dokumentací. Publikaci bylo nutné objednat přes internet a nechat si ji poslat z Anglie, protože neexistuje český překlad.

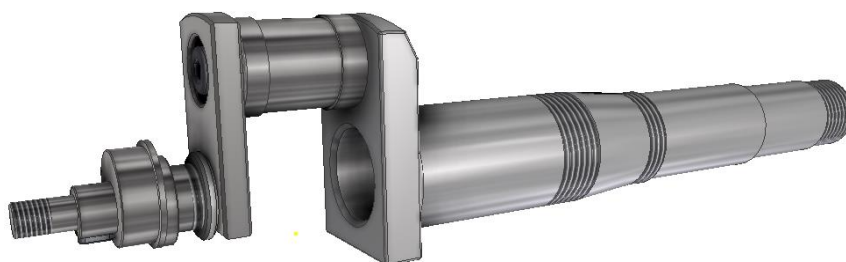
Celý model jsem vytvořil v 3D konstrukčním systému Autodesk Inventor 2014. Pro většinu obrázkových podkladů jsem využil program Autodesk Showcase 2014, který je pro tuto práci určen.

4.1 Základní části motoru

4.1.1 Kliková hřídel

Hřídel je pevně připojena ke kostře letounu, a tím je zajištěn rotační pohyb motoru. Skládá se ze tří částí: hlavní hřídele, krátké hřídele, nebo také čepu kliky, a excentrické hřídele.

Materiál: ocel



Obrázek 12: Kliková hřídel - celek

4.1.2 Kliková skříň



Centrální část motoru. Je to hlavní komponent, na kterou se při montáži nasazují všechny ostatní díly. Jedná se o 9-hran, jehož hlavní funkcí je fixace válců a postranních částí motoru.

Materiál: měkká ocel

Obrázek 13: Kliková skříň

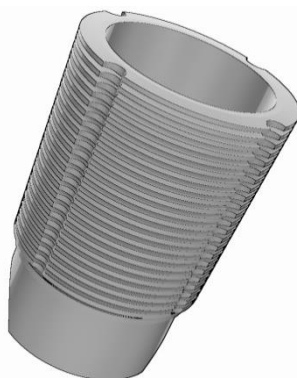
4.1.3 Válec a hlava válce

Válec

Slouží pro udržení pracujícího pístu v jednom směru a zajišťuje správný průběh pracovního cyklu. Skládá se ze dvou do sebe zapadajících součástí: vnějšího válce s podélným vroubkováním pro lepší odvod tepla, a vnitřní válcové vložky sloužící k tlumení rázů a také pro vyšší teplotní odolnost.

Materiál: - válec: slitina hliníku

- vložka: litina



Obrázek 14: Válec



Obrázek 15: Vložka válce

Hlava válce

V této součásti jsou uloženy všechny důležité funkce, díky nimž motor pracuje. Hlava je pevně přichycená k válci a ústí do ní sací potrubí. Jsou zde také umístěny ventily a vahadla, která se starají o jejich pravidelný pohyb.

Materiál: měkká ocel



Obrázek 16: Hlava válce

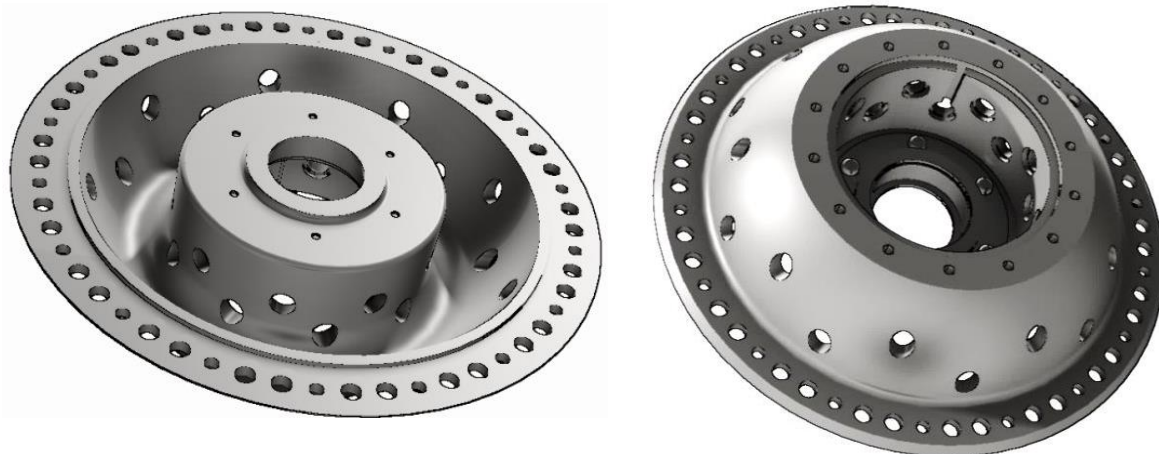
4.1.4 Vačková skříň a uchycení vrtule

Vačková skříň

Tato část je přímo přiklopená na klikovou skříň a uzavírá tak vnitřek motoru z přední strany. Uvnitř se nachází důležitý vačkový mechanismus ovládající OHV rozvod. Ještě před vložením zdvihátek se do ní musejí zarazit bronzová vodící pouzdra.

Uvnitř jsou také umístěna ložiska napomáhající hladké rotaci těla motoru kolem klikové hřídele.

Materiál: měkká ocel

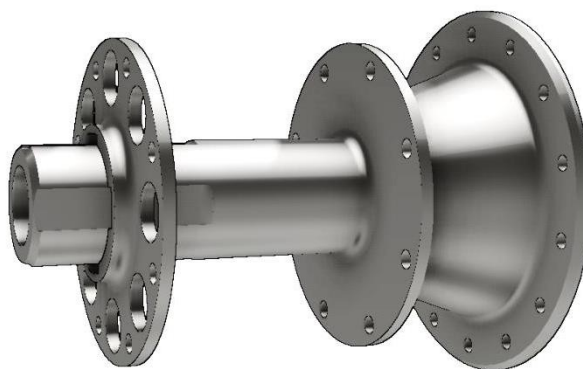


Obrázek 17: Vačková skříň

Hlavice

Hlavice je připevněna k vačkové skříni. Na ni se nasouvá vrtule, která se dotáhne přírubou a osmi šrouby. Do materiálu vrtule se následovně zarazí čtyři klíny, které ji ještě více zajistí.

Materiál: měkká ocel



Obrázek 18: Hlavice s přírubou

4.1.5 Tlačná skříň a její víko

Tlačná skříň

Tato část je přímo připojená ke klikové skříni ze zadní strany. Je vytvarovaná tak, aby se nasátý vzduch společně s palivem plynule rozvedl do sacího potrubí. Také je na ní připevněno centrální ozubené kolo, které roztáčí magneta a olejové čerpadlo.

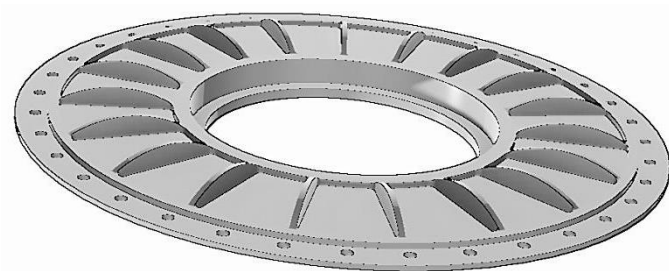
Materiál: měkká ocel



Obrázek 19: Tlačná skříň z obou stran

Víko

Víkem se celý motor ze zadní strany uzavírá. Na jeho vnitřní straně jsou malé lopatky pro lepší vedení vzduchu.



Obrázek 20: Víko tlačné skříně

Materiál: hliník

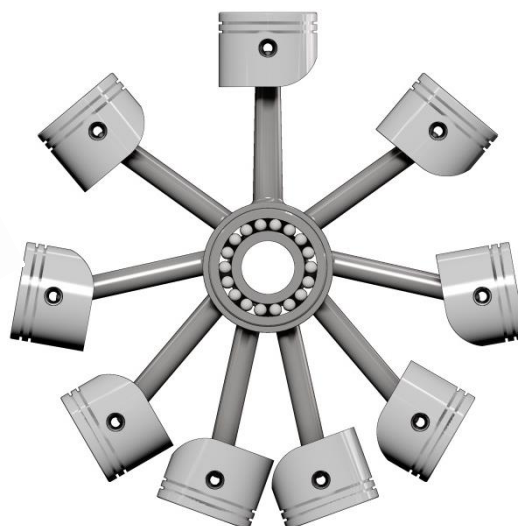
4.1.6 Ojnice

Ojnic jsou v motoru tohoto typu dva druhy. Prvním druhem je hlavní ojnice sloužící k uchycení ložisek kolem klikové hřídele. Další ojnice jsou mnohem jednoduššího provedení a všechny jsou ukotveny v hlavní ojnici pomocí ojničních čepů.

Materiál: ocel



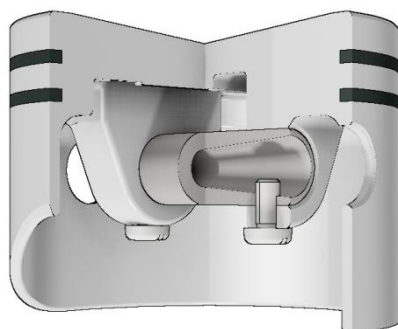
Obrázek 21: Ojnice



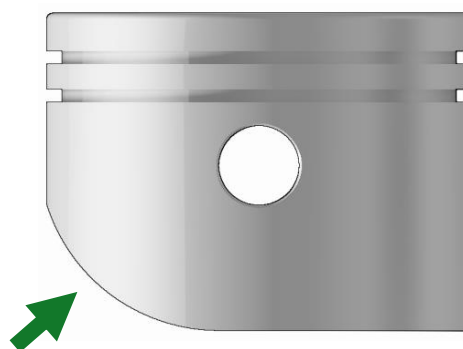
Obrázek 22: Složené ojnice i s písty

4.1.7 Písty

Písty jsou ze slitiny hliníku, což zajišťuje jejich nízkou váhu. Jejich tvar je uzpůsoben typu motoru tím, že mají z jedné strany sražení, které zabraňuje styku pístu s vedlejším pístem při poloze v dolní úvrati.



Obrázek 24: Píst v řezu



Obrázek 23: Píst

Materiál: slitina hliníku

4.1.8 OHV rozvod

Rozvod pracuje na principu, který se za sto let stále nezměnil. Základem je vačka, která díky rotaci udává posuvný pohyb zdvihátku. Zdvihátko předává pohyb táhlu a ten je dál převáděn až k vahadlu, které svým kývavým pohybem ovládá ventil.



Obrázek 25: Pohled na vačky zepředu

Vzhledem k tomu, že typ motoru je rotační, vačka nevykonává žádný pohyb. Její tvar je uzpůsoben k přesnému ovládnání zdvihátek, která kolem ní rotují společně s motorem. Táhla mají z obou stran nastavitelnou délku, a tak se dráha ventilu může jednoduše regulovat.

Zdvihátko je součást z kalené oceli a má zakončení uzpůsobené pro kopírování pohybu vačky ve vertikálním směru.

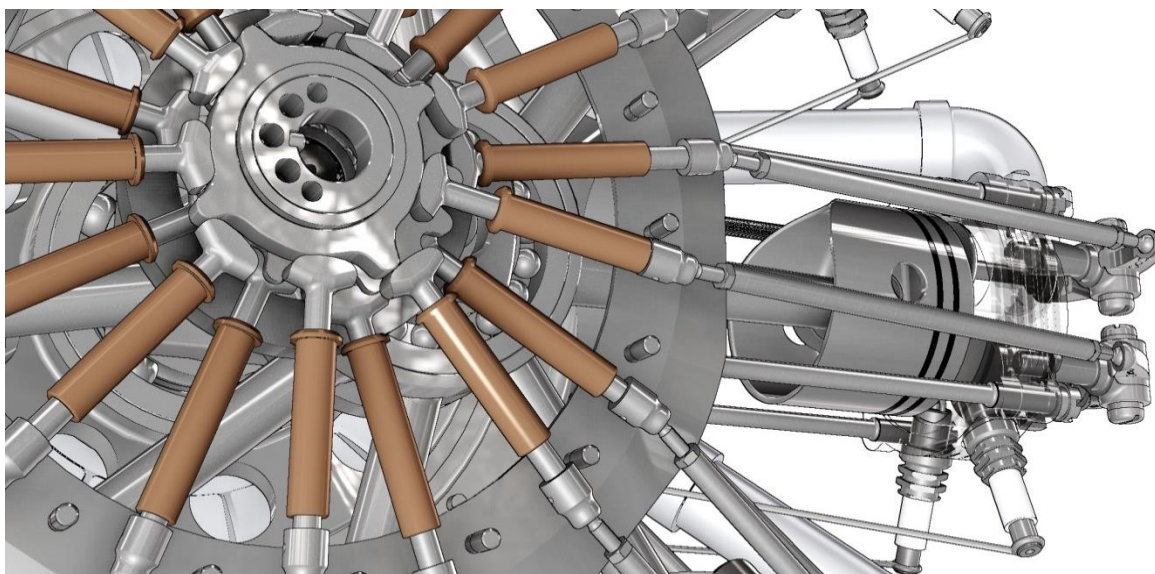
Vahadlo uchyceno na držácích zašroubovaných do hlavy válce. Na jednom konci má prohlubeň, pro styk s táhlem a na druhém konci je vybaveno válečkem, pro tečný dotyk s ventilem.



Obrázek 27: Zdvihátko a ventil



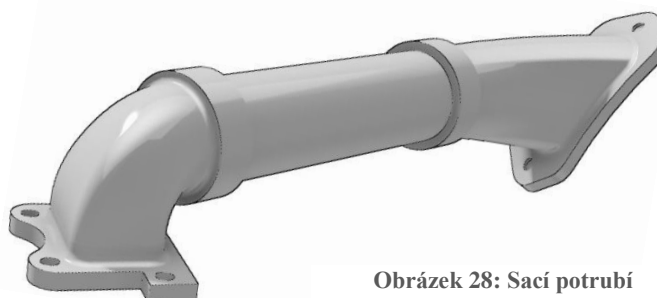
Obrázek 26: Vahadlo



4.1.9 Sání motoru

Soustava zajišťující sání umožňuje vzduchu s příměsí paliva projít dutou klikovou hřídelí až do klikové skříně, kde je souvisle rozváděna postranním potrubím přímo až k jednotlivým sacím ventilům. Důležitým faktorem ovlivňující průchod vzduchu až do válců je podtlak, způsobený pohybem pístů. Tvar sacího potrubí je typický pro tento druh motorů. Konečné části se odlévají z hliníku a poté jsou v konečné části montáže přichyceny na tělo motoru.

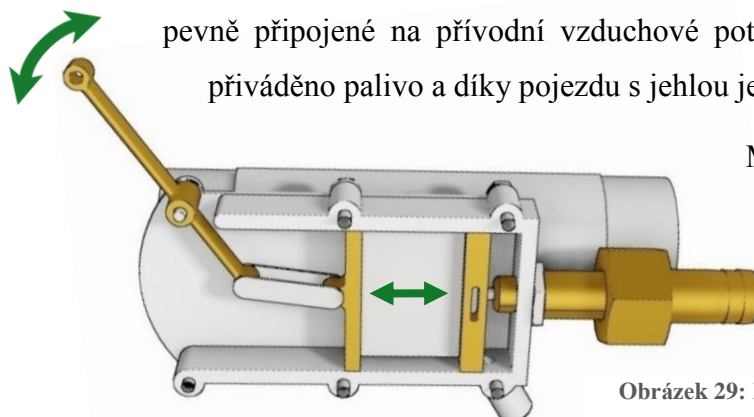
Materiál: hliník



Obrázek 28: Sací potrubí

4.1.10 Karburátor

Tento typ karburátoru se dnes díky moderním technologiím už vůbec nepoužívá, ale pracuje na stejném a základním principu jako ty dnešní. Skládá se z pouzdra, které je pevně připojené na přívodní vzduchové potrubí. Do pouzdra je kolmo přiváděno palivo a díky pojezdu s jehlou je regulován jeho přítok.



Materiál: hliník, mosaz

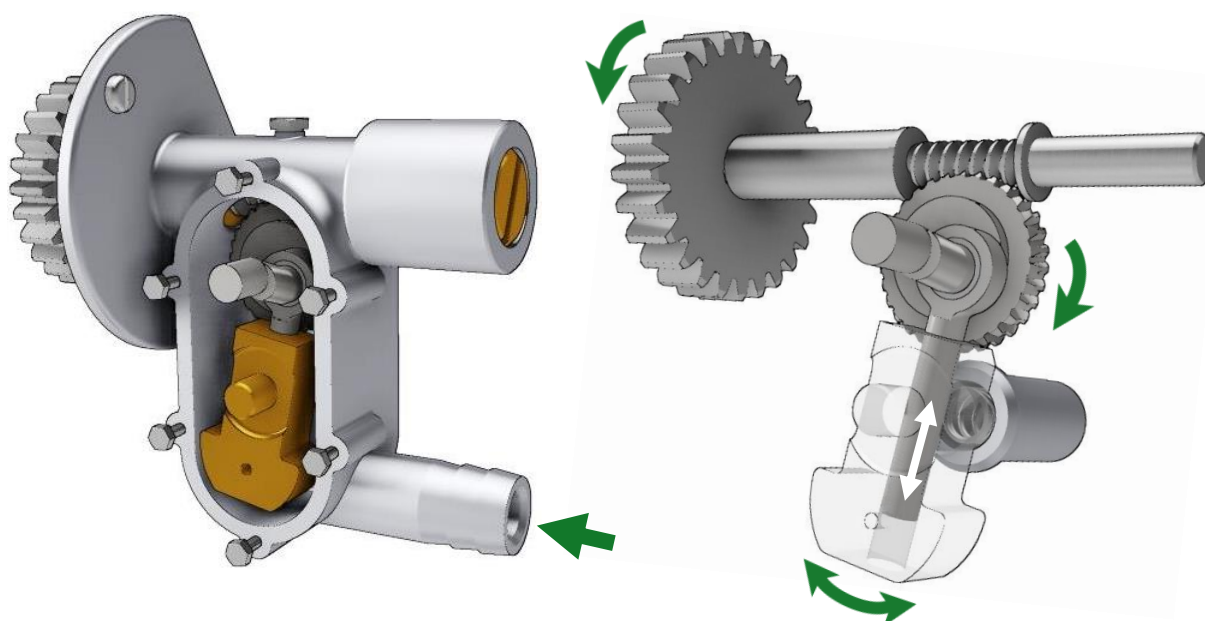
Obrázek 29: Karburátor - popis pohybů

4.1.11 Olejové čerpadlo

Tento již zastaralý typ čerpadla pracuje na principu šnekového převodu, který s pomocí klikové hřídele pohybuje s pístem. Ten díky válci k tomu přizpůsobenému pumpuje tekutinu v pravidelných pulzech.

Celé zařízení je rozpohybováno díky centrálnímu ozubení na zadní straně motoru. Tento typ čerpadla se již nepoužívá.

Materiál: hliník, mosaz



Obrázek 30: Popis pohybů čerpadla

4.1.12 Zážehový systém

Proud se vyrábí ve dvou magnetách připojených na nepohyblivé zadní části motoru. Díky centrálnímu ozubení na motoru je kroučící moment převáděn na ozubená kola obou magnet. Díky tomuto důmyslnému zařízení se dostane elektrický proud v impulzech do celého motoru.

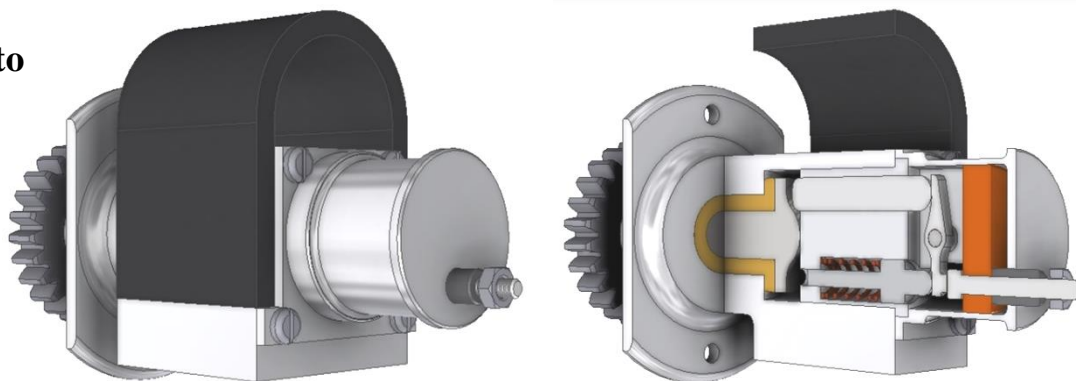
Svíčky

W. O. Bentley vylepšil motor tím, že do každého válce přidal jednu svíčku. Tím zajistil plynulejší a spolehlivější zapalování palivové směsi.



Obrázek 31: Svíčka

Magneto



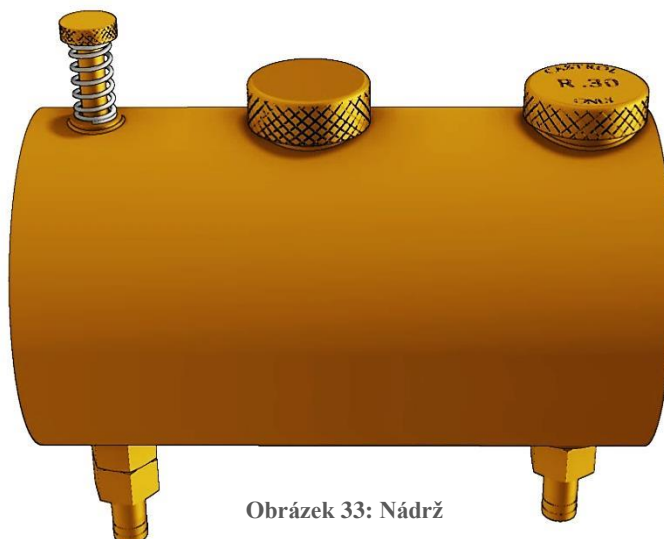
Obrázek 32: Magneto

Magneto je zařízení pro výrobu elektrického proudu. Pracuje na stejném principu jako dynamo a vyskytuje se u některých spalovacích motorů, kde není k dispozici přenosný zdroj elektrické energie. Tento typ magneta je sto let starý, a tak i velmi jednoduchý. Dnes se již nepoužívá.

4.1.13 Palivová nádrž

Nádržka je nezbytná pro zajištění dlouhodobého a plynulého chodu motoru. Je to svařenec skládající se ze dvou od sebe oddělených prostor pro palivo a olej.

Materiál: mosaz



Obrázek 33: Nádrž

4.1.14 Vrtule

Vrtule je důležitou součástí motoru, protože by bez ní letoun nevzlétl. Tento kus dřeva dokáže přeměnit mechanickou energii na potřebný tah. Vrtule se zhotovují ze speciálně navrstveného dřeva a jejich specifický tvar je výzvou pro každého konstruktéra.

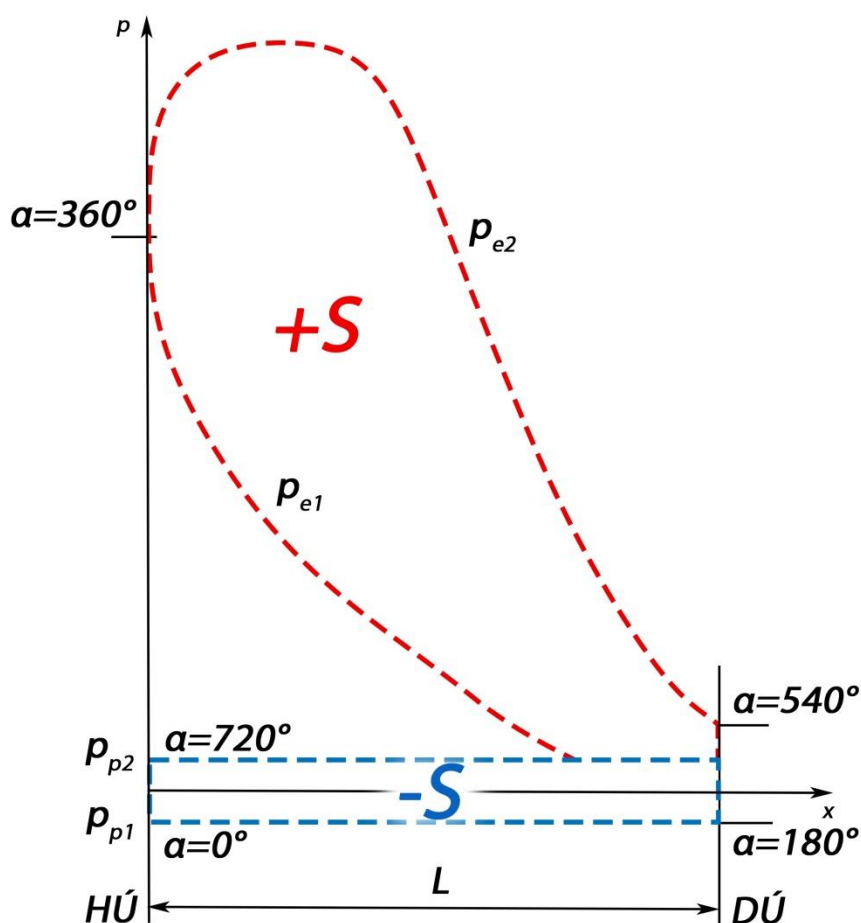


Obrázek 34: Vrtule

5 Výpočtová část

Pro stanovení síly působící na klikový hřídel vyjdeme ze síly působící na píst. Vzhledem k tomu, že nemáme k dispozici průběh tzv. indikovaného tlaku Tento průběh je odměřen na podobném motoru a je to průběh tlaku ve válci v závislosti na natočení klikového hřídele.

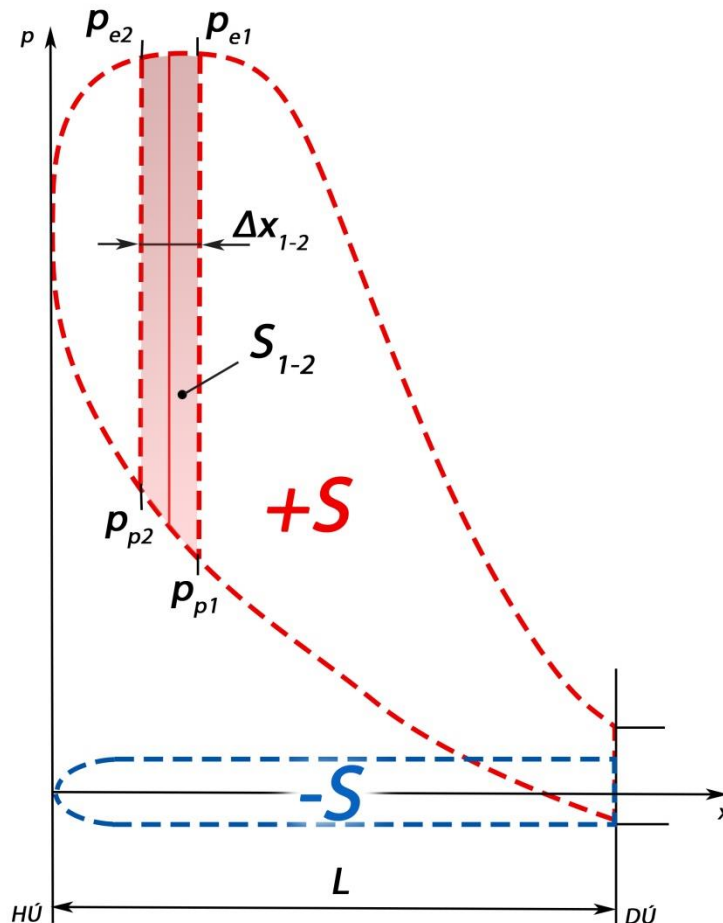
Jeho průběh je možno vidět na obr.1, kde v horní části se snažíme zachovat tvar křivky p_{e1} tak, jak by odpovídala asi průběhu teoretické křivky při přívodu tepla za konstantního objemu. V horní části křivky p_{e2} kopírujeme teoretický průběh křivky při přívodu tepla při konstantním objemu.



Sání probíhá při tlaku menším než je atmosférický (p_{p1}), výtlač probíhá při tlaku vyšší než je atmosférický (p_{p2}). Průběh těchto tlaků v závislosti na posunutí pístů vytváří oblast označenou $-S$. Při ukončení sání se píst vrací a vzhledem k tomu, že sací ventil je uzavřený, dochází k izotermické kompresi.

Průběh je zaznačen jako p_{e1} . Při $\alpha = \text{asi } 340^\circ$ dochází k zapálení zkomprimované směsi a vlivem rozpínání spálené směsi dochází k prudkému zvýšení tlaku. Toto zvýšení probíhá

i při následném zvětšování vnitřního prostoru válce, dokud hoří směs. V další části křivky p_{e2} dochází již k poklesu tlaku ve válci a při natočení kliky $\alpha = 540^\circ$ dochází k otevření výtlačného ventilu. Tím tlak poklesne na tlak p_{p2} a probíhá výplach motoru, kdy píst se pohybuje k horní úvratí. Na obrázku je zřejmé že červeně orámovanou oblast budeme považovat za oblast kladné práce (+S), modrou oblast za oblast záporné práce (-S). Pokud plochy obou těchto obrazců od sebe odečteme a podělíme je zdvihem, obdržíme tzv. P_{ind} .



Z obr. 2 je zřejmé jakým způsobem provedeme integraci plochy, kde na svislou osu grafu vynášíme tlaky a na vodorovnou osu posunutí pístu. Dílčí jednotlivé plochy jsou dány vzorcem:

$$S_{1-2} = \left[\frac{(p_{e1} - p_{p1}) + (p_{e2} - p_{p2})}{2} \right] \cdot \Delta x_{1-2}$$

Tím si vytvoříme soubor elementárních ploch, jejichž součtem obdržíme celkovou plochu.

Tato plocha má rozměr Pa.m. Po vydělení zdvihem je p_{ind} v Pa. Z literatury je známo, že hodnota p_{ind} pro 4-taktní zážehové motory se pohybuje od 0,4 do 0,9 MPa. Zvolil jsem si tedy hodnotu $p_{ind} = 0,5$ MPa.

V Excelu jsem vytvořil tabulku, která imituje práci jednoho válce motoru od 0° do 720° tzn. že zahrnuje všechny 4 takty cyklu. Od 0° do 180° jsem zvolil sací tlak 99kPa. Od 180° do 330° probíhá izotermická komprese a při dosažení této hranice dojde k zážehu směsi, což se projeví prudkým zvýšením tlaku. Průběh tohoto tlaku jsem stanovoval tak, aby výsledná hodnota p_{ind} dosáhla zvolené hodnoty 0,5MPa. Tímto postupem jsem vytvořil průběh tlaku ve válci ve všech čtyřech taktech motoru.

5.1 Síla působící na píst

Pokud znám průběh tlaku, znám také průběh síly působící na píst. Z těchto hodnot tlaku a časování motoru mohu sestavit výslednou sílu působící na ojnici. Tuto hodnotu potřebuji pro pevnostní analýzu. Mohu také použít max. tlak působící na píst pro jeho pevnostní analýzu.

Nejvyšší tlak v spalovací komoře dosahuje hodnoty $p_{max} = 2,5$ MPa (volím). Hodnotu max. síly působící na ojnici a na čep kliky, když píst bude v horní úvrati, určíme z max. tlaku.

$$p_{max} = 2,5 \text{ MPa}$$

$$D_{pistu} = 33 \text{ mm}$$

$$F_{max} = p_{max} \cdot S_{pistu}$$

$$F_{max} = 2,5 \cdot \frac{\pi \cdot D_{pistu}^2}{4}$$

$$F_{max} = 2,5 \cdot \frac{\pi \cdot 33^2}{4}$$

$$F_{max} = 2138,25 \text{ N}$$

5.2 Změna výkonu motoru v závislosti na změně rozměrů

Uvedený motoru byl zmenšen na 1/4 skutečné velikosti. Tím vyvstal požadavek výpočtu výkonu zmenšeného modelu motoru. Vzhledem k tomu, že při změně průměru pístu na 1/4 původního rozměru dojde ke změně plochy na 1/16 původní plochy pístu. U zdvihu je změna lineární tzn., že zdvih modelu je 1/4 zdvihu motoru skutečného. Pro porovnání vlivu měřítka provedu podíl výkonu P skutečného motoru a výkonu P' modelu.

Platí vztah:

$$P = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot p_{\text{ind}} \cdot f \cdot i$$

$$P' = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot L' \cdot p_{\text{ind}} \cdot f \cdot i$$

Kde: $d = k \cdot D$
 $L' = k \cdot L$

Po dosazení obdržíme:

$$P' = \frac{\pi \cdot k^2 \cdot D^2}{4} \cdot k \cdot L \cdot p_{\text{ind}} \cdot f \cdot i$$

Nyní provedu podíl:

$$\frac{P}{P'} = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot p_{\text{ind}} \cdot f \cdot i}{\frac{\pi \cdot k^2 \cdot D^2}{4} \cdot k \cdot L \cdot p_{\text{ind}} \cdot f \cdot i} = \frac{1}{k^3}$$

Výsledný vztah je: $P' = P \cdot k^3$ Známe: $k = 1/4 = 0,25$
 $P = 173,8 \text{ kW}$

Po dosazení obdržíme: $P' = 173,8 \cdot 0,25^3$
 $P' = 2,72 \text{ kW}$

Výsledný výkon modelu v měřítku 1/4 je 2,72 kW.

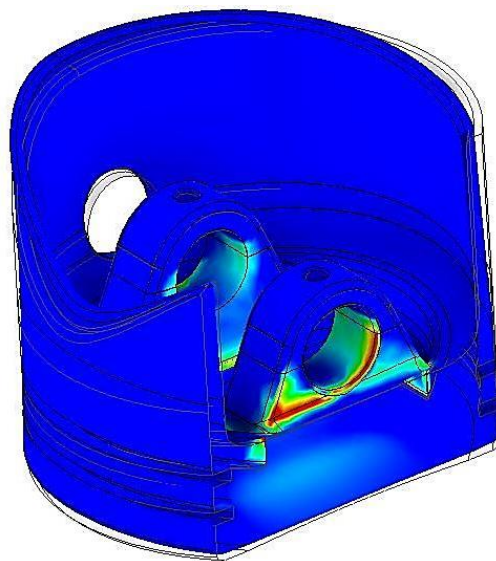
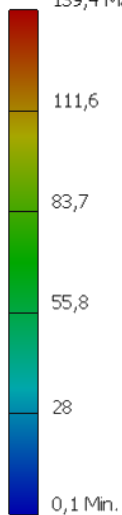
Pevnostní analýza

Ze zvolených hodnot p_{\max} a F_{\max} mohu nyní v programu Inventor 2014 provést pevnostní analýzu, která mi ukáže deformace součásti při nejvyšším zatížení.

Píst

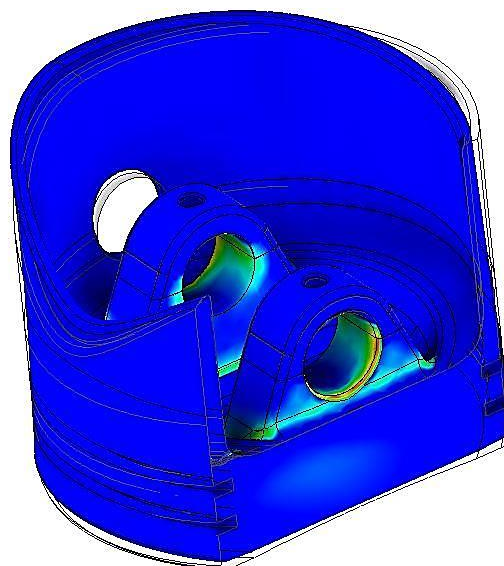
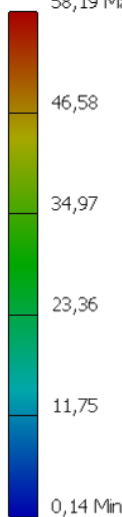
Po dosažení hodnot zatížení a následné pevnostní analýze jsem zjistil, že v určitých partiích pístu mohu uzpůsobit tvar tak, že namáhání bude menší. To jsem také provedl a podařilo se mi snížit napětí v součásti o polovinu. Z počáteční hodnoty 139,4 MPa na 58,2 MPa.

Typ: Napětí Von Mises
Jednotka: MPa
12.3.2014, 19:10:12
139,4 Max.



Obrázek 35: Analýza původního pístu

Typ: Napětí Von Mises
Jednotka: MPa
12.3.2014, 19:00:57
58,19 Max.

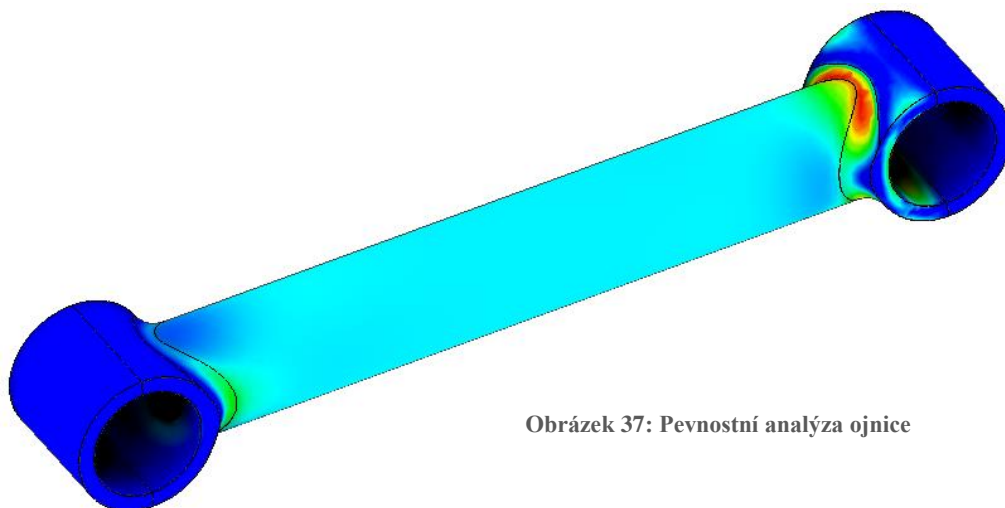
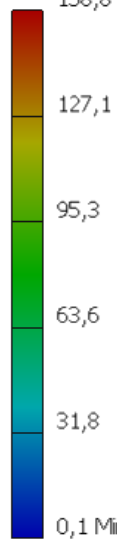


Obrázek 36: Analýza upraveného pístu

Ojnice

U pevnostní analýzy ojnice postupují obdobným způsobem jako u pístu, jen s tím rozdílem, že již nedosazují p_{\max} ale zatěžují F_{\max} .

Typ: Napětí Von Mises
Jednotka: MPa
13.3.2014, 16:09:2
158,8 Max.



Obrázek 37: Pevnostní analýza ojnice

6 Ekonomická část

Pro určení ekonomického přínosu nového motoru jsem musel využít jen základní technické údaje daných motorů. Vzhledem k tomu, že vývoj tohoto motoru začal více než před sto lety a končil ve 20. letech minulého století, je nemožné zjistit ceny materiálů, ceny práce při výrobě jednotlivých dílů, ba i ceny paliva a maziv. Proto jsem se rozhodl, že provedu porovnání výkonových, hmotnostních a cenových parametrů v procentuální formě. Toto porovnání bude vztaženo na skutečné velikosti srovnávaných typů, nebudou se vztahovat na model v měřítku 1/4.

Popis jednotlivých parametrů motorů Clerget 9B a Bentley BR2:

Hodnoty s indexem n, se vztahují pro novější typ motoru (Bentley BR2). Hodnoty s indexem s, se vztahují ke staršímu typu motoru (Clerget 9B).

Hmotnostní parametr - je definován jako poměr hmotnosti předešlého typu s naším typem motoru. [1]

$$\begin{aligned} m_s &= 181,5 \text{ kg} \\ m_n &= 215,5 \text{ kg} \end{aligned} \quad k_m = \frac{m_n}{m_s} = \frac{215,5}{181,5} = 118,7\%$$

Hmotnost nové ho typu motoru se tedy zvětšila o 18,7%.

Výkonnostní parametr - je definován jako poměr výkonu a hmotnosti obou typů. [1, 6]

$$\begin{aligned} P_s &= 100 \text{ kW} \\ P_n &= 173,8 \text{ kW} \end{aligned} \quad \begin{aligned} k_{P_s} &= \frac{P_s}{m_s} = \frac{100}{181,5} = 0,55 \text{ [kW.kg}^{-1}\text{]} \\ k_{P_n} &= \frac{P_n}{m_n} = \frac{173,8}{215,5} = 0,8 \text{ [kW.kg}^{-1}\text{]} \end{aligned} \quad \frac{k_{P_n}}{k_{P_s}} = \frac{0,8}{0,55} = 145,5\%$$

Výkon nové ho typu motoru se tedy zvětšil o 45,5%.

Parametr spotřeby paliva - je definován jako poměr výkonu se spotřebou paliva obou typů. [1, 6]

$$\begin{aligned} m_{\text{pal.s}} &= 141,41 / \text{hod} \\ m_{\text{pal.n}} &= 263,61 / \text{hod} \end{aligned} \quad \begin{aligned} k_{\text{pal.s}} &= \frac{P_s}{m_{\text{pal.s}}} = \frac{100}{141,4} = 0,7 \text{ [kW.kg}^{-1}\text{]} \\ k_{\text{pal.n}} &= \frac{P_n}{m_{\text{pal.n}}} = \frac{173,8}{263,6} = 0,66 \text{ [kW.kg}^{-1}\text{]} \end{aligned} \quad \frac{k_{\text{pal.n}}}{k_{\text{pal.s}}} = \frac{0,66}{0,7} = 94,3\%$$

Spotřeba paliva nového typu poklesla o 5,7%. Zatím co starý motor potřeboval na 1kW 0,7 kg paliva, tak nový motor jen 0,66 kg.

Objemový parametr - je definován jako poměr výkonu s celkovým objemem válců obou typů. [1, 6]

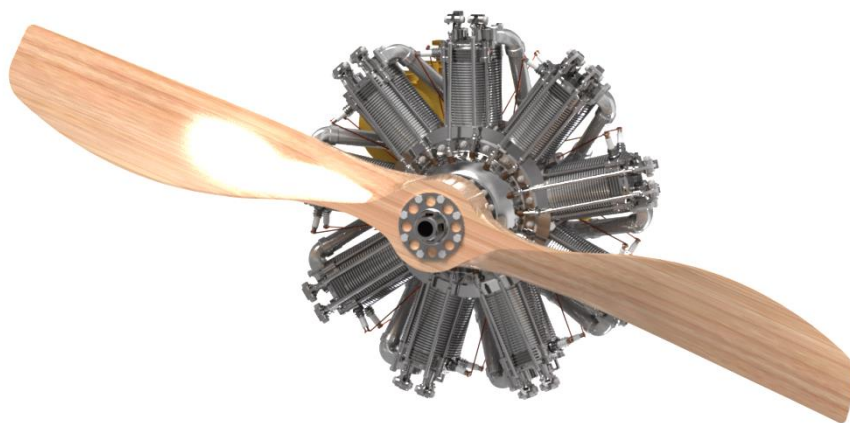
$$\begin{array}{l} V_s = 16,28 \text{ l} \\ V_n = 24,9 \text{ l} \end{array} \quad \begin{array}{l} k_{sp.s} = \frac{P_s}{V_s} = \frac{100}{16,28} = 6,14 [\text{kW} \cdot \text{dm}^{-3}] \\ k_{sp.n} = \frac{P_n}{V_n} = \frac{173,8}{24,91} = 6,98 [\text{kW} \cdot \text{dm}^{-3}] \end{array} \quad \frac{k_{sp.n}}{k_{sp.s}} = \frac{6,98}{6,14} = 113,6\%$$

Tzv. litrový výkon vzrostl z 6,14 [kW.dm⁻³] na 6,98 tedy o 13,6%.

7 Závěr

Kdybych měl zhodnotit tuto téměř půlroční práci, musím říct, že to nebyl jednoduchý úkol. Téma leteckých rotačních motorů není v češtině stále ještě ani z části zpracované. Práci mi proto ztěžoval fakt, že jsem musel veškeré zdroje překládat z angličtiny. V této práci jsem se pokusil o jednoduché přiblížení základních informací o tomto druhu motorů a z hlediska jejich zastaralosti mi bylo potěšením vysvětlit jejich fungování a popsat jejich základní části. Abych mohl postupovat přesně při práci, musel jsem si zakoupit anglickou publikaci a to již během srpna 2013. Tento krok přinesl ale mnohé ovoce.

Díky motoru Bentley BR2 jsem mohl proniknout do problematiky leteckých rotačních motorů a během práce jsem pochopil mnohé principy, na nichž tyto motory pracují. Mohl jsem si všimnout detailů, o kterých bych nikdy ani nepřemýšlel a díky tomu také mohu předat své znalosti dál.



Obrázek 38: Bentley BR2

Anotace

Příjmení a jméno:	Brabec Rostislav
Škola:	SPŠS Olomouc
Název práce:	Motor Bentley BR2
Vedoucí práce:	Ing. Vladimír Houšť
Počet stran:	36
Počet použité literatury:	2
Počet použitých zdrojů:	13
Klíčová slova:	Bentley BR2, Rotační hvězdicové motory, letectví

V mém práci se zabývám leteckým motorem Bentley BR2. Tento motor řadíme do skupiny hvězdicových rotačních motorů. Tyto motory jsou specifické tím, že pracují na opačném principu než motory, které známe. Tímto principem je pevná kliková hřídel, kolem které rotuje blok motoru společně s válci.

Motor Bentley BR2 jsem také vytvořil jako 3D model v měřítku $\frac{1}{4}$ a následně popsal jeho základní části. Provedl jsem také pevnostní analýzu pístu a ojnice. Pro modelování a pevnostní analýzy jsem používal program Autodesk Inventor 2014.

Abstract

In my project I focus on the aircraft engine Bentley BR2. This engine belongs among radial rotary engines. These engines are specific by the fact that they work on opposite principle than typical combustion engines: their crankshaft is still and the body of the engine rotates around it together with the cylinders.

I created a 3D model of the Motor Bentley BR2 in 1:4 scale and then I described its body. I also made a stress-strength analysis of the piston and the piston-rod. I used the application Autodesk Inventor 2014 for both the modelling and the stress-strength analysis.

Seznam použitých zdrojů

1. BLACKMORE, L.K. Bentley BR2: World War 1 rotary aero engine : building the one quarter scale working replica. Rode: Camden Miniature Steam Services, 1996. ISBN 09-519-3674-3
2. LEINVEBER, Jan, ŘASA, Jaroslav, VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. 3. doplněné vyd. Praha: Scientia, 1999, 985 s. ISBN 80-718-3164-6-
3. Gnome et Rhône. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Gnome_et_Rh%C3%B4ne
4. Motorenfabrik Oberursel. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Motorenfabrik_Oberursel
5. Clerget-Blin. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Clerget-Blin>
6. Clerget 9B. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Clerget_9B
7. Le Rhône 9J. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Le_Rh%C3%B4ne_9J
8. Bentley BR1. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bentley_BR1
9. Humber (car). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Humber_\(car\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Humber_(car))
10. Bentley BR2. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bentley_BR2.
11. Historie a současnost letectví: Letadla. STRIA, Radek. [online]. [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://www.historieletectvi.xf.cz/letadla.htm#1valka>
12. Rotační motor. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Rota%C4%8Dn%C3%AD_motor
13. The Aviation History Online Museum: Rotary Engine Theory [online]. [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://www.aviation-history.com/engines/rotary-theory.htm>

Seznam obrázků

Obrázek 1: W. O. Bentley	5
Obrázek 2: Bentley BR2.....	6
Obrázek 3: W. O. Bentley 20 léta.....	6
Obrázek 4: logo Bentley - současnost	6
Obrázek 5: Gnome et Rhône	7
Obrázek 6: Motorenfabrik Oberursel	7
Obrázek 7: Gnome Monosoupape	8
Obrázek 8: Clerget 9B	8
Obrázek 9: Le Rhône 9J	9
Obrázek 10: Bentley BR1.....	9
Obrázek 11: Sopwith Snipe	10
Obrázek 12: Kliková hřídel - celek	14
Obrázek 13: Kliková skříň.....	14
Obrázek 14: Válec	15
Obrázek 15: Vložka válce	15
Obrázek 16: Hlava válce	15
Obrázek 17: Vačková skříň	16
Obrázek 18: Hlavice s přírubou.....	16
Obrázek 19: Tlačná skříň z obou stran	16
Obrázek 20: Víko tlačné skříně	17
Obrázek 21: Ojnice.....	17
Obrázek 22: Složené ojnice i s písty.....	17
Obrázek 23: Píst	17
Obrázek 24: Píst v řezu.....	17
Obrázek 25: Pohled na vačky zepředu	18
Obrázek 26: Vahadlo	18
Obrázek 27: Zdvihátko a ventil	18
Obrázek 28: Sací potrubí	19
Obrázek 29: Karburátor - popis pohybů	19
Obrázek 30: Popis pohybů čerpadla	20
Obrázek 31: Svíčka.....	20
Obrázek 32: Magneto	21
Obrázek 33: Nádrž.....	21
	34

Obrázek 34: Vrtule	21
Obrázek 35: Analýza původního pístu	26
Obrázek 36: Analýza upraveného pístu.....	26
Obrázek 37: Pevnostní analýza ojnice.....	27
Obrázek 38: Bentley BR2.....	30

Cizojazyčný slovník

Letectví	Aviation
Motor	Engine
Hvězdicový rotační motor	Radial rotary engine
Klíková hřídel	Crankshaft
Vačka	Cam
Ozubené kolo	Gear wheel
Čerpadlo	Pump
Válec	Cylinder
Píst	Piston
Ojnice	Piston-rod
Vrtule	Propeller
Pevnostní analýza	Stress-strength analysis
Výkon	Performance